

COMPREENSÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS REGIONAIS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE TRÊS MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Raphael Abrahão – raphael@cear.ufpb.br

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia de Energias Renováveis

Resumo. *No presente estudo avaliou-se o uso de métodos estatísticos tradicionais e não tradicionais para ampliação do conhecimento sobre as mudanças climáticas em escala regional a partir de dados climáticos históricos. Três abordagens diferentes foram executadas: i) avaliação geral da evolução nos dados climáticos, com comparação entre dois períodos (inicial e recente); ii) análise de tendência; e iii) aplicação da análise cluster. Dados diários de chuva e neve foram obtidos a partir da estação meteorológica do aeroporto de Sudbury (Canadá), de janeiro de 1956 a dezembro de 2010 (55 anos completos). A comparação entre períodos revelou que a precipitação anual em forma de chuva está aumentando na localidade, com incremento de 12% em anos mais recentes. Já a aplicação da análise de tendência e da análise cluster evidenciaram que essas tendências anuais crescentes não foram uniformes ao longo do ano. Este aumento anual ocorreu principalmente no inverno e na primavera. Por outro lado, diminuições nas chuvas de verão foram detectadas apenas através da análise de cluster. Segundo essa análise, os verões estão ficando mais secos nessa localidade, apesar de que os anos estão mais úmidos. Com relação aos dados de queda de neve, não houve diferença entre os dois períodos comparados e nenhuma tendência significativa foi detectada na análise de tendência. Contudo, a análise de cluster mostrou mudanças claras nos meses de mais neve (dezembro, janeiro e fevereiro), indicando que o clima da localidade está mudando com tendência de invernos mais tardios com relação à queda de neve. Assim, os resultados mostraram que a inclusão de métodos simples como a análise cluster, aliada a métodos estatísticos mais tradicionais, pode contribuir para uma melhor compreensão das mudanças climáticas.*

Palavras-chave: *Dados Climáticos, Análise Cluster, Análise de Tendência, Precipitação*

1. INTRODUÇÃO

Muitos estudos foram realizados nos últimos anos com o objetivo de compreender com maior profundidade as mudanças climáticas e suas consequências. As atuais concentrações de gases de efeito estufa estão entre as principais preocupações ambientais de muitos países e vários cientistas preveem que a temperatura média do planeta pode aumentar entre 1,8 e 4,0°C até o fim do século XXI, o que pode causar impactos ambientais irreversíveis em diversas partes do mundo (IPCC, 2007; Malhi et al., 2009; Davidson et al., 2012).

Este cenário de aumento nas temperaturas é apenas uma faceta das mudanças climáticas. Alterações nos padrões de precipitação também são importantes e precisam ser entendidos mais profundamente. Tais mudanças no clima podem afetar ecossistemas, dispersar pragas e epidemias, ameaçar infraestruturas urbanas e áreas agrícolas, além de colocar em risco o abastecimento de água e de energia (Knapp et al., 2002; Disch et al., 2012; Davidson et al., 2012; Durack et al., 2012).

Compreender a natureza e a extensão desses impactos é fundamental para a determinação de políticas de adaptação no sentido de evitar, ou pelo menos diminuir, os impactos negativos das alterações climáticas, assim como aproveitar os impactos positivos. No entanto, para entender os potenciais impactos e planejar adequadamente precisamos primeiramente compreender como o clima está mudando.

Alguns estudos têm utilizado dados históricos para compreender as mudanças climáticas, confirmando que essas mudanças não são estimativas para o futuro e sim uma realidade atual (Magnuson et al., 1997; Vincent & Gullett, 1999; Alexander et al., 2006; Wang & Ding, 2006). Estes estudos são bons exemplos de que, além do uso de modelos climáticos, séries de dados históricos podem ser fundamentais para uma profunda compreensão das mudanças climáticas, principalmente em escala regional.

O presente estudo tem como objetivo a avaliação do uso da análise cluster, em conjunto com outras metodologias mais tradicionais, para ampliação do conhecimento sobre as mudanças climáticas em escala regional a partir de dados climáticos históricos.

