

ESTATÍSTICA DA INSTABILIDADE ATMOSFÉRICA EM TEMPESTADES NA CIDADE DE SÃO PAULOEstella da Silva Jesus^{1*}, Ricardo Hallak²

1. Estudante do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP)
2. Professor Dr. do IAG-USP – Departamento de Ciências Atmosféricas/Orientador

Resumo

As tempestades comuns e severas, com ou sem a presença de granizo à superfície, são frequentes ao redor da Terra. Na cidade de São Paulo, as tempestades de verão causam inúmeros problemas à população, à defesa civil e à administração pública. Neste trabalho, estuda-se a instabilidade atmosférica sob o ponto de vista estatístico, buscando-se diferenciar entre dias com tempestades associadas à observação de granizo à superfície e dias com tempestades, mas sem granizo observado. A metodologia se baseia na análise diagnóstica da física e da estatística de índices de instabilidade calculados entre 2003 e 2020. Os resultados indicam que, para dias em que há a ocorrência de granizo, grande parte dos índices apresenta tendência à distribuição do tipo gaussiana comprovada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Além disso, a aplicação do teste T de Student mostra que as duas amostras de dados (com e sem granizo) provêm de populações de dados distintas, no nível de 5% de significância.

Palavras-chave: meteorologia de mesoescala; convecção atmosférica; índices de instabilidade.

Apoio financeiro: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Introdução

Os índices de instabilidade são derivados de medidas verticais da atmosfera obtidas com as radiossondas lançadas em balões duas vezes ao dia ao redor do planeta pela maior parte das nações. Estas medidas são posteriormente reunidas em centros meteorológicos e disponibilizadas publicamente na internet. A maior parte dos índices de instabilidade atmosférica foi criada com o intuito de prover ao previsor de tempo operacional uma informação imediata sobre as condições atuais atmosféricas para a formação de convecção profunda. A convecção profunda é popularmente conhecida como tempestade. No sentido meteorológico, as tempestades são as nuvens do tipo cumulonimbus, que ocorrem de forma isolada ou aglomerada, e que podem ou não ser consideradas severas de acordo com critérios pré-estabelecidos.

No meio operacional (nos centros de previsão de tempo do dia a dia), apesar das tentativas de se usarem os índices de instabilidade para a previsão antecipada da ocorrência de tempestades, seu valor como indicadores prognósticos de tempestades não resiste a uma abordagem de acurácia estatística (Doswell e Schultz 2006). Entretanto, os variados índices de instabilidade hoje existentes podem ser usados com maior sucesso na análise diagnóstica da estabilidade atmosférica (Hallak e Pereira Filho 2012). Neste trabalho, usam-se os índices de instabilidade atmosférica como parâmetros e variáveis diagnósticas das condições atmosféricas para diferenciar o estado da atmosfera entre dois conjuntos de dados para a cidade de São Paulo: os dos dias de tempestades de verão com observação de granizo à superfície, e os dias de tempestades sem a observação de granizo.

Desde que a queda de granizo à superfície é frequentemente causa de prejuízos materiais em todo o mundo (Raupach et al. 2021), o objetivo deste trabalho é determinar a distribuição de valores de variados índices de instabilidade atmosférica em dias de tempestades com e sem granizo à superfície observadas entre 2003 e 2020 na cidade de São Paulo, e verificar se há distinção estatisticamente significativa nos valores dos índices de instabilidade entre esses dois conjuntos de tempestades.

Metodologia

Dispõe-se de radiossondagens lançadas do aeródromo de Campo de Marte em São Paulo (portal da Universidade de Wyoming-EUA) e registros de granizo à superfície para o período chuvoso (outubro a março) de 01/01/2003 a 31/03/2020 em São Paulo, obtidos pela reunião de observações METAR do Aeródromo de Campo de Marte (Zona Norte de São Paulo), estação meteorológica do IAG/USP, instalada no Parque CIENTEC (Zona Sul de São Paulo) e as observações de granizo relatados pelo Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da cidade de São Paulo (CGE). As diversas análises realizadas nesta pesquisa fazem uso de programação científica a partir das linguagens de programação FORTRAN90 e Python, em plataforma LINUX. A soma total de casos desses três conjuntos de dados é de 155 dias com pelo menos um registro de tempestade com observação de granizo à superfície e 783 dias com tempestades, mas sem a observação de granizo à superfície.

