

Edição Especial

Análise de sinais de alerta antecipados durante a ocorrência de fenômenos atmosféricos extremos em diferentes sítios experimentais da Amazônia

Analysis of early warning signals during the occurrence of extreme atmospheric phenomena in different experimental sites in the Amazon

Francisco Otavio Miranda^I, Bruno Coelho Bulcão^{II},
Cléo Quaresma Dias Júnior^{III}, Antônio Ocimar Manzi^{IV},
Cledenilson Mendonça de Souza^V

^I Universidade do Estado do Amazonas, Parintins, AM, Brasil

^{II} Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil

^{III} Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Belém, PA, Brasil

^{IV} Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

^V Universidade Federal do Amazonas, Parintins, AM, Brasil

RESUMO

Foram investigados fenômenos atmosféricos extremos que se manifestam na forma de variações abruptas na velocidade do vento e na temperatura. Durante a ocorrência dessas variações e com o uso do método de Sinais de Alerta Antecipados (SAA), é possível a detecção da transição entre dois regimes de turbulência na Camada Limite Noturna (CLN). Os testes foram realizados tendo como variável de estado a temperatura potencial. Como resultado, foi possível identificar casos de fenômenos atmosféricos extremos que ocorreram nos três sítios investigados, além disso detectou-se a ocorrência de SAA na CLN amazônica.

Palavras-chave: Camada limite noturna; Atmosfera tropical; Sinais de alerta antecipados

ABSTRACT

Extreme atmospheric phenomena that manifest in the form of abrupt variations in wind speed and temperature were investigated. During the occurrence of these variations and with the use of the early warning signals (EWS) method, it is possible to detect the transition between two turbulence regimes in the nocturnal boundary layer (NBL). The tests were performed with the potential temperature as the state variable. As a result, it was possible to identify cases of extreme atmospheric phenomena that occurred in the three investigated sites.

Keywords: Nocturnal boundary layer; Tropical atmosphere; Early warning signals

1 INTRODUÇÃO

Descobertas recentes têm mostrado que, em muitas áreas do conhecimento e em muitos casos, é possível prever a iminência da ocorrência de processos complexos emergentes, os quais são potenciais geradores de fenômenos associados a uma alta variabilidade na concentração de escalares à superfície. Até este momento, as relações entre fenômenos atmosféricos extremos, que se manifestam na forma de picos na velocidade do vento (Miranda, Sá, Randow, Ramos, & Manzi, 2020b), queda de temperatura, aumento de pressão e aumento da variabilidade de escalares, têm sido exploradas, principalmente quando eles surgem em processos atmosféricos reais, como precursoras de fortes eventos convectivos noturnos. Ou seja, sinais ou padrões que antecedem a ocorrência de alterações bruscas no estado físico da atmosfera, os quais podem aparecer em séries temporais inerentes aos fenômenos em estudo (Dakos et al. 2008, 2012).

Neste caso particular, trata-se de séries de dados ambientais turbulentos medidos em torre meteorológica acima da floresta Amazônica, as quais seriam potencialmente capazes de indicar a iminência da ocorrência de um fenômeno dessa natureza. A condição necessária para isso é de que o regime de turbulência existente tenha passado por uma transição entre diferentes estados característicos, como os descritos por Sun, Mahrt, Banta e Pichugina (2012) e Acevedo et al. (2016), transformando-se em um regime especial de turbulência atmosférica, que pode ser observado pouco antes da eclosão de forte atividade convectiva, como descrito por Farias (2017). Tais características precursoras peculiares já foram estabelecidas por vários autores que estudaram distintos processos envolvendo séries temporais, conforme já mencionado. Por exemplo, Dakos et al. (2008, 2012) e Lenton et al. (2011, 2012), entre outros, estabeleceram uma sequência de critérios que devem ser satisfeitos ao se processarem séries temporais, de modo a indicar se elas são capazes ou não de gerar categorias de elementos previsoires. Entre os principais critérios estabelecidos, estão o

aumento da função autocorrelação e aumento da variância da série temporal. Quando esses critérios são satisfeitos para certas grandezas particulares, essas grandezas que compõem a série temporal são chamadas de “variáveis de estado” (indispensáveis para efetivar a previsão da ocorrência de processos complexos emergentes, como a transição entre regimes atmosféricos distintos).