2. METODOLOGIA

Foram realizadas três abordagens diferentes: i) avaliação geral da evolução nos dados climáticos, com comparação entre dois períodos (inicial e recente); ii) análise de tendência; e iii) aplicação da análise cluster para analisar as mudanças mensais e sazonais. A intenção não foi comparar as abordagens e sim verificar se o uso de diferentes

abordagens, e não apenas a primeira (normalmente mais usada), pode auxiliar na compreensão das mudanças climáticas através de dados históricos.

Dados diários de chuva e neve foram obtidos a partir da estação meteorológica do aeroporto de Sudbury (Canadá), de janeiro de 1956 a dezembro de 2010 (55 anos completos). Os dados foram obtidos no site do Environment Canada (Canadian National Climate Data and Information Archive, www.climate.weatheroffice.gc.ca). Esses dados foram submetidos a um processo de controle de qualidade antes de serem disponibilizados pela agência canadense. A cidade de Sudbury é parte da província canadense de Ontario e está localizada a 46°29'N e 81°00'W. O clima da cidade é classificado como continental úmido (Dfb de acordo com a classificação de Köppen-Geiger).

2.1 Evolução geral e comparação entre períodos

Para a comparação entre os períodos inicial e recente, os 20 primeiros e os 20 últimos anos do conjunto de dados (1956-1975 e 1991-2010 respectivamente) foram selecionados. Como os dados anuais apresentaram uma distribuição normal, o t-teste foi executado para a comparação entre os dois períodos. Assim, o t-teste determinou se as médias dos dois períodos eram significativamente diferentes ou não. Considerou-se uma probabilidade de erro inferior a 5%.

2.2 Análise de tendência

O teste de Mann-Kendall foi utilizado na análise de tendência. Optou-se por um teste não paramétrico porque os dados mensais e sazonais não apresentaram uma distribuição normal (Mann, 1945; Kendall, 1975). A estimativa da tendência foi realizada através do cálculo do declive de Sen (Sen, 1968) e foram utilizadas probabilidades de erro entre 0,1 e 10%.

2.3 Análise cluster

A análise cluster (Hair et al., 1998) foi aplicada para verificar possíveis mudanças na distribuição das chuvas e queda de neve ao longo do ano. O objetivo foi ordenar os objetos (combinações mês-ano) em grupos (ou clusters) sugeridos pelos dados e não definidos a priori. Dessa forma, os dados foram organizados mensalmente e cada mês foi considerado como uma variável diferente, obtendo-se dados de 660 combinações de mês-ano (12 meses em 55 anos). A análise cluster foi realizada por meio da padronização das variáveis e usando o quadrado da distância euclidiana como medida de similaridade. O método de Ward foi utilizado na obtenção de agrupamentos hierárquicos por sua simplicidade e eficiência computacional.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evolução geral e comparação entre períodos

O conjunto de dados sugere que a precipitação anual em forma de chuva está aumentando na localidade estudada. Mesmo com a variabilidade anual, a tendência crescente nos últimos anos pôde ser observada (Fig. 1a). Diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) foram observadas ao comparar o período 1956-1975 com 1991-2010, apresentando valores médios de 608 e 680 mm/ano respectivamente (aumento de 12% em anos mais recentes).

Com relação aos dados de queda de neve, a tendência não foi tão clara. Apesar de que um ligeiro aumento na queda de neve pôde ser observado (Fig. 1b), não houve diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre as médias dos dois períodos comparados.

3.2 Análise de tendência

Anualmente, a análise de tendência detectou mudanças similares às apresentadas na seção anterior. Contudo, por se tratar de outro método, a quantificação dessa mudança foi diferente. A tendência de aumento significativo nas chuvas ($p < 0,10$) foi quantificada pelo declive de Sen em uma taxa de 1,74 mm/ano e nenhuma tendência significativa foi detectada na queda de neve anual (Tab. 1).

Mudanças na distribuição da precipitação ao longo do ano também foram observadas durante o período estudado. Isso significa que as tendências anuais crescentes observadas para os volumes de chuva não foram uniformes ao longo do ano. Março e maio apresentaram tendências positivas significativas ($p < 0,10$) e declives de Sen de 0,28 e 0,58 mm/ano, respectivamente. Outubro apresentou tendência positiva ainda mais marcada ($p < 0,05$) e declive de Sen de 0,49 mm/ano. Os demais meses do ano não apresentaram tendências significativas.

