

Avaliação dos Índices Termodinâmicos na Previsibilidade de Chuvas em Belém-PA: o Uso Alternativo de Sondagens Atmosféricas por Satélite

Evaluation of Thermodynamic Indexes in Rainfall Prediction in Belém-PA: The Alternative Use of Atmospheric Surveys by Satellite

Leticia Karyne da Silva Cardoso¹ , Nilzele de Vilhena Gomes Jesus² ,
Ludmila Monteiro da Silva¹  & Alen Costa Vieira² 

¹Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Meteorologia, Belém, PA, Brasil

²Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia, Centro Regional de Belém, Brasília, DF, Brasil

E-mails: leticiaskardoso@gmail.com; nilzele.jesus@sipam.gov.br; ludmila@ufpa.br; alen.vieira@sipam.gov.br

Autor Correspondente: Leticia Karyne Cardoso; leticiaskardoso@gmail.com

Resumo

O desenvolvimento da convecção úmida está diretamente relacionado com as condições termodinâmicas de uma região, principalmente nas regiões tropicais. Portanto, esse trabalho tem como objetivo analisar os índices termodinâmicos provenientes de dados dos perfis verticais atmosféricos estimados pelos satélites NOAA-18 e NOAA-19 na previsibilidade de chuva para a cidade de Belém, PA. A metodologia consistiu na análise estatística de índices termodinâmicos utilizados na previsão de tempo à curto prazo, calculados a partir da tabela de contingência. Os índices analisados foram: CAPE, índice K, índice TT e índice de Levantamento (ILEV), e o período de estudo foi de dezembro de 2015 a novembro de 2016. Os resultados encontrados mostraram que o melhor índice termodinâmico para prognóstico de precipitação foi o índice K, em geral, com cerca de 80% de percentual de acerto para o período chuvoso (dezembro a maio). Porém, o mesmo índice não foi satisfatório para o período menos chuvoso, indicando altos índices de falso alarme para este período (junho a novembro). O ILEV e CAPE não obtiveram um resultado adequado para a previsão de chuva para a cidade de Belém, sendo considerados insatisfatórios para a previsão de curto prazo. Portanto, as sondagens oriundas dos sensores orbitais servem como uma ferramenta alternativa para a área operacional, tendo em vista que o índice K, dentre todos os índices termodinâmicos, foi o mais eficiente na previsibilidade de chuva para o período chuvoso da cidade de Belém, PA.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Precipitação; Termodinâmica

Abstract

The development of moist convection is directly related to the thermodynamic conditions, especially in tropical regions. Therefore, this work aimed to analyze thermodynamic indices from estimated data of the vertical atmospheric profile of the NOAA-18 and NOAA-19 satellites for the rain predictability for the Belém – PA city. The methodology consisted of the statistical analysis of thermodynamic indices used in the short-term weather forecast, calculated from the contingency table. The indexes analyzed were: CAPE, K index, TT index and Lifted index (ILEV), and the study period was from December 2015 to November 2016. The results showed that the best thermodynamic index for the prognosis of precipitation was the K index, in general, with about 80% of the correctness percentage for the rainy period (December to May). However, the same index was not satisfactory for the less rainy period, indicating high false alarm rates for this period (June to November). ILEV and CAPE did not obtain an adequate result for the forecast of rain for the Belém which was considered unsatisfactory for the short-term forecast. Therefore, soundings from orbital sensors serve as an alternative tool for the operational area, considering that the K index, among all thermodynamic K indices, was the most efficient in predicting rain for the rainy season in the city of Belém – PA.

Keywords: Remote sensing; Precipitation; Thermodynamics

1 Introdução

A Amazônia é uma das regiões de maior atividade convectiva do planeta, sendo assim, uma enorme fonte de umidade e calor, que são importantes para os diversos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na interação biosfera-atmosfera local e de regiões remotas. Então, sob o ponto de vista climatológico, ter o conhecimento dos diversos processos envolvidos nessa interação é fundamental para a previsão do tempo e para a tomada de decisão sobre as políticas públicas mais adequadas para minimização de impactos causados por mudanças no tempo e no clima.

A respeito dos sistemas meteorológicos que atuam sobre a Amazônia, em especial na Amazônia Oriental, vale destacar a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a qual é o principal sistema atmosférico que promove chuvas na região (Cohen, Silva Dias & Nobre 1995; Frierson et al. 2013; Molion & Bernardo 2002; Moura & Aimola 2016). Além da ZCIT, existem outros sistemas meteorológicos precipitantes, de escala sinótica, causadores de chuva nessa região, como é o caso da borda do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) (Kousky & Gan 1981; Ramirez, Kayano & Ferreira 1999; Reboita et al. 2010) e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) (Barbosa 2005; Coutinho & Fisch 2007; Espinoza 1999). Esses sistemas meteorológicos são fundamentais para a qualidade do período chuvoso da Amazônia Oriental. Contudo, resalta-se os sistemas de escalas menores (mesoescala) que também contribuem para a formação de chuva, como as Linhas de Instabilidades (Cohen, Silva Dias & Nobre 1995) e brisa marítima (Kousky 1980; Machado et al. 2004).

Uma das principais características da região Amazônica é a presença de duas estações do ano bem definidas, mas que apresentam variações, de uma sub-região para a outra nas suas datas de início e fim. Com o foco na cidade de Belém-PA, segundo Marengo et al. (2001) o período chuvoso abrange os meses de dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e maio (DJFMAM) e o período menos chuvoso os meses de junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro (JJASON). As precipitações máximas coincidem com a época da estação de verão austral, no entanto, a radiação solar recebida no topo da atmosfera numa região próxima ao Equador varia muito pouco ao longo do ano. A umidade disponível na coluna de ar varia ao longo do ano devido na época seca existir subsidência, ou seja, devido ao fator dinâmico. Outro fator de grande escala importante para a ocorrência de chuva nesta região é a proximidade da ZCIT na qual os movimentos verticais ascendentes são fundamentais para a formação de nuvens convectivas.

Na cidade de Belém, o máximo de chuva ocorre no mês de março com média mensal de 450 mm. Enquanto que, segundo INMET (2017), os menores acumulados mensais de precipitação, abaixo de 200 mm, ocorrem nos meses de junho a novembro, decorrente dos efeitos locais e de sistemas meteorológicos de mesoescala.

Por conta da atuação de diversos sistemas meteorológicos, o uso de dados observacionais é de extrema importância à pesquisa meteorológica. Porém, devido à grande extensão territorial da Amazônia e o difícil acesso às áreas remotas da região, a manutenção de instrumentos convencionais é complexa, resultando num número de estações terrestres e de altitude insuficiente para suprir a necessidade de dados. A exemplo tem-se o estado do Pará, que possui 144 municípios e em apenas dois destes há Estação Meteorológica de Altitude (EMA), Belém e Santarém, com observações às 0000 Z e 1200 Z. A baixa densidade (espacial e temporal) de observações de altitude compromete a qualidade da análise e previsão do tempo de curto e médio prazo, tanto na análise do meteorologista quanto nos resultados dos modelos numéricos de previsão de tempo, que necessitam destes dados observados como condição inicial para sua execução.

Para contornar estas dificuldades, a utilização de sensores do tipo sondadores instalados em plataformas orbitais tornou-se uma alternativa viável, econômica e que permite a maior cobertura espacial e resolução temporal. Os satélites de órbita polar da série *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA) possuem sensores do tipo sondadores, conhecidos por *Advanced TIROS Operational Vertical Sounder* (ATOVS), capazes de traçar perfis verticais de temperatura ao longo de suas trajetórias. A sondagem vertical obtida por meio de satélites apresenta características vantajosas para sua utilização operacional, não apenas pelo baixo custo, mas, principalmente, pela densidade de pontos que pode cobrir. Alves, Rocha & Lopes (2015) e Li et al. (2000) verificaram que os dados das sondagens satelitais do ATOVS se mostraram coerentes com as medições convencionais.