No presente estudo, o procedimento de Dakos et al. (2008, 2012) foi aplicado a dados turbulentos medidos antes da eclosão de fortes valores máximos (ou mínimos) relativos, envolvendo oscilações em variáveis de estado. Nesses casos, para se identificar padrões precursoros em processos atmosféricos que estejam associados a padrões de variabilidade em séries temporais, é necessária a obtenção de uma variável turbulenta que, além de ser sensível às mudanças sofridas nos modos normais de variabilidade dos sinais (as quais surgem em decorrência da aproximação da transição entre dois estados atmosféricos distintos), também possa fornecer as melhores condições para a caracterização do fenômeno inerente.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Sítios e Dados

Utilizaram-se dados de três sítios experimentais (Caxiuanã, Cuieiras e Uatumã) localizados em região de floresta tropical em período (preferencialmente) chuvoso e com medições disponíveis. Em todos os sítios utilizados e em diferentes anos, foram registradas ocorrências de fenômenos que guardam características semelhantes às daquelas de interesse nesse estudo. Referente a Caxiuanã: utilizaram-se dados medidos durante o experimento “Circulações de Mesoescala no Leste da Amazônia” (CiMeLA), que correspondem aos meses de outubro, novembro e dezembro do ano de 2003. Quanto a Cuieiras: as medidas utilizadas correspondem ao ano de 2013 (janeiro, fevereiro, março, abril e maio) e 2014 (março, abril e maio), as últimas realizadas

durante as campanhas experimentais do projeto GoAmazon 2014/15. Já quanto a Uatumã: utilizaram-se dados medidos no sítio *ATTO Tower* durante a estação chuvosa do ano de 2014, correspondendo aos meses de janeiro, fevereiro, março e abril. Foram utilizadas séries temporais turbulentas de componentes horizontais e verticais da velocidade do vento e da temperatura, medidas nas frequências de 10, 16 e 20 Hz, respectivamente, com um anemômetro 3-D (modelo CSAT3, *Campbell Scientific Inc.*, Logan, UT) a uma altura de 60 m para o Sítio Caxiuanã, 48,15 m para o Sítio Cuieiras e 46 m para o Sítio Uatumã.

2.2 Métodos

Utilizou-se como ponto de partida os métodos da “caixa de ferramentas” de sinais de alerta (SAA) para detectar transições críticas em séries temporais, fornecida por Dakos et al. (2012). Esse pacote fornece procedimentos estatísticos a serem aplicados a séries temporais medidas na região onde os sinais precursores se manifestam. Para este trabalho, foi utilizada uma série temporal com dados de aproximadamente 1,5 hora antes da ocorrência do PE. O ponto de ruptura para os testes de SAA foi identificado similar ao do estudo realizado por Miranda et al. (2020a). Embora outros testes para verificação do SAA estejam disponíveis, a verificação da aplicabilidade do método se limitará à verificação de aumento consistente nos valores da função autocorrelação e aumento na variância associados a uma variável de estado, que para estes casos particulares é a temperatura potencial.