Sazonalmente, as tendências de aumento significativo foram observadas no inverno ($p < 0,10$) e na primavera ($p < 0,05$) por meio de declives de Sen de 0,32 e 1,04 mm/ano, respectivamente. O teste de Mann-Kendall não detectou tendências significativas nas chuvas durante verão e outono. Com relação à precipitação em forma de neve, nenhuma tendência significativa foi detectada para qualquer mês ou estação do ano.

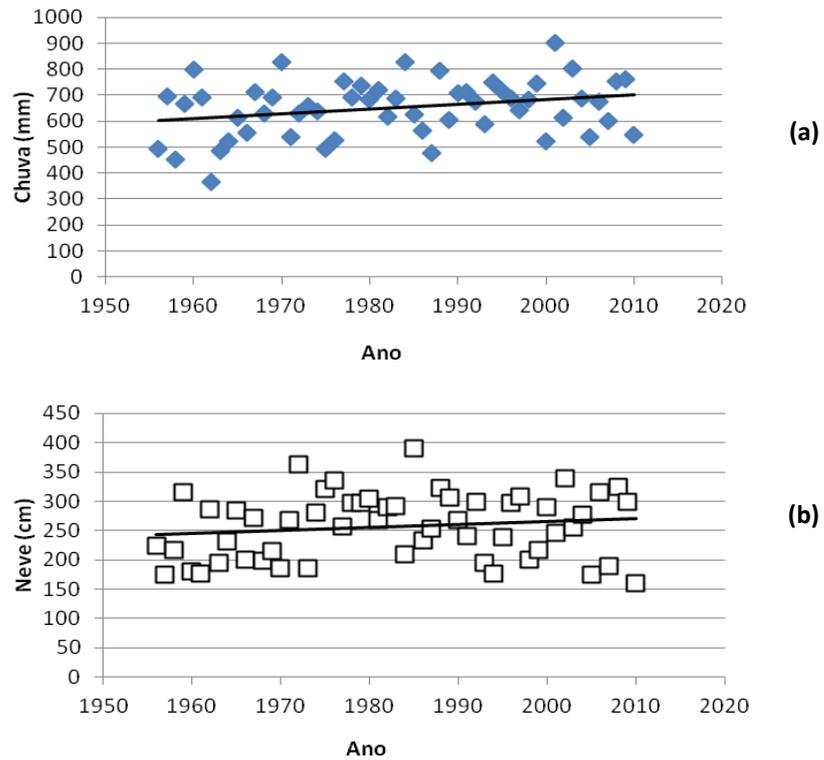


Figura 1 - Valores anuais de precipitação em forma de chuva (a) e neve (b) em Sudbury (Canadá) entre os anos 1956 e 2010.

Tabela 1 - Tendências detectadas nos dados de precipitação em forma de chuva e neve através do teste de Mann-Kendall, quantificadas pelo declive de Sen para a localidade de Sudbury (Canadá) entre os anos 1956 e 2010.

Período	Chuva (mm/ano)	Neve (cm/ano)
Jan	0,05 ns	0,20 ns
Fev	-	0,17 ns
Mar	0,28 ⁺	-0,07 ns
Abr	0,22 ns	0,07 ns
Mai	0,58 ⁺	-
Jun	-0,13 ns	-
Jul	0,13 ns	-
Ago	0,36 ns	-
Set	-0,18 ns	-
Out	0,49*	-
Nov	0,15 ns	-0,10 ns
Dez	0,07 ns	0,17 ns
Inverno	0,32 ⁺	0,67 ns
Primavera	1,04*	0,06 ns
Verão	0,08 ns	-
Outono	0,35 ns	-0,15 ns
Ano	1,74 ⁺	0,60 ns

ns = não significativo

⁺ p < 0,10

* p < 0,05

** p < 0,01

*** p < 0,001

3.3 Análise cluster

A análise cluster separou os 55 anos de dados de chuva em três grupos (Tab. 2). O grupo 1 foi composto pelos anos 1956, 1959, 1960, 1961, 1962, 1964, 1970, 1972, 1976, 1978, 1987, 1992, 1997 e 2010. O grupo 2 consistiu nos anos 1957, 1958, 1963, 1965, 1966, 1967, 1968, 1969, 1971, 1973, 1974, 1975, 1977, 1979, 1981, 1982, 1984, 1985, 1986, 1989, 1990, 1991, 1994, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 e 2009. Finalmente, o cluster 3 incluiu os anos 1980, 1983, 1988, 1993, 1995, 1996 e 2008.