Por outro lado, os índices de instabilidade são usados para avaliar se a atmosfera é estável ou instável. E segundo Benetti & Silva Dias (1986), tais índices podem ser determinados como parâmetros numéricos objetivos, capazes de estabelecer uma relação de ocorrência de tempestades e a circulação de meso ou grande escala nas quais são imersas, e utilizam os perfis verticais de temperatura, vento e umidade do ar para prognosticá-las. Já Pinheiro, Escobar & Andrade (2014), empregaram uma ferramenta objetiva, com a combinação dos índices de instabilidade, para a previsibilidade de tempo severo em

ambiente operacional, na qual elabora cartas que indicam regiões propensas a nebulosidade, pancadas de chuvas com trovoadas, tempestades e até ocorrência de granizo, tal ferramenta foi implementada na rotina operacional do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (CPTEC/INPE).

Portanto, estes índices indicam as condições da estrutura termodinâmica vertical da atmosfera, permitindo uma análise ampla da formação da convecção úmida e consequente precipitação. Neste contexto, estudos têm sido feitos para avaliar o desempenho dos índices de instabilidade na previsibilidade de chuvas, principalmente de eventos extremos, na região tropical utilizando os dados de radiossondagens convencionais (Gille & Mota 2014; Oliveira & Oyama 2009; Tavares & Mota 2012). Como exemplo, se tem o trabalho de Santos, Mota & Rocha (2014), os quais utilizaram uma climatologia da Energia Potencial Disponível para a Convecção (CAPE), para verificar a possibilidade da ocorrência de convecção e associando esse índice a eventos extremos de precipitação em Belém-PA. Os resultados mostraram, que a CAPE não é condição suficiente para a formação de nuvens e, consequentemente, de precipitação, pois há outras forçantes de meso e grande escala que contribuem decisivamente para a modulação do clima da cidade.

Então, sob o ponto de vista operacional, é de fundamental interesse verificar se as sondagens estimadas

por sensores orbitais possuem representatividade e veracidade em suas medições, e paralelamente, é válido verificar se os índices de instabilidade apresentam um bom desempenho na previsibilidade de chuvas. Portanto, o objetivo deste estudo é analisar a eficácia dos índices termodinâmicos, obtidos a partir de sondagens atmosféricas satelitais, na previsão de chuvas na cidade de Belém, PA.

2 Material e Métodos

2.1 Local de Estudo

O estudo foi realizado para a cidade de Belém, PA, no período de dezembro de 2015 a novembro de 2016. Primeiramente, foram estabelecidas as coordenadas geográficas para o satélite orbital identificar a cidade de Belém (Figura 1), equivalentes a latitude de $1,34^{\circ}\text{S}$ e longitude de $48,43^{\circ}\text{W}$, as quais correspondem as coordenadas da estação meteorológica de superfície convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para que as sondagens, estimadas por sondadores atmosféricos, fossem representativas de Belém, foi definido que as mesmas precisavam estar num raio de até 50 km de distância do ponto de referência utilizado. A localização da cidade de Belém bem como as estações meteorológica de altitude (EMA) e convencional do INMET estão representadas na Figura 1.

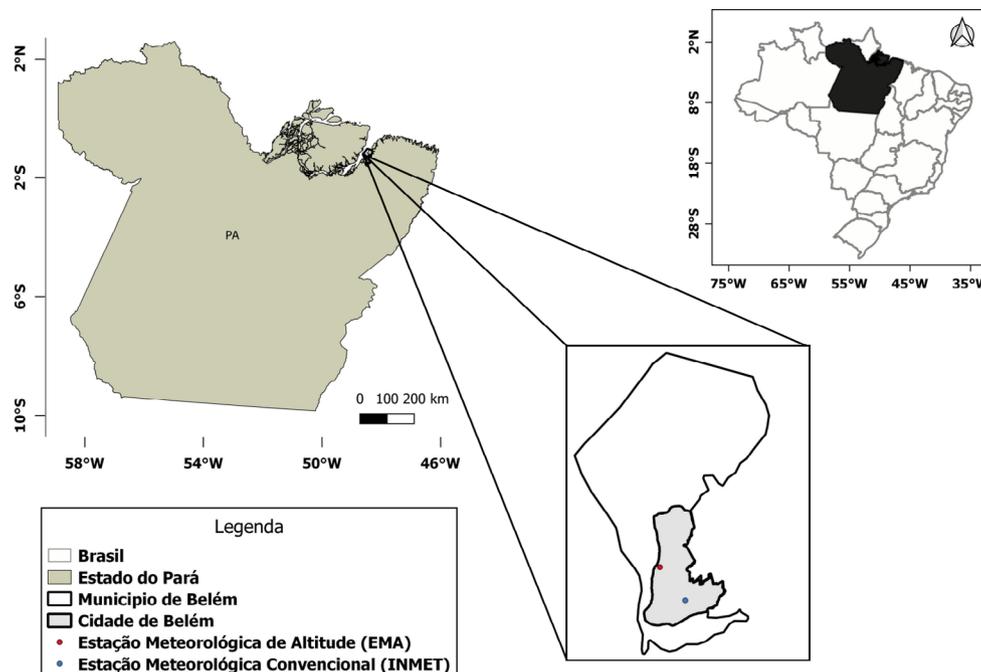


Figura 1 Localização geográfica da cidade de Belém-PA, da Estação Meteorológica de Altitude do Aeroporto Internacional de Belém (ponto vermelho) e da estação meteorológica de superfície convencional do INMET (ponto azul).

2.2 Dados

Foram utilizados os dados do sondador atmosférico dos satélites NOAA-18 e NOAA-19 adquiridos através da estação de recepção do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM). Os dados estimados pelas sondagens atmosféricas são de temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho, nos níveis isobáricos de 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 150, 100 hPa. Embora os satélites também estimem o perfil vertical da direção e velocidade do vento, a estação de recepção do SIPAM não está habilitada para receber tais dados, por isso os mesmos não foram utilizados neste estudo.

O horário das sondagens satelitais apresentam variações devido a quantidade de satélites disponíveis, assim como o posicionamento das suas varreduras, podendo alcançar o máximo de quatro sondagens por dia, as quais poderiam ocorrer nos seguintes horários: 02:00 ou 03:00 Hora Local (HL), 05:00 ou 06:00 HL, 14:00 ou 15:00 HL e 17:00 ou 18:00 HL. É importante ressaltar que, algumas sondagens não ocorreram na hora cheia, por isso optou-se por definir que as sondagens satelitais não ocorridas nas horas cheias fossem representativas da hora cheia mais próxima. Ademais, a partir dos horários fixados, as avaliações eram feitas para prever as chuvas para as próximas 06:00 horas depois de cada sondagem. Por exemplo, se a primeira sondagem do dia ocorresse às 02:00 e um determinado índice termodinâmico apresentou um valor clássico indicando chuva e chovesse entre o período de 02:00 até 08:00, o resultado é que o índice termodinâmico havia acertado a previsão. No total, foram analisadas 651 sondagens atmosféricas no período de dezembro de 2015 a novembro de 2016. E nesse período, em 33 dias foram encontradas falhas nos dados, devido a problemas técnicos de recepção e a problemas no armazenamento dos dados. É importante frisar que o mês de março/2016 teve, apenas 12 dias de sondagens atmosféricas e isso pode interferir nos resultados obtidos para esse mês.

A variável precipitação foi outro dado utilizado na pesquisa, a qual foi obtida da estação meteorológica automática do INMET em Belém (situada em 1,41°S de latitude, 48,44°W de longitude e 21 metros de altitude). O intuito de usar tal variável foi para validar as previsões feitas pelos índices termodinâmicos, para a cidade de Belém, já que os dados possuem uma resolução temporal horária, assim foi possível comparar a previsão com o que realmente foi observado. Vale ressaltar que pode ter uma limitação na validação da previsão de chuva com o uso de apenas uma estação meteorológica automática devido à grande variabilidade espacial da precipitação da área de estudo. Contudo, para amenizar esse efeito da resolução espacial, devido à carência na quantidade de estações meteorológicas,

é possível utilizar dados de estimativa de precipitação por satélite tipo TRMM que na qual dispõe de maior cobertura espacial e temporal que sanaria a escassez de dados horários de chuva da região.