3 RESULTADOS

3.1 Ocorrência de fenômenos extremos (FEs) em diferentes sítios experimentais

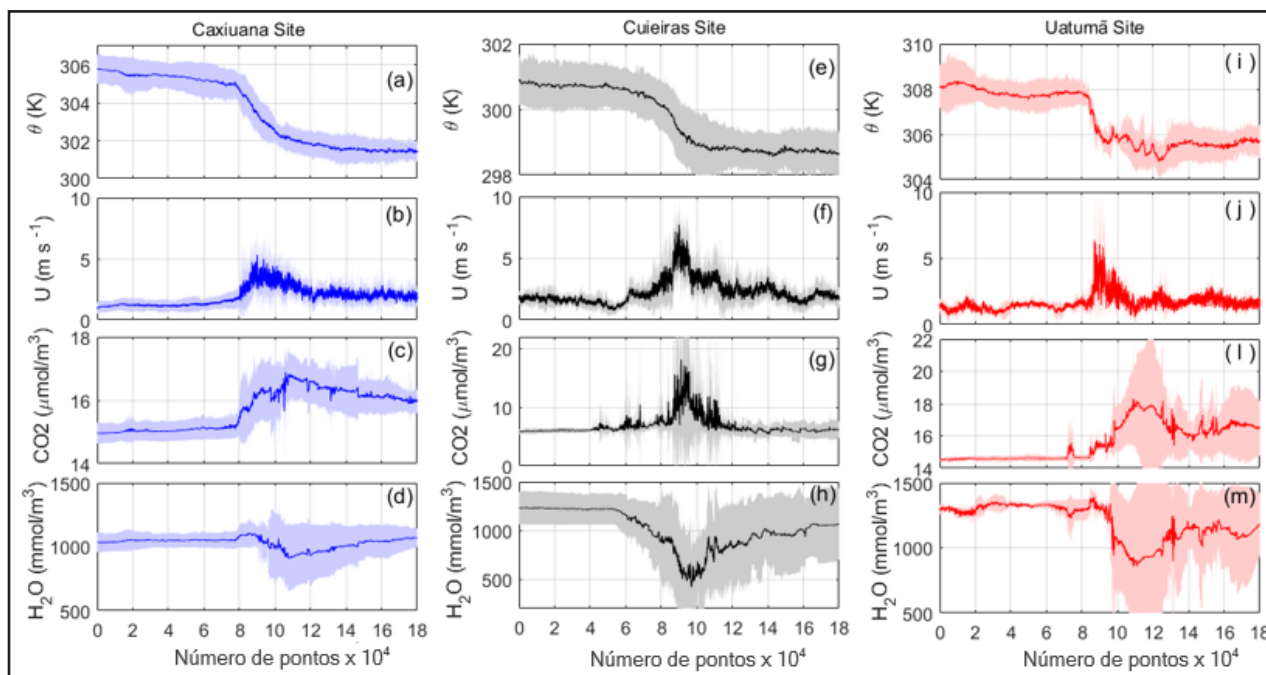
Caxiuanã: Foi possível verificar uma relação entre queda de temperatura e aumento na velocidade do vento em nove casos identificados, sendo esses nos dias 1,

3, 10, 14, 15, 17, 30 de novembro e 3 e 6 de dezembro do ano de 2003. A particularidade desses casos verificados no sítio de Caxiuanã, projeto CiMeLa, é que todos ocorreram nas primeiras horas da noite, não tendo sido identificado nenhum caso para o período após a 0h local. Os valores médios desses casos são mostrados na Figura 1 (a até d).

Cuieiras: Foram verificados oito casos de FEs nos quais também se notam os mesmos padrões para temperatura, velocidade do vento, aumento de concentração de CO₂ e redução na concentração de vapor d'água, cujas médias são mostradas na Figura 1 (e até h). Os dias nos quais identificaram-se FEs para o sítio do Cuieiras foram 23 de fevereiro, 24 de março e 2 e 4 de maio no ano de 2013 e 24 de março, 13 e 21 de abril e 16 de maio do ano de 2014. **Uatumã – projeto ATTO:** apenas quatro casos foram utilizados, sendo esses nos dias 6 de janeiro, 31 de março, 9 e 13 de abril de 2014, cujas médias correspondentes são mostradas na Figura 1 (i até m). Um número bem maior de casos de FEs foram identificados, nos quais notaram-se variabilidades simultâneas nas medidas. Observa-se que por se tratar de médias de vários casos que ocorreram em horários distintos, os resultados serão representados por número de pontos (no eixo x das Figuras 1 e 2) e não pela hora local.