Tabela 2 - Os três grupos classificados pela análise cluster a partir dos dados mensais de chuva na localidade de Sudbury (Canadá) entre os anos 1956 e 2010. Também são apresentados o ano mediana e a soma correspondente a cada grupo.

Grupo	Ano Mediana	Jan (mm)	Fev (mm)	Mar (mm)	Abr (mm)	Mai (mm)	Jun (mm)	Jul (mm)	Ago (mm)	Set (mm)	Out (mm)	Nov (mm)	Dec (mm)	Soma (mm)
1	1971	6	0	11	37	67	86	86	95	129	51	35	7	611
2	1985	7	9	30	47	72	86	79	75	94	81	57	19	656
3	1993	36	5	25	69	97	50	70	106	104	82	41	16	701

Como a variabilidade interanual da chuva é comumente elevada, os três grupos reuniram anos referentes a todos os períodos da série de dados. No entanto, o cluster 1 apresentou uma maior concentração de anos iniciais (ano mediana = 1971), enquanto que o grupo 2 (ano mediana = 1985) e o grupo 3 (ano mediana = 1993) corresponderam gradualmente a anos mais recentes. É importante notar que o ano mediana não precisa estar necessariamente entre os anos compostos no grupo, já que é simplesmente um indicador para comparação entre grupos representativos de períodos mais remotos e grupos representativos de períodos mais recentes.

A separação em 3 grupos destacou o aumento temporal na precipitação anual na localidade de Sudbury, com o grupo 1 somando 611 mm/ano; o grupo 2 somando 656 mm/ano; e o grupo 3, que representa a configuração principal dos anos mais recentes, somando 701 mm/ano. Esse resultado de aumento das chuvas com o tempo já havia sido indicado pelos métodos apresentados anteriormente, no entanto, através da análise cluster também foi possível observar as mudanças na distribuição sazonal das chuvas, com pouca interferência da variabilidade interanual dos dados. Os incrementos nos volumes de chuva foram observados na maioria dos meses, mas em diferentes escalas (Tab. 2). Diminuições foram observadas durante os meses de junho, julho e setembro, apesar dos aumentos anuais.

Observando essas mudanças ao longo das estações, é mais fácil verificar a influência gradual das mudanças climáticas sobre a sazonalidade da precipitação (Fig. 2). As alterações observadas foram muito marcadas durante o inverno e a primavera, com aumentos de 309% e 65%, respectivamente, comparando os grupos 1 e 3. Durante o outono os aumentos não foram expressivos (6%), enquanto que no verão, uma estação chuvosa muito importante na localidade, a redução de 15% representou uma diminuição de 41 mm nas chuvas.

No que concerne à precipitação em forma de neve, a análise cluster separou os 55 anos de dados em dois grupos. O grupo 1 foi composto pelos anos 1956, 1957, 1958, 1959, 1960, 1961, 1963, 1964, 1966, 1968, 1969, 1970, 1973, 1977, 1980, 1984, 1986, 1987, 1991, 1993, 1994, 1995, 1998, 2003, 2005, 2007 e 2010, e o grupo 2 foi composto pelos anos 1962, 1965, 1967, 1971, 1972, 1974, 1975, 1976, 1978, 1979, 1981, 1982, 1983, 1985, 1988, 1989, 1990, 1992, 1996, 1997, 1999, 2000, 2001, 2002, 2004, 2006, 2008 e 2009. Os anos correspondentes às medianas dos dois grupos ficaram próximos (1977 e 1987), o que demonstra que as tendências de mudança na distribuição de queda de neve não foram tão claras quanto para as chuvas. No entanto, mudanças na distribuição da neve puderam ser observadas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, os três meses com valores mais elevados de queda de neve na localidade de Sudbury. Dessa forma, apesar de que a soma anual da precipitação em forma de neve não sofreu mudança significativa, os anos mais recentes apresentaram valores reduzidos em dezembro (-13%), e valores mais elevados em janeiro (38%) e especialmente em fevereiro (116%), o que indica uma tendência a invernos mais tardios em anos mais recentes (Fig. 3).