2.3 Metodologia

A partir dos perfis verticais de temperatura do ar e de orvalho obtidos pelos satélites, foram calculados os índices termodinâmicos: CAPE, Índice K, Índice *Total-Totals* (Índice *TT*) e Índice de Levantamento (*ILEV*), os quais são descritos abaixo:

- Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE)

A CAPE é um dos parâmetros mais utilizados para previsão convectivas, severas ou não, e pode ser obtida a partir da Equação 1 (Emanuel, Neelin & Bretherton 1994):

$$CAPE = g \int_{NCE}^{NE} \left(\frac{Tv(z) - Tv(z)_{amb}}{Tv(z)_{amb}} \right) dz \quad (\text{J. kg}^{-1}) \quad (1)$$

Em que: *NCE* é o nível de convecção espontânea; *NE* é o nível de equilíbrio ou nível de perda de empuxo para uma determinada parcela de ar ascendente da superfície; *Tv* é a temperatura virtual desta parcela de ar; *Tvamb* é a temperatura virtual do ambiente; *Z* é a altura Geopotencial (m); *G* é a aceleração da gravidade (9,8 m.s⁻²).

- Índice K

O índice K é determinado a partir da Equação 2 proposta por George (1960):

$$K = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - Dep_{700} \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

Sendo: *T* é a temperatura em 850 hPa e 500 hPa; *Td* é a temperatura do ponto de orvalho em 850 hPa e *Dep* é a depressão do bulbo úmido ambientais em 700 hPa, isto é, é a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho no nível de 700 hPa. Dessa forma, *K* leva em conta a taxa de variação de temperatura entre 850 hPa e 500 hPa ($T_{850} - T_{500}$), a umidade em 850 hPa (Td_{850} hPa), e se houver uma camada seca em 700 hPa, isso contribui para diminuir o valor de *K*. Enquanto que se em 700 hPa a atmosfera estiver perto da saturação, isso não contribui para diminuir o valor de *K*. Portanto, para a ocorrência de valores altos de *K*, é necessário que a camada úmida atmosférica em baixos níveis seja um relativamente profunda, se estendendo até 700 hPa, pelos menos.

- Índice Total Totals (TT)

De acordo com a aplicação feita por Miller (1972), o índice Total Totals é definido pela Equação 3:

$$ITT = T_{850} + Td_{850} - 2 T_{500} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3)$$

As variáveis são as mesmas definidas no índice anterior. O ITT analisa três informações básicas: a taxa de variação vertical de temperatura de níveis médios ($^\circ\text{C}$), umidade do ar em 850 hPa e a temperatura em 500 hPa. Ao contrário do Índice K, o Índice TT não é afetado por uma camada úmida mais profunda. Basta que ela se estenda até o nível de 850 hPa.

- Índice de Levantamento (ILEV)

De acordo com Galway (1956) e Silva Dias (2000), o ILEV pode ser calculado pela Equação 4:

$$ILEV = T_{500} - T_{p500} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4)$$

Em que: T_{500} é a temperatura do ar ambiente em 500 hPa e T_{p500} é a temperatura de uma parcela de ar originada de uma situação de razão de mistura do vapor d'água média entre a superfície e 850 hPa.

Os valores de cada um dos índices citados acima indicam as condições para o desenvolvimento de chuva e podem ser associados à tempestade. A Tabela 1 mostra os valores de referência, obtidos em latitudes médias, para cada índice termodinâmico utilizado como base neste estudo. Tais valores foram escolhidos por representarem os limiares mínimos para haver instabilidade na atmosfera e assim favorável para a formação de tempestades ou convecção profunda.

A validação das previsões de precipitação, através dos índices termodinâmicos, foi feita utilizando dados horários de chuva da estação automática do INMET. Com isso, para avaliar a eficácia das previsões de chuvas foi

Tabela 1 Valores de referência, para cada índice termodinâmico, utilizado para indicar a ocorrência de instabilidade em latitudes médias.

Índices termodinâmicos	Condição Atmosférica	Referência
CAPE \geq 1000	Convecção profunda	McMurdie & Houze (2006)
K \geq 30	Tempestades dispersas	George (1960)
TT \geq 43	Tempestades isoladas	Miller (1972)
ILEV \leq -3	Marginalmente instável	Galway (1956)

aplicado o Método de Análise de Contingência (MAC) (Wilks 2006), que quantificou os principais índices de acertos na previsão de chuva a partir dos índices de instabilidade proveniente das sondagens dos satélites NOAA-18 e NOAA-19 e comparados com a ocorrência de precipitação observada na cidade de Belém em até seis horas posteriores ao horário que foi feita a sondagem.

O MAC utiliza justamente os parâmetros de erros e acertos da previsão para avaliar o desempenho da mesma através de índices de previsão, que são calculados através de parâmetros da Tabela de Contingência: a, b, c e d, onde (a) é o número de vezes que o índice termodinâmico analisado previu chuva e a mesma ocorreu dentro das próximas seis horas; (b) é o número de vezes que o índice termodinâmico previu chuva e a mesma não ocorreu dentro das próximas seis horas; (c) é o número de vezes que o índice termodinâmico não previu chuva e a mesma ocorreu dentro das próximas seis horas e (d) é o número de vezes que o índice termodinâmico não previu chuva e a mesma não ocorreu dentro das próximas seis horas (Wilks 2006), conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 Tabela de Contingência.

		Observado			
		Sim	Não		
Previsto	Sim	a	b	a + b	Totais marginais da previsão
	Não	c	d	c + d	
		a + c	b + d	n = a+b+c+d	
		Totais marginais da observação		Tamanho da amostra	

Fonte: Wilks (2006)

Através das informações obtidas na tabela de contingência, foram calculados os índices de previsão, que avaliaram o desempenho da mesma. Os índices de previsão usados foram:

- Proporção de Acertos (PA)

É medida mais direta e intuitiva das precisões de previsão para eventos discretos, proposta por Finley (1884) (*apud* Wilks 2006, p. 262). Esta é a fração das n previsões ocorridas para as quais a probabilidade prevê corretamente, se antecipando ao evento subsequente ou nenhum evento (previsão de chuva e ocorrência da mesma ou previsão sem chuva em que ela não ocorreu).

$$PA = \frac{(a + d)}{n} \times 100 \quad (5)$$

- Índice Crítico de Sucesso (ICS)

É o número de previsões corretas divididas pelo número total de ocasiões nas quais aquele evento foi previsto e/ou observado. Pode ser visto como uma proporção de acerto para a quantidade prevista, depois de remover acertos não previstos considerados, dado por:

$$ICS = \frac{a}{(a + b + c)} \times 100 \quad (6)$$

- Probabilidade de Detecção (POD)

É a relação do evento de chuva prevista corretamente com os eventos previstos correta ou incorretamente. Ou seja, mostra o desempenho de detecção da chuva. A melhor previsão ocorre quando o POD for igual a um (100%). Consequentemente a pior previsão ocorrerá quando o POD for igual a zero (0%).

$$POD = \frac{a}{(a + c)} \times 100 \quad (7)$$

- Relação de Alarme Falso (RAF)

É a proporção de previsões de ocorrência de chuva que na verdade não se materializaram. Por esta razão utiliza-se o termo “alarme falso”. O RAF tem uma orientação negativa, de forma que valores menores de RAF serão preferidos. O melhor possível RAF é zero, e o pior possível RAF é um.

$$RAF = \frac{b}{(a + b)} \times 100 \quad (8)$$

Salienta-se que 1 ano de dados é pouco para a estatística de verificação, e a obtenção de uma maior série temporal resultaria em resultados efetivamente mais assertivo em relação à avaliação proposta no estudo, pois períodos de tempo mais longos são mais aconselháveis para determinar a existência de uma tendência média ou se é uma particularidade de 1 ano específico, já que existe a influência de variabilidades climáticas interanuais que podem estar ativas em um determinado ano, como por exemplo, ENOS (El Niño - Oscilação Sul).

No entanto, a presente pesquisa apresenta uma amostra razoável dentro de 1 ano de estudo, no total são 651 casos de sondagens satelitais. Desta forma, outros trabalhos usaram a metodologia da tabela de contingência com diferentes bancos de dados e períodos relativamente

curtos como Amanajás & Cunha (2010); Berlatto, Farenzena & Fontana (2005); Silva, Freitas & Gielow (2011); e Silva, Lucio & Spyrides (2012).