Na Figura 1 são mostrados os valores médios para os casos em que foram identificadas variações simultâneas nas séries temporais, cujos padrões semelhantes foram utilizados para caracterizar a ocorrência de um fenômeno atmosférico intenso na atmosfera tropical. Nesta constam as médias para queda de temperatura, aumento simultâneo na velocidade do vento médio, aumento na média da concentração de carbono e redução nas médias da concentração de vapor d'água. As medidas foram realizadas no sítio do Caxiuanã durante a realização do projeto CiMeLa no ano de 2003 (de a até d, na Figura 1), no sítio do Cuieiras nos anos de 2013 e 2014 (de e até h) e no sítio do Uatumã (de i até m).

Figura 1 – Valores médios para séries temporais medidas nos três sítios experimentais



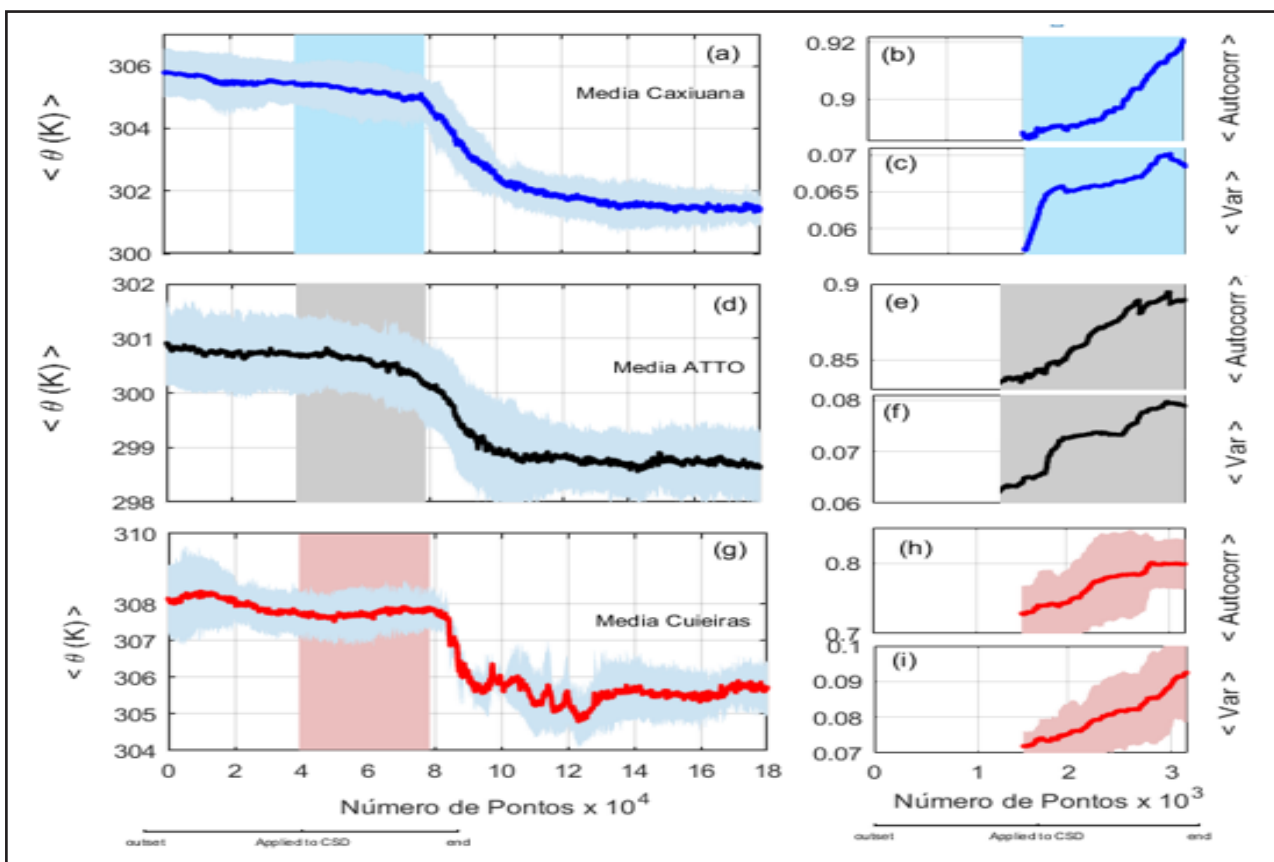
Fonte: Autores

3.2 Análise de transição entre dois estados atmosféricos distintos

Para cada sítio foram detectados os SAA de interesse, utilizando-se a temperatura potencial como variável de estado, sendo estes 4 casos ocorridos no ATTO no ano de 2014, 8 casos no sítio do Cuieiras nos anos de 2013 e 2014 e 9 casos no sítio de Caxiuanã no ano de 2003. A maioria dos casos foram verificados durante a estação chuvosa da região. As tendências de aumento nos valores da função autocorrelação e da variância para casos que ocorrem em diferentes sítios da Amazônia indicam que é possível