A análise diagnóstica da instabilidade atmosférica para cada um dos dias é efetuada com o auxílio de cálculos computacionais usando-se as medidas obtidas pelas sondagens pontuais verticais da atmosfera. Os principais índices termodinâmicos e cinemáticos calculados nesta pesquisa até o momento são: CAPE (Convective Available Potential Energy - Energia Potencial Disponível para Convecção), CINE (Convective

Inhibition Energy - Energia de Inibição de Convecção), LI (Lifted Index - Índice de Levantamento), IS (Índice de Showalter) e CIS (cisalhamento vertical do vento horizontal entre a superfície e 6 km de altitude). Pelo mesmo diagrama, estima-se a altura da base de nuvem em relação à superfície pelo cálculo do Nível de Condensação por Levantamento (NCL). Além disso, outros índices e variáveis foram calculados, como o Total Totals (TT), índice K e Água Precipitável (PW). As formulações e interpretações desses índices e variáveis são encontradas, por exemplo, em Doswell e Schultz (2006) e referências ali citadas.

A distribuição característica de valores dos índices e variáveis é obtida por meio da construção de histogramas. Dois testes estatísticos de significância foram utilizados para obter conclusões sobre a distribuição de valores das variáveis. O teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) é usado para obter a significância estatística do ajuste da curva gaussiana em cada caso. O teste KS compara a máxima diferença obtida entre a curva de ajuste e os dados no nível de significância escolhido de 5% ($\alpha=0.05$). O teste t de Student é utilizado para avaliar se duas amostras analisadas provêm ou não de uma mesma população. Neste trabalho, objetiva-se determinar se as duas amostras, o conjunto de dias com tempestades com observação de granizo e o conjunto de dias com tempestades sem granizo, apresentam médias amostrais com diferenças significativas para o nível de significância de 5% ($\alpha=0.05$).

Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta os histogramas de frequência relativa com valores dos índices de instabilidade e variáveis atmosféricas, em que os histogramas em preto representam os dias de tempestade com ocorrência de granizo na cidade de São Paulo, e os vermelhos, os dias com tempestade, mas sem observação de granizo, para o período de 01/01/2003 a 31/03/2020. Como a distribuição de CAPE é claramente não gaussiana, não é aplicado o teste KS para esta variável.

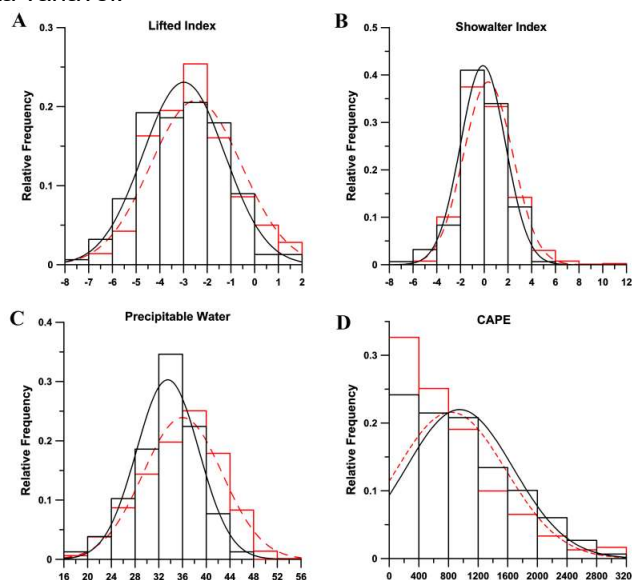


Figura 1: Histogramas de frequências relativas para os valores de (A): Lifted Index ($^{\circ}\text{C}$); (B): Índice de Showalter ($^{\circ}\text{C}$); (C): Água Precipitável (mm) e (D): CAPE (J kg^{-1}). Os histogramas em preto representam os casos registrados de dias com tempestades de granizo e aqueles em vermelho representam os casos dos dias com tempestades sem observação de granizo à superfície para as tempestades observadas entre 01/01/2003 e 31/03/2020 na cidade de São Paulo. As curvas de ajuste representam a distribuição gaussiana para cada variável.