Além da metodologia abordada acima, foi realizado um estudo de caso para validar os resultados obtidos no desempenho dos índices termodinâmicos. Portanto, a elaboração do estudo de caso consiste na utilização das imagens de satélites do canal Infravermelho realçado do GOES-13; da precipitação horário para o dia selecionado; da radiossondagem convencional do INMET; da sondagem oriunda dos satélites NOAA-18 e NOAA-19; Divergência de Umidade e Circulação no nível de 1000 hPa e de Divergência de Massa e Circulação no nível de 200 hPa, baseados em dados de reanálise da NOAA, para analisar o comportamento atmosférico no dia em que ocorreu evento de chuva.

3 Resultados

3.1 Análise Estatística Anual e Sazonal da Previsibilidade dos Índices Termodinâmicos

A Figura 2 mostra a distribuição temporal dos índices de previsibilidade de chuva (%), com base nos valores dos índices termodinâmicos obtidos através das sondagens atmosféricas por satélite, para toda série (a partir daqui será denominada de anual). De forma geral, observou-se que os índices termodinâmicos não foram eficientes para prever a ocorrência de chuvas em Belém. Em todos os índices termodinâmicos a POD apresentou valores entre 43 e 65%, ou seja, valores medianos quanto a detecção de chuva prevista e ocorrida, em relação às chuvas que ocorreram, sendo elas previstas ou não. Notou-se também que o RAF, o qual indica que a chuva foi prevista pelo índice termodinâmico e não ocorreu foi superior a 50% em todas as análises, assim como o ICS (proporção de acerto de previsão de chuvas) somente quando a mesma foi prevista e/ou observada (desconsiderando os acertos de quando não foi prevista) apresentou valores inferiores a 45%.

A previsão de chuvas baseada na CAPE apresentou os valores menos satisfatórios dos índices de previsão, tanto na contabilização anual, quanto sazonal, com PA abaixo de 35%, ICS menor que 25% e RAF alcançando valores de até 89% no período menos chuvoso (Figura 2A). Este desempenho insatisfatório pode estar relacionado com a subestimativa da temperatura e a umidade na baixa troposfera (Alves, Rocha & Lopes 2015) ou seja, a limitação dos dados remotos interfere diretamente nos valores de CAPE, pois a mesma depende da Temperatura virtual (T_v) no nível do NCE (que em geral encontra-se

em níveis atmosféricos mais baixos), que por sua vez é um parâmetro, relacionado diretamente com a temperatura do ar e a umidade nestes mesmos níveis. A outra explicação se dá pelo fato de nas regiões tropicais é comum existir valores de CAPE acima de 1000 J.Kg^{-1} , sem que isso indique necessariamente chuva, o contrário também é observado, isto é, existe chuva com CAPE menor que 1000 J.Kg^{-1} , isso ocorre por se ter uma atmosfera quase sempre condicionalmente instável nos trópicos, ou seja, na região tropical a atmosfera tem sempre um pouco de CAPE (Xu & Emanuel 1989). Ressalta-se ainda que a conversão da CAPE em energia cinética das correntes ascendentes numa nuvem convectiva depende da existência de um eficiente mecanismo de disparo, ou levantamento das parcelas de ar até o nível de convecção espontânea. Além disso, outros estudos baseados em dados de radiossondagens convencionais mostraram que em Belém, durante períodos muito chuvosos a correlação entre a CAPE e os eventos extremos de precipitação é fraca, e que a convecção severa pode se desenvolver mesmo com CAPE inferior a 1000 J.Kg^{-1} (Santos, Mota & Rocha 2014; Tavares & Mota 2011).

O índice K apresentou um razoável desempenho na previsibilidade de chuva em Belém, principalmente no período chuvoso, com PA de 78%. Como o PA relaciona as previsões corretas pelo número total de previsões feitas

(certas ou erradas), pode-se dizer que, aproximadamente, em 80% das sondagens, o índice K foi maior ou igual a 30°C , quando foi registrado chuva, assim como quando o índice K foi menor que 30°C , não houve registro de chuvas (Figura 2B).

O fato do índice K apresentar melhor desempenho se dá pelo aumento da umidade na camada atmosférica no período chuvoso que contribui para a ocorrência de chuva quase todo dia. Tavares & Mota (2011), que elaboraram um padrão médio da estrutura vertical da troposfera a partir de radiossondagens convencionais, também chegaram a resultados semelhantes, no que diz respeito ao desempenho do índice K na previsão de chuvas em Belém. É importante salientar que o mês de março/2016 teve, apenas 12 dias de sondagens atmosféricas na qual pode interferir nos resultados obtidos para esse mês.

Os índices TT e ILEV apresentaram elevados valores de RAF, para a análise anual e sazonal, apresentando maiores valores no período menos chuvoso (ambos com 79%), indicando que houve uma maior deficiência na previsão destes índices durante este período. Por outro lado, mesmo com o desempenho ruim, pode ser observado uma discreta melhora nas previsões de chuvas pelo TT, em comparação a ILEV no período chuvoso, notado através dos valores de PA, ICS e RAF (Figura 2C-D). Mesmo que o presente estudo considere

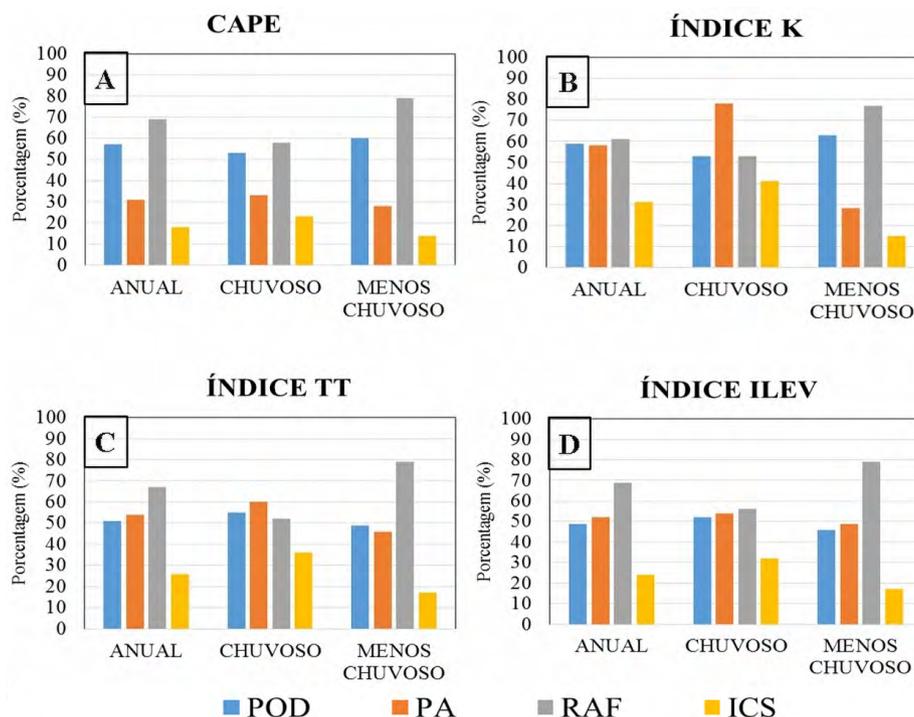


Figura 2 Índices de previsibilidade de chuva – POD, PA, RAF e ICS (%) - para toda a série de dados (dezembro de 2015 a novembro de 2016 (anual)), período chuvoso (dezembro de 2015 a maio de 2016) e período menos chuvoso (junho a novembro de 2016) em Belém-PA em Belém-PA. Os índices estatísticos foram aplicados aos índices termodinâmicos: A. CAPE; B. índice K; C. Índice TT; D. Índice de levantamento (ILEV).

todos os eventos de chuvas (extremos e não extremos), pode ser dito que estes resultados não estão em acordo com os encontrados por Tavares & Mota (2012) que, através de dados de radiossondagens convencionais, concluíram que o ILEV foi mais adequado para a previsão de eventos extremos de chuvas em Belém, quando comparado ao TT.

3.2 Análise Estatística Mensal da Previsibilidade dos Índices Termodinâmicos

Para avaliar se os índices termodinâmicos apresentaram melhor desempenho na previsão de chuva em Belém, em algum mês específico, a Figura 3 A-D ilustra a distribuição mensal dos índices de previsão para cada índice termodinâmico analisado.