identificar casos de SAA para diversas situações que ocorrem na atmosfera tropical, como os fenômenos atmosféricos extremos que se manifestam na forma picos na velocidade do vento, queda na temperatura e demais variações de escalares mostrados na Figura 1. A Figura 2, mostra as médias da temperatura potencial e as médias de SAA correspondentes, em que as tendências de aumento das funções autocorrelação e variância podem ser observadas. Nos casos apresentados, a linha

contínua mostra a média da temperatura (a, d, g) e a região sombreada representa o desvio da média. A região entre os pontos outset e end é o trecho da série utilizada para análise de SAA.

Figura 2 – Valores médios de *critical slowing down* (CSD) para temperatura como variável de estado, em que são verificadas tendências crescentes da função autocorrelação e tendência crescente da variância para a média de casos estudados no sítio de Caxiuana (a, b, c), ATTO (d, e, f) e Cuieiras (g, h, i)



Fonte: Autores

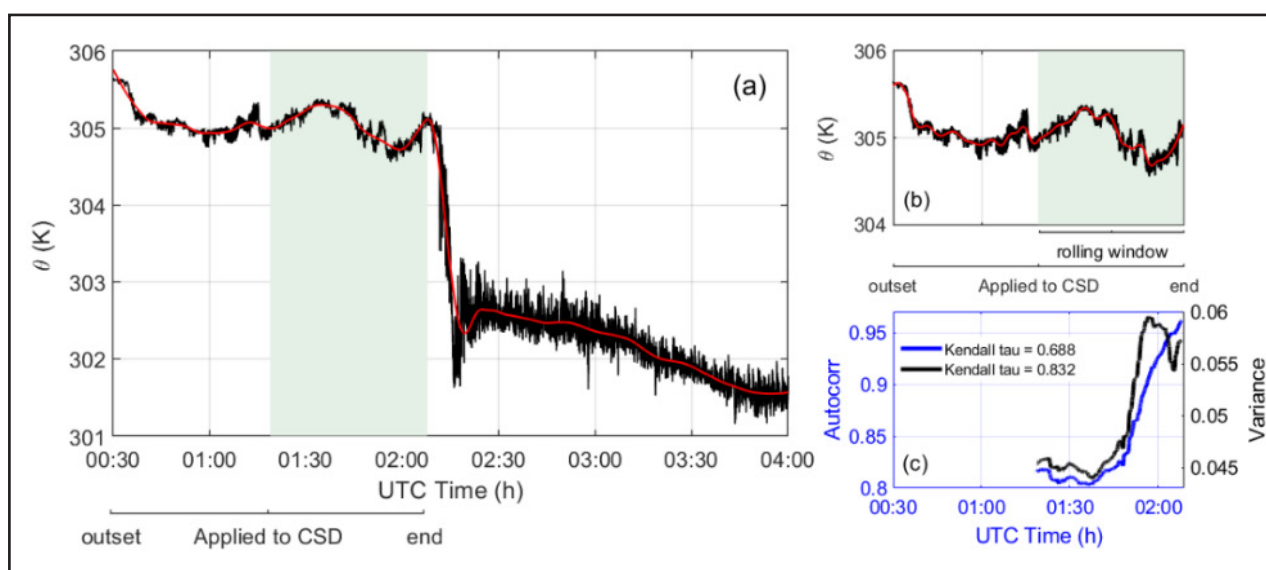
3.3 Estudo de caso para cada sítio

Observe que os resultados médios da Figura 2 indicam claramente as tendências crescentes da função autocorrelação e da variância, no entanto a robustez do resultado não fica evidente nesses valores médios. Por esse motivo, foi realizada uma análise de caso para cada um dos sítios, na qual se pode verificar com mais clareza