Para os dias com ocorrência de granizo (curvas pretas na Figura 1), os histogramas dos índices LI e SW e da variável PW apresentam tendência evidente à distribuição do tipo gaussiana, confirmada estatisticamente pelo valor do teste KS (Tabela 1). Como exemplo de aplicação, conclui-se que o índice LI ≤ -3.0 ocorrerá em 50% dos eventos de granizo observados na cidade de São Paulo e que cerca de 68% dos casos observados de granizo em superfície apresentam valores de LI aproximadamente entre -4.7 e -1.3 .

Tabela 1: Valores do teste Kolmogorov-Smirnov para os índices de instabilidade e variáveis atmosféricas no nível de significância de 5%. Valores críticos de KS: KS = 0.108 para os dias em que há ocorrência de granizo à superfície e KS = 0.048 para os dias com tempestade sem observação de granizo à superfície.

Índice / Variável	Teste KS (dias com granizo)	Teste KS (dias sem granizo)
Lifted Index	0.046	0.069
Showalter	0.053	0.059
Total Totals	0.057	0.042
K Index	0.104	0.124
NCL	0.079	0.091
Água Precipitável	0.065	0.043

Na Tabela 1, observa-se que os índices e variáveis apresentam valores de KS inferiores ao nível de significância adotado (0.108) para os dias em que há tempestade com ocorrência de granizo à superfície, indicando que os conjuntos de dados testados possuem distribuição do tipo gaussiana com chance de erro muito pequena. Para os dias com tempestade sem a ocorrência de granizo, apenas o índice TT e a variável PW apresentam valores de KS inferiores ao nível de significância de 0.048, apontando que grande parte desta amostra não possui distribuição normal.

A Tabela 2 mostra que, com exceção do K Index, as amostras testadas provêm de populações estatisticamente diferentes. Esta afirmativa é válida, pois os p-valores tendem a zero, indicando que o erro ao aceitar a Hipótese Alternativa é praticamente nulo. Com relação ao K Index, que apresenta um p-valor de 0.604, não fica evidente do ponto de vista estatístico que o índice capture uma diferença de valores para os dois conjuntos de dados, pois a probabilidade de erro ao aceitar a Hipótese Alternativa seria de 60%.

Tabela 2: T-valor e p-valor, referentes ao teste T de Student. Quanto menor o p-valor e quanto maior o t-valor, maior a certeza de que se pode aceitar a Hipótese Alternativa, de que os dois conjuntos de dados de tempestades (com e sem granizo) diferem entre si, sem estar cometendo erro estatístico do Tipo I.

Índice / Variável	t-valor	p-valor
Lifted Index	-3.103	0.002
Showalter	-2.429	0.015
Total Totals	4.935	9.5×10^{-07}
K Index	-0.519	0.604
NCL	-3.787	0.0002
Água Precipitável	-4.444	9.9×10^{-06}
CAPE	1.801	0.071
CINE	2.703	0.007

Como exemplo de aplicação destes resultados, foram selecionados os dias em que as sondagens de Campo de Marte das 1200 UTC indicavam, concomitantemente, $LI < -3,0$, $IS < 0,0$, $TT > 47$ e $PW > 33$ mm. Estes limites são os valores médios obtidos segundo a distribuição gaussiana ajustada em cada caso. Com estes critérios, foram obtidos 32 dias, do total de 155 dias com observação de granizo, que, por hipótese, são aqueles dias com maior instabilidade atmosférica no horário de lançamento da radiossonda, perfazendo um total de aproximadamente 20% dos dias. Desses 32 dias, 19 dias apresentam $CAPE > 1.400 \text{ J kg}^{-1}$, com os demais valores de CAPE ainda altos, e com valor mínimo de 682 J kg^{-1} . Ainda, 27 desses dias apresentam $CINE < -2,0 \text{ J kg}^{-1}$, com média de -43 J kg^{-1} e desvio padrão de -40 J kg^{-1} , o que mostra a importância da inibição de Convecção para os dias de instabilidade mais severa.