Em comparação aos demais índices termodinâmicos, a CAPE apresentou novamente valores insatisfatórios em praticamente todos os índices de previsão. Em fevereiro e março, meses do período chuvoso, a CAPE teve os menores valores de POD (inferiores a 40%) e PA (cerca de 10%), conforme a Figura 3A. Além da deficiência na estimativa por satélite das temperaturas do ar próximo da superfície, esta baixa previsibilidade de chuva também pode estar associada a forte influência dos sistemas meteorológicos de grande

escala durante estes meses, principalmente pela presença da ZCIT (Reboita et al. 2010). E em Belém, a convecção durante a estação chuvosa apresenta características de regimes tropicais marítimos, com menor CAPE, correntes ascendentes mais fracas e reduzida atividade elétrica nas nuvens (Adams, Souza & Costa 2009). Portanto, neste período os fatores dinâmicos têm papel importante no desenvolvimento das nuvens precipitantes na região, pois ajudam as parcelas a alcançar o Nível de Condensação por Levantamento (NCL) (base das nuvens) e o Nível de Convecção Espontânea (NCE), atuando como “gatilho” para o disparo da convecção úmida profunda (Lima 2005; Mota & Nobre 2006) e os fatores termodinâmicos apresentam uma importância secundária no processo de convecção úmida, o que reflete na baixa previsibilidade de chuva em Belém, através da CAPE.

A distribuição mensal dos índices de previsão baseado no índice K obteve um resultado satisfatório para os meses chuvosos, principalmente em fevereiro, março e abril, com PA superiores a 90% e RAF menores ou iguais a 50%. No período menos chuvoso o rendimento de K reduziu consideravelmente, e embora os valores de POD tenham sido altos, indicando um elevado índice de acerto na previsão dos eventos de chuvas, os baixos valores de

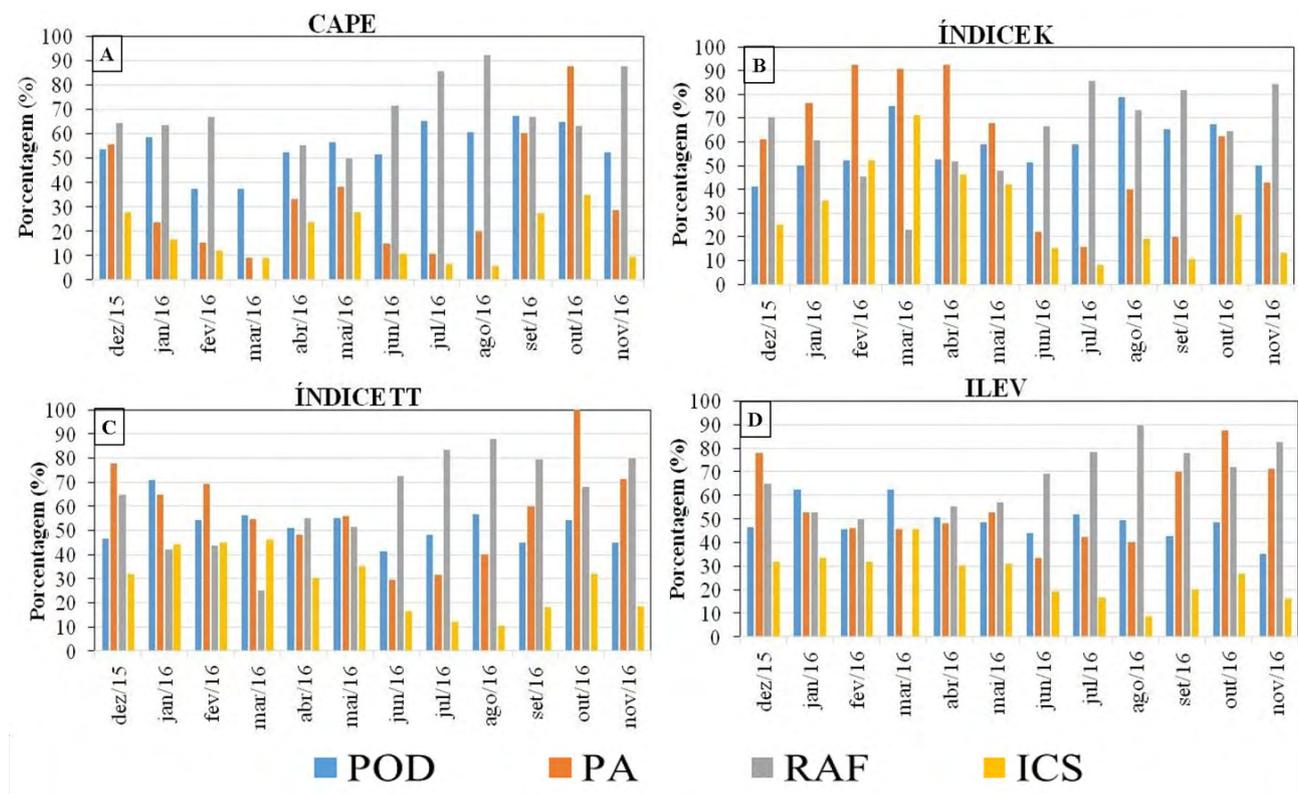


Figura 3 Distribuição mensal dos índices de previsibilidade de chuva em Belém-PA - POD, PA, RAF e ICS (%), através dos índices termodinâmicos: A. CAPE; B. índice K; C. Índice TT; D. ILEV.

PA e ICS, juntamente ao alto RAF, demonstrou que, por vezes as chuvas foram previstas e não ocorreram ou não foram previstas e não ocorreram. Este resultado pode indicar que, durante o período menos chuvoso, o valor do índice K associado à ocorrência de chuva (convectiva) em Belém necessite de ajustes. Em suma, o índice K igual ou superior a 30°C , apresentou um bom (ruim) desempenho na previsibilidade de chuva durante os meses mais (menos) chuvosos (Figura 3B). O desempenho da previsão de chuva, através do índice TT, se mostrou razoável durante os meses chuvosos, indicado principalmente pelos menores RAF e maiores POD, PA e ICS. No período menos chuvoso, o desempenho da previsão de chuvas através desse índice, também foi insatisfatório, o que pode ser verificado através dos elevados valores de RAF (entre 70 e 90%), exceto em outubro, quando PA apresentou um excelente desempenho (com 100%), como pode ser visto na Figura 3C. O ILEV não teve um resultado satisfatório na grande maioria dos meses, com os índices preditivos bem abaixo do valor ótimo estabelecido para POD, PA e ICS (100%), corroborando com os resultados de Oliveira & Oyama (2009), que verificou o desempenho do ILEV com o ciclo anual de precipitação em Alcântara onde este índice não mostrou a variação sazonal da mesma. Nos meses de setembro a dezembro, o PA apresentou valores entre 70% e 87%, mostrando que o ILEV foi menor ou igual a -3°C quando ocorreu chuva, mas nem todas as vezes que choveu, o ILEV foi maior que -3°C ou mesmo quando o ILEV apresentou valores que representam convecção, não houve chuva em Belém. É importante salientar que o mês de março/2016 teve, apenas 12 dias de sondagens atmosféricas na qual pode interferir nos resultados obtidos para esse mês.

3.3 Estudo de Caso

Nessa secção, é apresentado um estudo de caso, com o objetivo de validar os resultados obtidos nas análises do desempenho dos índices termodinâmicos, pelas sondagens por satélites, e analisar a dinâmica da atmosfera presente nos dias estudados.

3.3.1. Caso do Dia 23 de Fevereiro de 2016

De acordo com o registro da estação automática do INMET, no dia de 23 de fevereiro de 2016, foi observado um total de 57,2 mm de chuva, com maior acumulado horário de 31,5 mm às 17 h e, posteriormente ainda foi observado chuva, porém com acumulado horário bem inferior, 11,6 mm/h no horário das 21h (Figura 4). Neste dia choveu

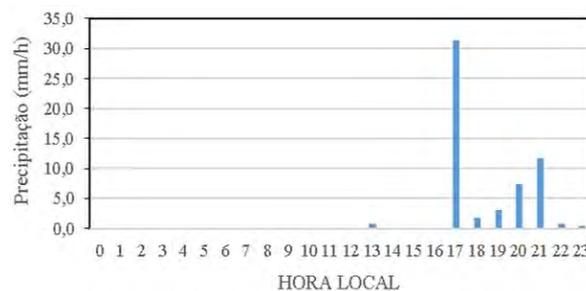


Figura 4 Distribuição horária do acumulado de chuva (mm.h-1) em Belém do dia 23 de fevereiro de 2016.