que há um processo de transição entre dois estados qualitativamente distintos. Para a atmosfera tropical, já foi identificada a existência deste tipo de transição na presença de convecção profunda para o sítio do Cuieiras (Miranda et al., 2020a). Estes resultados mostram, no entanto, que é possível identificar estas transições também para outros sítios da Amazônia e com uma robustez significativa, com pode ser observado pelos indicadores *Kendall Tau* nas Figuras 3, 4 e 5.

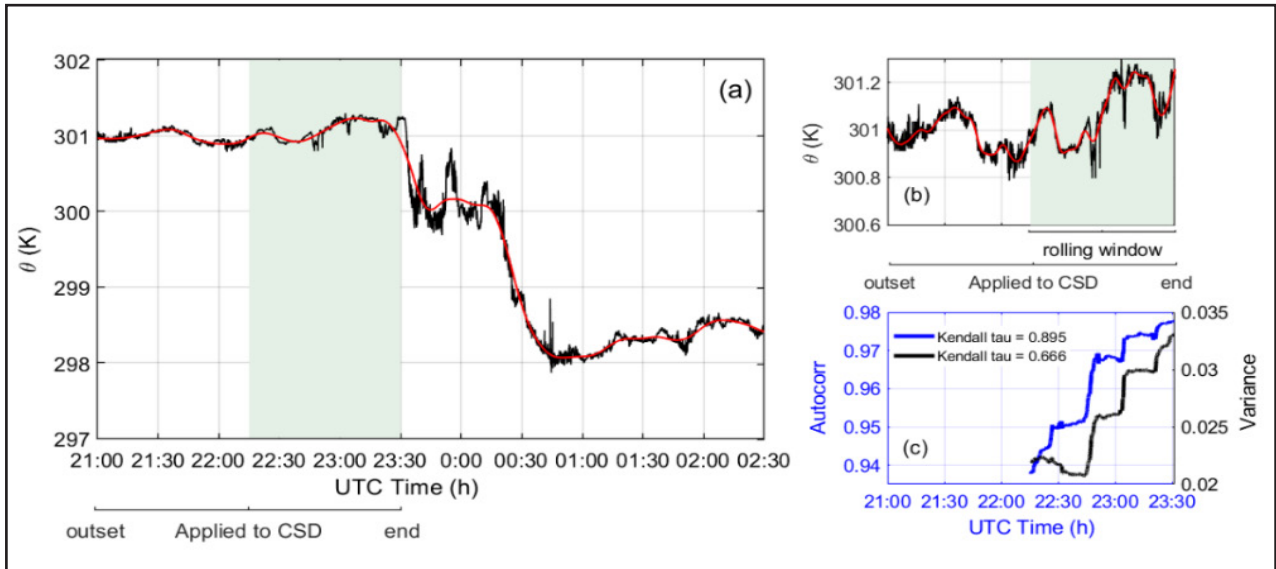
Com isso observa-se que é possível identificar casos de SAA para outros sítios experimentais da Amazônia. O importante agora é verificar se estes casos apresentam o mesmo índice de variabilidade de fluxos de escalares à superfície e de transição entre regimes de turbulência que foi identificado por Miranda et al. (2020a). Para esses estudos, a mesma quantidade casos de SAA identificados (vinte e um) foram testados visando identificar falsos positivos, em que as tendências de aumentos da função autocorrelação e da variância podem acontecer sem necessariamente haver uma transição iminente. No entanto, em nenhum dos casos foi verificado um falso positivo.