Dentro dos critérios para maior instabilidade, selecionou-se, para estudo, o caso do dia 14/01/2015, mostrado na imagem do vapor d'água realçado em cores de acordo com a temperatura do pixel, proveniente do satélite GOES-13 da Figura 2, quando foi observado granizo à superfície próximo às 2200 UTC na cidade de São Paulo. É importante ressaltar que o horário das tempestades de verão fica 6 horas ou mais adiante do horário de lançamento das sondagens e que, por este motivo, é ainda mais notável como os índices e variáveis aqui apresentados já indicam a instabilidade atmosférica com tantas horas de antecedência.

A imagem de satélite da Figura 2 indica a presença de um fenômeno convectivo intenso atuando sobre a cidade de São Paulo com características diferentes em relação ao observado ao seu redor. Grande parte dos fenômenos convectivos observados nos 155 dias em que se registrou granizo em São Paulo é semelhante ao apresentado na imagem da Figura 2. Neste sentido, o valor da mediana igual a 52 do índice Bulk Richardson Number (BRN) (Weisman e Klamp 1986) é indicativo de que estes 32 casos selecionados pelos critérios aplicados acima aproximam-se das características físicas esperadas para supercélula, que é um fenômeno convectivo profundo, de grandes proporções horizontais e verticais, e que, em última análise, são os fenômenos responsáveis por boa parte dos tornados observados nas planícies do centro-oeste americano.

Para São Paulo, devido à ausência de observação frequente de tornados, conclui-se que faltam alguns dos ingredientes necessários para a formação desses fenômenos rotativos violentos e de pequena escala, como a topografia em associação à circulação atmosférica em mesoescala adequados. No entanto, também conclui-se que o ambiente sinótico de verão, com disponibilidade abundante de calor e umidade, em associação às particularidades da superfície da região da cidade de São Paulo e arredores (especificamente a formação da Ilha de Calor Urbano), é bastante favorável à evolução de células convectivas isoladas de dimensões horizontais superiores às células de tempestade comuns ou ordinárias.