14% da chuva esperada para todo o mês de fevereiro que é aproximadamente 400 mm segundo a climatologia do INMET (1981-2010).

As Figuras 5A e 5B mostram os diagramas Skew T log P, que é a forma gráfica de ilustrar a radiossondagem convencional das 1200 UTC (09:00HL) e a sondagem oriunda do satélite às 1716 UTC (14:16 HL), respectivamente, para o dia 23 de fevereiro de 2016. Pode-se observar que nas duas sondagens a atmosfera esteve relativamente instável, pois a CAPE apresentou valores próximos de 1000 J.kg^{-1} . Na sondagem das 1716 UTC, os índices termodinâmicos mostraram um ambiente mais favorável para ocorrência de chuva para as próximas horas, com o índice K igual a 36°C , indicando a possível formação de muitas tempestades (George 1960); o índice TT de 46°C , indicando condições de tempestades dispersas (Miller 1972); o ILEV indicou uma atmosfera moderadamente instável (Galway 1956) e, a CAPE apresentou um valor de 952 J.kg^{-1} , inferior ao valor que está relacionado à presença de convecção profunda (McMurdie & Houze 2006). Por outro lado, não se pôde observar esses valores através da radiossondagem convencional, pois no horário das 1200 UTC a atmosfera ainda estava começando a se aquecer e os processos físicos se iniciando. Por este motivo, a sondagem do satélite seria uma ótima opção de ferramenta para a previsão de curto prazo, já que a precipitação ocorreu nas três horas seguintes ao horário do seu registro.

Às 2000 UTC do dia 23 de fevereiro de 2016 (23/02/2016 às 17HL) foi observada atividade convectiva intensa à norte e leste da capital paraense, indicada pela presença de topos de nuvens com baixa temperatura de até -50°C (Figura 6A-B). Três horas depois, às 0000Z (21:00 HL), o sistema convectivo que estava situado nas proximidades de Belém estava mais intenso, com temperatura mínima do topo da nuvem de -60°C , e posicionado sobre o Rio Pará e a Ilha do Marajó, afetando também boa parte da capital paraense (Figura 6C-D).

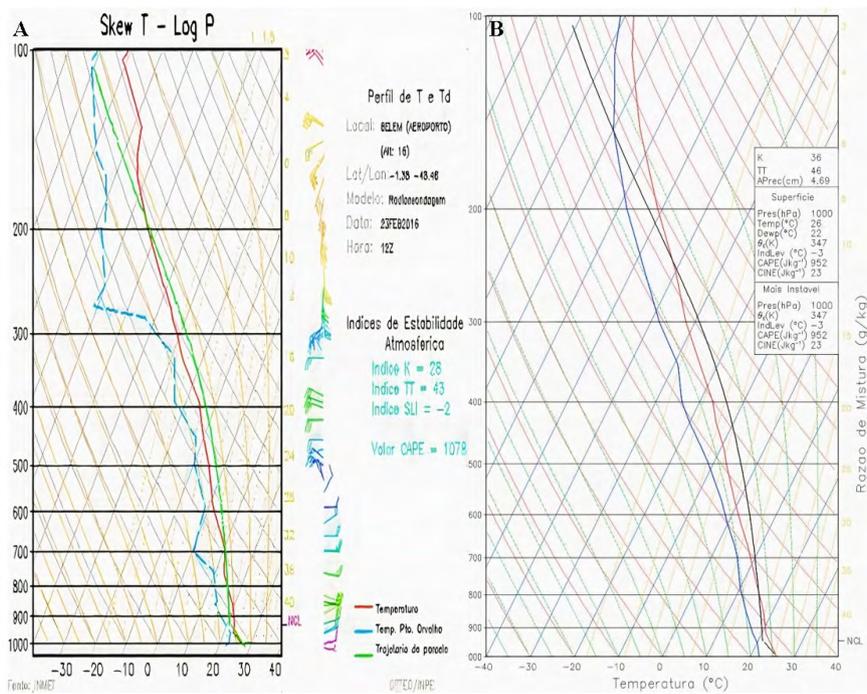


Figura 5 Radiossondagem do dia 23 de fevereiro de 2016 para a cidade de Belém. A. corresponde a radiossondagem convencional às 1200UTC do INMET; B. sondagem dos satélites NOAA 18 e NOAA 19 às 1716UTC (14:16 HL).

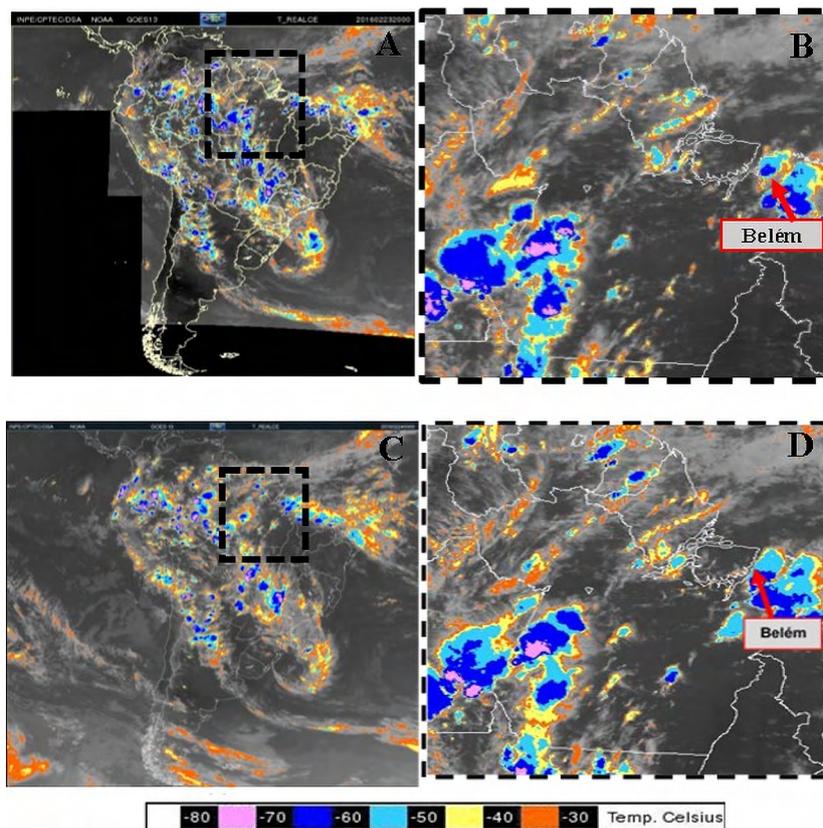


Figura 6 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 23 de fevereiro de 2016 às 2000Z (17:00 HL): A. América do Sul; B. Norte do Brasil; e às 0000Z (21:00HL): C. América do sul; D. Norte do Brasil. Fonte: CPTEC/INPE.

Em média, entre 1800 e 2359Z (15:00 e 20:59 HL), do dia 23 de fevereiro de 2016, no nível de 1000 hPa, notou-se uma faixa de confluência dos ventos situada no equador e convergência de umidade presente no norte e sudeste do Pará, Amapá, Maranhão e norte do Tocantins (Figura 7A). A circulação em 200 hPa apresentou a configuração de

difluência dos ventos no norte do Pará, incluindo Belém, aliada à moderada divergência de massa neste mesmo nível (Figura 7B) e a presença de Vórtice ciclônico de altos níveis (VCAN). Em outras palavras, o escoamento de grande escala estava favorável à convecção profunda sobre o norte do Brasil.