A aplicação da análise cluster e da análise de tendência evidenciaram que as tendências anuais crescentes observadas para os volumes de chuva na localidade de Sudbury não foram uniformes ao longo do ano. Este aumento anual ocorreu principalmente no inverno e na primavera. Por outro lado, diminuições nas chuvas de verão foram detectadas apenas através da análise de cluster. Segundo essa análise, apesar de que, nessa localidade, os anos estão mais úmidos atualmente, os verões estão se tornando mais secos.

Estudos anteriores já haviam detectado aumentos nas chuvas de regiões próximas à localidade de Sudbury (Magnuson et al., 1997; OCCIAR, 2010), no entanto, nenhum deles considerou em profundidade as mudanças na sazonalidade.

No que se refere à precipitação em forma de neve, enquanto que a análise de tendência não indicou quaisquer tendências significativas, a análise de cluster mostrou mudanças claras para os meses de mais neve (dezembro, janeiro e fevereiro). Foram observadas reduções no mês de dezembro e incrementos em janeiro e fevereiro. Isso significa que o clima da localidade está mudando com tendência de invernos mais tardios com relação à queda de neve, o que também pode estar relacionado à mudanças em outras variáveis (e.g., temperatura) que não foram analisadas neste estudo.

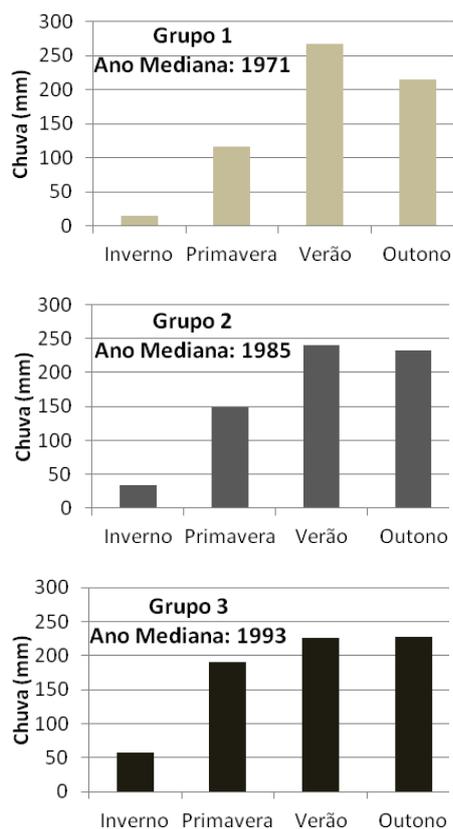


Figura 2 - Mudanças na distribuição sazonal das chuvas na localidade de Sudbury (Canadá) entre os anos 1956 e 2010, representadas pelos três grupos classificados na análise cluster.

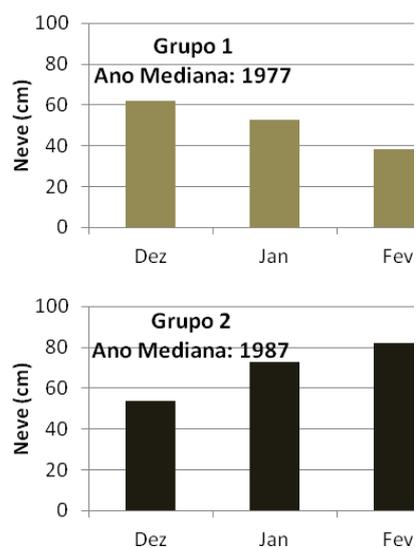


Figura 3 - Mudanças na precipitação em forma de neve em dezembro, janeiro e fevereiro na localidade de Sudbury (Canadá) entre os anos 1956 e 2010, representadas pelos dois grupos classificados na análise cluster.