Imagem do satélite GOES-13 - Canal do vapor d'água

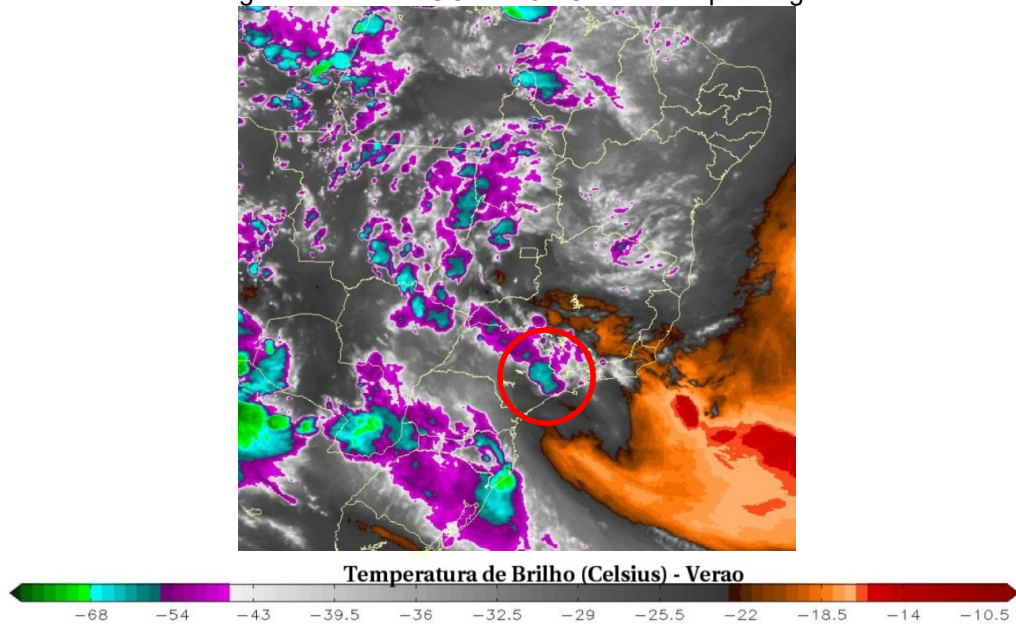


Figura 2: Imagem no canal do vapor d'água, com pixels realçados pela temperatura de acordo com a barra de cores, proveniente do satélite geoestacionário GOES-13 para 14/01/2015 às 2200 UTC. Pixels em tons de cinza indicam a superfície. A temperatura de brilho está associada com a altitude do objeto observado pelo satélite em cada pixel. Quanto menor a temperatura, maior a altitude. Dessa forma, pixels coloridos indicam altitude de nuvem. O círculo em vermelho destaca o sistema convectivo profundo na cidade de São Paulo. Fonte: DSA/CPTEC/INPE.

Conclusões

Para os índices de instabilidade e as variáveis atmosféricas derivadas das sondagens do Aeródromo de Campo de Marte, os eventos estudados mostram alguns padrões de recorrência que podem ser destacados e enumerados a seguir:

1. Para dias em que há a ocorrência de granizo à superfície, os índices de instabilidade atmosférica LI, IS, TT e as variáveis NCL e PW apresentam tendência à distribuição do tipo gaussiana, comprovada pelo teste estatístico de aderência de Kolmogorov-Smirnov para um nível de significância $\alpha=0.05$. Entretanto, para dias com tempestade sem a ocorrência de granizo à superfície, apenas TT e PW apresentam uma distribuição normal comprovada pelo teste KS;
2. Os índices LI, IS e TT e as variáveis NCL, PW, CAPE e CINE apresentam diferenças estatisticamente significativas de valores para dias com tempestade de granizo e dias com tempestade sem a ocorrência de granizo, conforme resultados obtidos com o teste T de Student. Neste caso, conclui-se que as duas amostras provêm de populações distintas (condições atmosféricas diferentes);
3. Selecionando-se os dias com valores abaixo dos valores médios de LI, IS TT e PW, de acordo com as suas distribuições gaussianas, foi possível identificar 32 dias que apresentam características de supercélulas convectivas, destacando a severidade desses fenômenos.

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se a possibilidade do uso dos índices de instabilidade para treino de modelos de inteligência artificial e aprendizado de máquina, visando-se obter previsões de tempestades de granizo ou tempestades severas na cidade de São Paulo. Testes iniciais com os modelos K Nearest Neighbor (KNN), Support Vector Machine (SVM) e Redes Neurais apontam para um índice de acurácia em torno de 75% para a previsão de tempestades, quando se treinam os algoritmos com os índices de instabilidade sinalizados para os dias com tempestades de verão de todos os tipos em São Paulo entre 2003 e 2020, ante os dias sem observação de tempestades no mesmo período.

Referências bibliográficas

- Doswell, C. A., III, Schultz, D. M., **2006**: On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *Electronic J. Severe Storms Meteor.*, v. 1(3), p. 1-22.
- Hallak, R., Pereira Filho, A. J., **2012**: Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos de mesoescala na região metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. *Rev. Bras. Meteorologia*, v.27, n.2, 173-206.
- Raupach, T. H., Martius, O., Allen, J. T., Kinz, M., Lasher-Trapp, S., Mohr, Susanna, Rasmussen, K. L., Trapp, R. J., Zhang, Q., **2021**: The effects of climate change on hailstorms. *Nature Reviews Earth & Environment* 2(3), 14 pp., <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9>.
- Weisman, M. L., Klemp, J. B., **1986**: Characteristics of isolated convective storms. In: *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. Ed. Peter S Ray, American Meteorological Society, 331-358.