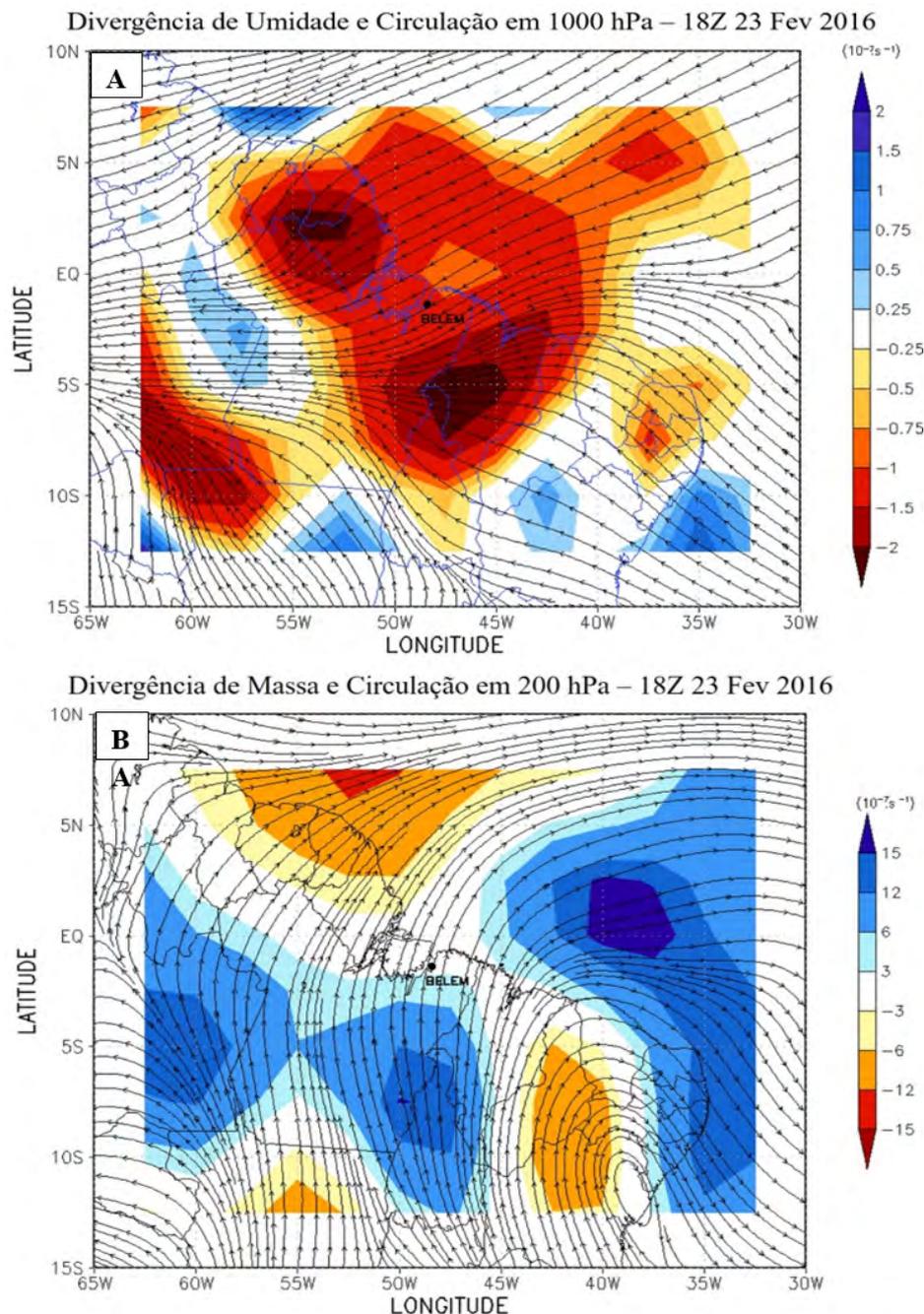


Figura 7 A. Divergência de umidade (10^{-7} s^{-1}) e circulação do vento em 1000 hPa, média de 1800Z à 2359Z em 23 de fevereiro de 2016 no norte do Brasil; B. Divergência de massa (10^{-7} s^{-1}) e circulação do vento em 200 hPa, 1800Z à 2359Z em 23 de fevereiro de 2016 no norte do Brasil.

4 Conclusão

Com base nos resultados encontrados no estudo do rendimento estatístico dos índices termodinâmicos, obtidos através das sondagens pelos satélites NOAA-18 e NOAA-19, na previsibilidade de chuvas em Belém-PA, concluiu-se que: 1) As previsões de chuva a curto prazo tiveram um melhor desempenho no período chuvoso. No período menos chuvoso as previsões de chuvas a curto prazo, foram insatisfatórias; 2) O índice termodinâmico, que melhor previu as chuvas, em curto prazo, em Belém, foi o índice K e secundariamente o índice TT, durante o período chuvoso; A CAPE se mostrou inadequada para prever as chuvas a curto prazo.

Sugere-se que o baixo desempenho dos índices estatísticos na previsibilidade de chuvas em Belém, principalmente no período menos chuvoso, estiveram associados aos seguintes fatores: às limitações dos satélites polares ao estimar da temperatura do ar e umidade próximo da superfície; as condições termodinâmicas são necessárias, mas não são as únicas responsáveis pela formação da convecção úmida profunda e, principalmente, pela necessidade de ajuste nos valores clássicos de instabilidade dos índices termodinâmicos que representam convecção em Belém.

Portanto, ressaltar-se a importância das sondagens atmosféricas oriundas dos sondadores orbitais para a rotina operacional na previsão de tempo de curto prazo, visto que é uma ferramenta alternativa que apresenta maior cobertura espacial e temporal, que os índices calculados através das sondagens convencionais. Como mostrado no estudo de caso, a sondagem satelital foi mais eficiente e representativa na previsão do evento de chuva horas antes da mesma acontecer, indicando o potencial na previsibilidade de instabilidade e conseqüentemente da precipitação.

Para a realização de trabalhos futuros, sugere-se: a aplicação desta metodologia num período maior de dados; a utilização de métodos estatísticos mais avançadas para avaliação do desempenho da previsibilidade da precipitação através dos índices termodinâmicos; realizar estudos que visem os ajustes no valores clássicos de instabilidade dos índices termodinâmicos, calculados através das sondagens por satélites, e que estudos como este sejam feitos para outras localidades, em especial àquelas que não tem radiossondagens convencionais.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) pela disponibilização dos dados usados nessa pesquisa e também à Universidade Federal do Pará (UFPA) pela estrutura cedida e pelas orientações e conhecimentos adquiridos.

6 Referências

- Adams, D.K., Souza, E.P. & Costa, A.R. 2009, 'Convecção úmida na Amazônia: implicações para a modelagem numérica', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 24, no. 2, pp. 168-78. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000200006>
- Alves, E.R., Rocha, B.R.P. & Lopes, M.N.G. 2015, 'Perfis atmosféricos: estudo comparativo entre radiossondagens convencionais e sondagens do satélite NOAA-16', *XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto- SBSR*, INPE, João Pessoa.
- Amanajás, J. & Cunha, A. 2010, 'Análise Comparativa do Desempenho dos Modelos WRF e ETA na Previsão de Chuva para o Município de Macapá (AP)', in A.C. Cunha, E.B. Souza & H.F.A. Cunha (eds), *Tempo, clima e recursos hídricos: resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá*, IEPA, Macapá, pp. 43-59. http://www.iepa.ap.gov.br/meteorologia/publicacoes/Livro_Remetap.pdf
- Barbosa, R.L. 2005, 'Interação das perturbações convectivas iniciadas na costa Norte do Brasil com distúrbios ondulatórios de Leste', Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Benetti, C.A. & Silva Dias, M.A. 1986, 'Análise da performance de índices de instabilidade como previsores de tempestades na região de São Paulo', *IV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Brasília, DF.
- Berlato, M.A., Farenzena, H. & Fontana, D.C. 2005, 'Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul', *Pesquisa agropecuária brasileira*, vol. 40, pp. 423-32. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000500001>
- Cohen, J.C.P., Silva Dias, M.A.F. & Nobre, C.A. 1995, 'Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study', *Monthly Weather Review*, vol. 123, no. 11, pp. 3163-74. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123<3163:ECAWAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<3163:ECAWAS>2.0.CO;2)
- Coutinho, E.C. & Fisch, G. 2007, 'Distúrbios ondulatórios de leste na região do centro de lançamento de Alcântara- MA', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 22, pp. 193-203. <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/h9vRBKzRfhPCQf47fzkXGHx/?format=pdf&lang=pt>
- Dias, M.A.F.S. 2000, Índices de instabilidade para previsão de chuva e tempestades severas, Universidade de São Paulo, São Paulo. <http://www.master.iag.usp.br/static/downloads/apostilas/indices.pdf>
- Emanuel, K.A., Neelin, J.D. & Bretherton, C.S. 1994, 'On large-scale circulations in convecting atmosphere', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 120, no. 519, pp. 1111-43. <https://doi.org/10.1002/qj.49712051902>
- Espinoza, E.S. 1999, 'Distúrbios nos ventos de leste no Atlântico Tropical', Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X1999000100011>
- Finley, J.P. 1884, 'Tornado prediction', *American Meteorological Journal*, vol. 1, pp. 85-8.
- Frierson, D.M.W., Hwang, Y., Fuckar, N.S., Seager, R., Kang, S.M., Donohoe, A., Maroon, E.A., Liu, X. & Battisti, D.S. 2013, 'Contribution of ocean overturning circulation to tropical