4. CONCLUSÕES

As metodologias aplicadas no presente estudo demonstraram que a detecção de mudanças anuais é apenas o passo inicial numa compreensão mais completa das mudanças climáticas, que também incluem mudanças mensais e sazonais. Em muitas áreas do mundo, a ausência de mudanças ou tendências significativas a partir de dados climáticos organizados anualmente pode dar uma falsa ideia de ausência de mudanças climáticas na localidade (e.g., precipitação em forma de neve na localidade do presente estudo). No entanto, os resultados aqui apresentados mostraram que a inclusão de métodos simples como a análise cluster pode contribuir para uma melhor compreensão de mudanças climáticas mensais e sazonais.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio do Centro de Impactos Climáticos e Recursos de Adaptação de Ontário (*Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources, OCCIAR*) e do Ministério do Meio Ambiente do Canadá (*Environment Canada*).

REFERÊNCIAS

- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein, A. M. G., et al., 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 111, D05109, pp. 1-22.
- Davidson, E. A., de Araújo, A. C., Artaxo, P., Balch, J. K., Brown, I. F., Bustamante, M. C., et al., 2012. The Amazon basin in transition, *Nature*, vol. 481, n. 7381, pp. 321–328.
- Disch, J., Kay, P., Mortsch, L., 2012. A resiliency assessment of Ontario's low-water response mechanism: implications for addressing management of low-water under potential future climate change, *Canadian Water Resources Journal*, vol. 37, n. 2, pp. 105-123.
- Durack, P. J., Wijffels, S. E., Matear, R. J., 2012. Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000, *Science*, vol. 336, n. 6080, pp. 455-458.
- Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., Black, W., 1998. *Multivariate data analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, and New York.
- Kendall, M. G., 1975. *Rank correlation methods*, Griffin, London, UK.
- Knapp, A. K., Fay, P. A., Blair, J. M., Collins, S. L., Smith, M. D., Carlisle, J. D., et al., 2002. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland, *Science*, vol. 298, n. 5601, pp. 2202-2205.
- Magnuson, J. J., Webster, K. E., Assel, R. A., Bowser, C. J., Dillon, P. J., Eaton, J. G., et al., 1997. Potential effects of climate changes on aquatic systems: Laurentian Great lakes and Precambrian shield region, *Hydrological Processes*, vol. 11, n. 8, pp. 825-871.
- Malhi, Y., Aragao, L. E., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., et al., 2009. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 106, n. 49, pp. 20610–20615.
- Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, vol. 13, pp. 245-259.
- OCCIAR, Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources, 2010. *Climate Change and Conservation Authorities in Northern Ontario, Workshop Report*. OCCIAR, Sudbury.
- Sen, P. K., 1968. Estimates of the regression coefficient ased on kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 63, pp. 1379-1389.
- Vincent, L. A., Gullett, D. W., 1999. Canadian historical and homogeneous temperature datasets for climate change analyses, *International Journal of Climatology*, vol. 19, n. 1, pp. 1375–1388.
- Wang, B., Ding, Q., 2006. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years, *Geophysical Research Letters*, vol. 33, L06711, pp. 1-4.

UNDERSTANDING REGIONAL CLIMATE CHANGE THROUGH THE APPLICATION OF THREE STATISTICAL METHODS

Abstract. *This study assesses the use of historical climate data as well as traditional and non-traditional statistical methods to understand climate change at a regional level. Three different approaches were considered: i) general evaluation of climate data evolution, including comparison between two periods (early and late years); ii) trend analysis; and iii) cluster analysis. Daily data of rainfall and snowfall were obtained from the Sudbury Airport weather station (Canada) from January 1956 to December 2010 (55 full years). The comparison between periods revealed that annual rainfall is increasing in the studied location, being 12% higher in recent years. Trend analysis and cluster analysis showed that these increasing annual trends were not uniform throughout the year, occurring mainly in winter and spring. On the other hand, decreases in summer rainfall were detected by cluster analysis only. According to cluster analysis results, summers are becoming drier in the location, although overall, years are becoming wetter. Regarding snowfall, there was no difference between the two periods compared and trend analysis detected no significant trends. However, cluster analysis showed clear changes during the main months of snowfall (December, January and February), indicating that climate in the location is changing towards late winters regarding snowfall. Thus, the results demonstrate that inclusion of simple methods such as cluster analysis, combined with more traditional statistical methods, can contribute to a better understanding of climate change.*

Key words: *Climate Data, Cluster Analysis, Trend Analysis, Precipitation*