Figura 3 – Caxiuana: Dia 15 de novembro de 2003, em que constam: (a) Série temporal de temperatura Potencial, (b) Intervalo utilizado nos testes de SAA (*applied to EWS*) e (c) Tendência crescente da função autocorrelação e variância



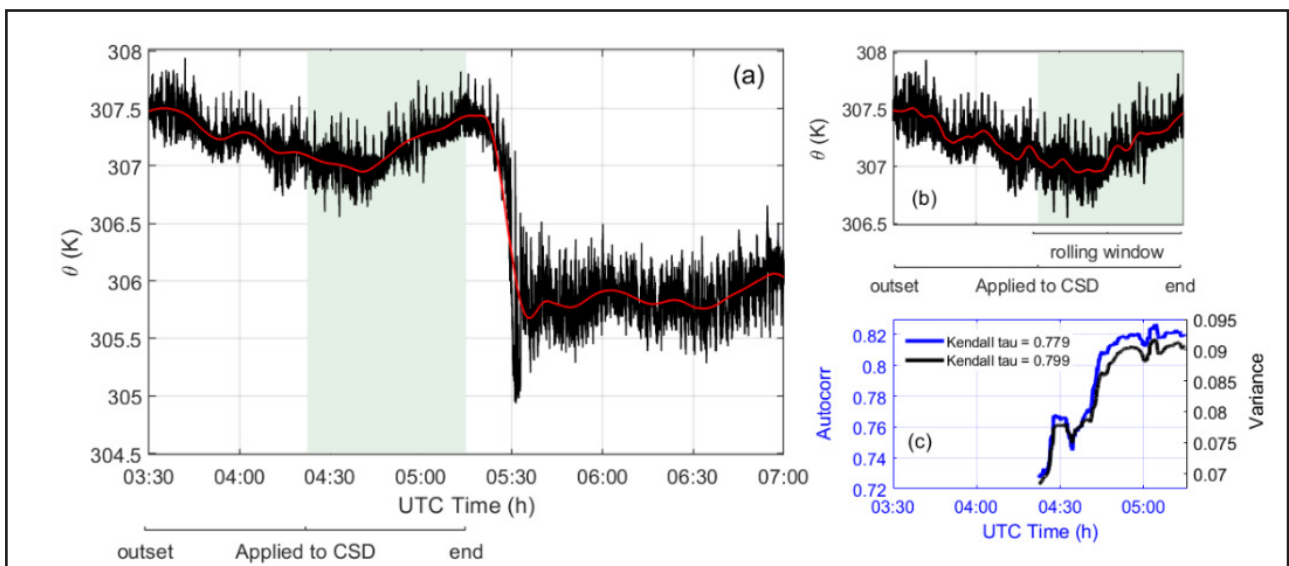
Fonte: Autores

Figura 4 – Cuieiras: Dia 2 de maio de 2013, em que constam: (a) Série temporal de temperatura Potencial, (b) Intervalo utilizado nos testes de SAA (*applied to EWS*) e (c) Tendência crescente da função autocorrelação e variância



Fonte: Autores

Figura 5 – Uatumã: Dia 31 de março de 2013, em que constam: (a) Série temporal de temperatura Potencial, (b) Intervalo utilizado nos testes de SAA (*applied to EWS*) e (c) Tendência crescente da função autocorrelação e variância



Fonte: Autores

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Investigaram-se fenômenos atmosféricos extremos que se manifestam na forma de picos na velocidade do vento, queda na temperatura, nos quais transições noturnas entre dois de regimes turbulentos atmosféricos distintos podem ser identificadas pelos métodos de SAA. Como resultado, foi possível encontrar situações em que comprovadamente detectou-se ocorrência de SAA na camada limite noturna acima da floresta amazônica, para diferentes sítios experimentais. Detectou-se também que a variável de estado mais adequada para se verificar os SAA nas condições aqui utilizadas foi a temperatura potencial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro para estudos de campo do U.S. Department of Energy (concessão SC0011075), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) e da FAPESP (Processo nº 2013/50529-8) e da The Large escala Experimento Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA). Francisco O. Miranda agradece à Universidade do Estado do Amazonas pelo apoio financeiro [PORTARIA Nº 086/2021 - GR/UEA].