- rainfall peak in the Northern Hemisphere', *Nature Geoscience*, vol. 6, no. 11, pp. 940-4. <https://doi.org/10.1038/ngeo1987>
- Galway, J.G. 1956, 'The lifted index as a predictor of latent instability', *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 43, pp. 528-9. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-37.10.528>
- George, J.J. 1960, *Weather forecasting for aeronautics*, Academic Press, Waltham, MA.
- Gille, F.S.S. & Mota, M.A.S. 2014, 'Importância das condições termodinâmicas nos eventos extremos de precipitação na cidade de Belém e região metropolitana', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 29, no. spe, pp. 73-82. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130066>
- INMET - vide Instituto Nacional de Meteorologia.
- Instituto Nacional de Meteorologia 2017, *Normais Climatológicas do Brasil, 1961-1990*, acessado 20 Janeiro 2017, <<https://portal.inmet.gov.br/>>.
- Kousky, V.E. 1980, 'Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil', *Monthly Weather Review*, vol. 108, pp. 488-98. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<0488:DRVINB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<0488:DRVINB>2.0.CO;2)
- Kousky, V.E. & Gan, M.A. 1981, 'Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic', *Tellus*, vol. 33, no. 6, pp. 538-51. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v33i6.10775>
- Li, J., Wolf, W.W., Menzel, W.P., Zhang, W., Huang, H.L. & Achtor, H.T. 2000, 'Global sounding of the atmosphere from ATOVS measurements: the algorithm and validation', *Journal of Applied Meteorology*, vol. 39, pp. 1248-68. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1248:GSOTAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1248:GSOTAF>2.0.CO;2)
- Lima, D.R.O. 2005, 'Diagnóstico de chuvas e previsão meteorológica para a bacia hidrográfica do rio Manso', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Machado, L.A.T., Laurent, H., Dessay, N. & Miranda, I. 2004, 'Seasonal and diurnal variability of convection over the Amazonia: a comparison of different vegetation types and large scale forcing', *Theoretical and applied climatology*, vol. 78, no. 1, pp. 61-77. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0044-9>
- Marengo, J.A., Liebmann, B., Kousky, V., Filizola, N.S. & Wainer, I. 2001, 'On the onset and end of the rainy season in Brazilian Amazon basin', *Journal of Climate*, vol. 14, pp. 833-52. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0833:OAEOTR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0833:OAEOTR>2.0.CO;2)
- McMurdie, W.L. & Houze, R.A. 2006, 'Weather systems', in J.M. Wallace & P.V. Hobbs (eds), *Atmospheric Science*, 2nd edn, Academic Press, pp. 313-73. https://www.academia.edu/37366881/Atmospheric_science_wallace_and_hobbs_PDF
- Miller, R.C. 1972, *Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the air force global weather central*, Tech Report 200, Headquarters, Air Weather Service, USAF. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0744042.pdf>
- Molion, L.C.B. & Bernardo, S.D.O. 2002, 'Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 17, no. 1, pp. 1-10.
- Mota, M.A.S. & Nobre, C.A. 2006, 'Relação da variabilidade da Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) com a precipitação e a Alta da Bolívia (AB) durante a campanha "Wet-AMC/LBA"', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 21, no. 3b, pp. 344-55. http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/09.25.11.54/doc/nobre_rela%e7ao.pdf
- Moura, M.N. & Aimola, L.A.L. 2016, 'A Influência da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico na Definição da Posição Média da ZCIT ao Norte do Equador: Uma Revisão', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 31, pp. 555-63. <https://doi.org/10.1590/0102-778612314b20150059>
- Oliveira, F.P. & Oyama, M.D. 2009, 'Radiosounding-derived convective parameters for the Alcântara Launch Center', *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 1, no. 2, pp. 211-6. <https://doi.org/10.5028/jatm.2009.0102211216>
- Pinheiro, H.R., Escobar, G.C.J. & Andrade, K.M. 2014, 'Aplicação de uma ferramenta objetiva para previsão de tempo severo em ambiente operacional', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 29, no. 2, pp. 209-28. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000200006>
- Ramirez, M.C.V., Kayano, M.T. & Ferreira, N.J. 1999, 'Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of northeast Brazil during the 1980- 1989', *Atmosfera*, vol. 12, no. 2, pp. 75-88. http://mtcm16b.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/05.17.13.10/doc/Ramirez_statistical.pdf
- Reboita, M.S., Gan, M.A., da Rocha, R.P. & Ambrizzi, T. 2010, 'Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 25, no. 2, pp. 185-204. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>
- Santos, J.S., Mota, M.A.S. & Rocha, E.J.P. 2014, 'Classificação climatológica da Energia Potencial Disponível para a Convecção na cidade de Belém - PA', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 29, no. spe, pp. 60-72. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130040>
- Silva, C.M.S., Lúcio, P.S. & Spyrides, M.H.C. 2012, 'Distribuição espacial da precipitação sobre o Rio Grande do Norte: estimativas via satélite e medidas por pluviômetros', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 27, pp. 337-46. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000300008>
- Silva, C.M.S., Freitas, S.R.D. & Gielow, R. 2011, 'Ciclo diário da precipitação estimada através de um radar banda S e pelo algoritmo 3B42_V6 do projeto TRMM durante a estação chuvosa de 1999 no sudoeste da Amazônia', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 26, pp. 95-107. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000100009>
- Tavares, J.P.N. & Mota, M.A.S. 2012, 'Condições Termodinâmicas de eventos de precipitação extrema em Belém - PA durante a estação chuvosa', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 27, pp. 207-18. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000200007>
- Xu, K. & Emanuel, K.A. 1989, 'Is the tropical atmosphere conditionally unstable?', *Monthly Weather Review*, vol. 117, no. 7, pp. 1471-9. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1471:ITTACU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1471:ITTACU>2.0.CO;2)
- Wilks, D.S. 2006, *Statistical methods in the atmospheric sciences*, 2nd edn, Elsevier Science & Technology Books, Academic Press, San Diego, California. <https://azdoc.tips/documents/statistical-methods-in-the-atmospheric-sciences-d1-wilks-2ed-igs-91-elsevier-5c174e6ecae81>

Contribuições dos Autores

Letícia Karyne da Silva Cardoso: conceitualização; análise formal; metodologia; validação; escrita – rascunho original; escrita – revisão e edição. **Nilzele de Vilhena Gomes Jesus:** conceitualização; metodologia e supervisão. **Ludmila Monteiro da Silva:** conceitualização; análise formal; escrita – rascunho original; escrita – revisão e edição. **Alen Costa Vieira:** metodologia.

Conflito de interesse

Os autores declaram nenhum potencial conflito de interesse.

Declaração de disponibilidade de dados

Os dados, scripts e códigos estão disponíveis mediante solicitação.

Financiamento

Não aplicável.

Editora chefe

Dra. Claudine Dereczynski

Editora Associada

Dra. Fernanda Cerqueira Vasconcellos

Como citar:

Cardoso, L.K., Jesus, N.V., Silva, L.M. & Vieira, A.C. 2022, 'Avaliação dos Índices Termodinâmicos na Previsibilidade de Chuvas em Belém-PA: o Uso Alternativo de Sondagens Atmosféricas por Satélite', *Anuário do Instituto de Geociências*, 45:41134. https://doi.org/10.11137/1982-3908_45_41134