REFERÊNCIAS

- Acevedo, O. C., Mahrt, L., Puhales, F. S., Costa, F. D., Medeiros, L. E. & Degrazia, G. A. (2016). Contrasting structures between the decoupled and coupled states of the stable boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(695), 693-702.
- Dakos, V., Scheffer, M., van Nes, E. H., Brovkin, V., Petoukhov, V., & Held, H. (2008). Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(38), 14308-14312.
- Dakos, V., Carpenter, S. R., Brock, W. A., Ellison, A. M., Guttal, V., Ives, A. R., ... & Scheffer, M. (2012). Methods for detecting early warnings of critical transitions in time series illustrated using simulated ecological data. *PloS one*, 7(7), e41010.
- Farias, F. O. M. (2017). *Detecção de fenômenos extremos na camada limite atmosférica noturna acima da floresta Amazônica a partir da análise de sinais precursoros* (Tese de Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Brasil.

- Lenton, T. M. (2011). Early warning of climate tipping points. *Nature Climate Change*, 1(4), 201-209.
- Lenton, T. M., Livina, V. N., Dakos, V., Van Nes, E. H., & Scheffer, M. (2012). Early warning of climate tipping points from critical slowing down: comparing methods to improve robustness. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 370(1962), 1185-1204.
- Miranda, F. O., Ramos, F. M., von Randow, C., Dias-Júnior, C. Q., Chamecki, M., Fuentes, J. D., Manzi, A. O., Oliveira, M. E. de & de Souza, C. M. (2020a). Detection of extreme phenomena in the stable boundary layer over the Amazonian Forest. *Atmosphere*, 11(9), 952.
- Miranda, F. O., Sá, L. D. de A., Randow, C. von, Ramos, F. M., & Manzi, A. O. (2020b). Wind speed peaks and their relationship with the increase of scalar flows in the tropical night atmosphere: a case study. *Ciência E Natura*, 42, e12.
- Sun, J., Mahrt, L., Banta, R. M., & Pichugina, Y. L. (2012). Turbulence regimes and turbulence intermittency in the stable boundary layer during CASES-99. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(1), 338-351.

Contribuições de Autoria

1 – Francisco Otavio Miranda

Doutor em Clima e Ambiente

<https://orcid.org/0000-0002-4724-5975> • ffarias@uea.edu.br:

Contribuição: Conceitualização, Análise formal, Redação – revisão e edição

2 – Bruno Coelho Bulcão

Graduado em Física; Aluno de Mestrado em Meteorologia

<https://orcid.org/0009-0005-8224-8038> • brunobulcao1994@gmail.com

Contribuição: Análise formal

3 – Cléo Quaresma Dias Junior

Doutor em Clima e Ambiente

<https://orcid.org/0000-0003-4783-4689> • cleo.quaresma@ifpa.edu.br

Contribuição: Redação – revisão e edição

4 – Antônio Ocimar Manzi

Doutor em Física da Atmosfera

<https://orcid.org/0000-0002-4860-6031> • antonio.manzi@inpe.br

Contribuição: Análise formal, Redação – revisão e edição

5 - Cledenilson Mendonça de Souza

Doutor em Clima e Ambiente

<https://orcid.org/0009-0007-9623-0757> • cledenilsonms@gmail.com

Contribuição: Escrita – Primeira Redação e análise de dados

Como citar este artigo

Miranda, F. O., Bulcão, B. C., Dias Júnior, C. Q., Manzi, A. O., & Souza, C. M. de. (2023) Análise de sinais de alerta antecipados durante a ocorrência de fenômenos atmosféricos extremos em diferentes sítios experimentais da Amazônia. *Ciência e Natura*, 45(n. esp. 2), e75415. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X75415>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/75415>. Acesso em: dia mês abreviado ano.