Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Mecanismos dinâmicos associados à ocorrência de um evento climático extremo de precipitação na cidade de Salvador-BA

Ana Paula Paes dos Santos¹, Maria Regina da Silva Aragão², José Guilherme Martins dos Santos³, Francisco José Lopes de Lima⁴, Sérgio Rodrigo Quadro dos Santos⁵, Magaly de Fatima Correia⁶

¹ Doutoranda no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP. ana.santos@inpe.br (autor correspondente). ² Professora associada da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB. regina@dca.ufcg.edu.br. ³ Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP. jgmsantos@gmail.com. ⁴ Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP. francisco.lopes.lima@gmail.com. ⁵ Doutorando no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP. sergiosannts@yahoo.com.br. ⁶ Professora associada da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB. magaly@dca.ufcg.edu.br.

Artigo recebido em 13/10/2016 e aceito em 24/11/2016

RESUMO

Após análise de 51 anos de dados de precipitação (1961-2011) foi observado que em abril de 1984 houve um elevado volume pluviométrico, sobre uma área propícia à ocorrência de desastres naturais no Nordeste do Brasil, Salvador, capital do estado da Bahia. O acumulado de 889,8 mm caracterizou este evento climático como extremo e causou diversos impactos à cidade. Com o objetivo de estudar peculiaridades meteorológicas que caracterizaram este caso, o presente trabalho faz uma análise das condições atmosféricas associadas. Os resultados mostraram que nos três meses que antecederam abril de 1984, as anomalias de TSM foram superiores a 0,5°C na área tropical do oceano Atlântico Sul, uma condição que favorece à evaporação e, conseqüentemente, o aumento do teor de umidade da atmosfera. No mês de abril, a área de difluência na periferia leste da Alta da Bolívia, posicionada ao norte de 15°S, na área central da América do Sul, influenciou o Nordeste do Brasil. Paralelamente, ventos alísios de sudeste anormalmente fortes atuaram na Bahia e área oceânica próxima, uma condição que favorece o aumento do transporte de calor e umidade para o continente. Esse conjunto de fatores indica a presença de condições favoráveis ao levantamento na coluna de ar abaixo de 200 hPa e o desenvolvimento de convecção profunda na área de Salvador.

Palavras-chave: eventos extremos de precipitação, área urbana, Nordeste do Brasil.

Dynamical mechanisms associated to the occurrence of an extreme climatic event of precipitation in the city of Salvador-BA

ABSTRACT

After the analysis 51 years of rainfall data (1961-2011) was noted that in April 1984 there was a high volume of rainfall, over an favorable area to occurrence of natural disasters in the Northeast, Salvador, capital city of Bahia State. The accumulated 889.8 mm, characterizing this climate event as extreme and causing many impacts to the city. Thus, this paper analyzes the atmospheric conditions associated with this case. The results showed that in the three months before April 1984, SST anomalies were greater than 0.5°C in the tropical area of the South Atlantic Ocean, a condition which favors the evaporation and the increase of atmospheric moisture content. In April, area of diffluence on the eastern periphery of the Bolivian high, located north of 15°S, in the central area of South America, influenced the Northeast of Brazil. In parallel, southeast winds anomalously strong influenced in Bahia and nearby ocean, a condition that favors the increase of heat and moisture transport to the continent. These factors indicate the presence of favorable conditions to uplift the air column below 200 hPa and development of deep convection in Salvador.

Keywords: extreme evento of rainfall, urban area, Northeastern Brazil.

Introdução

O estudo de eventos extremos é um tema que vem ganhando significativa atenção no meio científico, pois a partir do monitoramento de períodos secos e chuvosos é possível obter informações no tempo e espaço de características

como intensidade, duração e severidade de sistemas atmosféricos, permitindo que medidas preventivas sejam tomadas em curto prazo, para minimizar impactos causados por fenômenos severos (Santos et al., 2011).

Diversos estudos evidenciam que os eventos extremos de precipitação têm consequências em curto e longo prazo, por meio de impactos diretos à agricultura, pecuária, recursos hídricos, à infraestrutura urbana, como também aos seres humanos, afetando o bem-estar social. Quando esses extremos da natureza atingem áreas ocupadas ou utilizadas pelo homem, resultando em danos humanos e materiais e prejuízos socioeconômicos, estes são considerados “desastres naturais” (Changnon 1996; Kobiyama et al., 2006).

No Brasil, levantamentos apontam para uma tendência de aumento na frequência desses desastres, com a maior parte deles (84%) registrada a partir dos anos 70, mostrando um considerável aumento no número de registros nas últimas décadas. A distribuição espacial dos desastres no País mostra que a região que apresenta o maior número de registros é o Sudeste, com 40%, seguida pela Região Nordeste (NE), com 32% do total (Marcelino, 2008).

Estudos já mostraram que o ambiente sinótico pode ser determinante na evolução dos sistemas precipitantes responsáveis por altos índices pluviométricos e inundações em áreas do Nordeste do Brasil (NEB). Barbosa e Correia (2005) analisaram a natureza e distribuição dos sistemas convectivos responsáveis por altos índices pluviométricos e inundações em áreas desta Região, observaram que a convergência do fluxo de umidade em baixos níveis foi fundamental para a ocorrência de convecção profunda. Foi verificado que, os sistemas convectivos intensos que se desenvolveram em junho de 1985 tiveram origem em um sistema frontal que atingiu o sul do NEB.

Marengo (2011) relata sobre os eventos de tempo severo sobre o NEB que causam transtornos à população local, como a maior enchente em vinte anos, que ocasionou danos materiais como destruição de pontes, estradas, e centenas de casas, além de perdas à agricultura.

Dois eventos de precipitação intensa em 2006, na cidade de Salvador-BA, que causaram vários tipos de problema na cidade, como deslizamento de terra, desabamento de imóveis, obstrução de rua e desabamento de muro foram analisados por Santos (2008). A evolução do cenário sinótico-dinâmico em superfície e em altitude, mostrou que o primeiro evento extremo de precipitação foi ocasionado pelo avanço de um sistema frontal austral, e o segundo por aglomerados convectivos cujo desenvolvimento na área costeira leste do NEB foi favorecido por um Distúrbio de Leste detectado no escoamento de 500 hPa.

Salvador, capital da Bahia, é uma das cidades da Região Nordeste com números mais elevados de desastres naturais. A topografia da cidade, com encostas íngremes e vales profundos, aliada à ocupação desordenada do solo, torna Salvador particularmente vulnerável a impactos adversos causados por chuvas fortes (Santos, 2008; Santos, et al., 2016). Os transtornos causados por eventos de precipitação intensa são marcas históricas da cidade, que foi fundada no alto da escarpa, em uma região litorânea e assentada ao longo da zona de influência de uma falha geológica (Santos, 2013).

Diante do exposto, o presente trabalho propõe uma contribuição ao estudo da precipitação para a cidade de Salvador, por meio da investigação do cenário sinótico-dinâmico associado a um evento climático extremo, que ocorreu em abril de 1984. O avanço no conhecimento das condições climáticas associadas à ocorrência de eventos extremos de chuva possibilita o aperfeiçoamento das previsões sazonais, fundamental para a tomada de decisão dos órgãos gestores para evitar ou minimizar a ocorrência de desastres naturais.

Material e métodos

Toda a análise climatológica para a identificação do evento extremo de abril de 1984 foi apresentada em Santos, et al., (2016). Os dados de precipitação utilizados são provenientes do banco de dados de superfície da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para cidade de Salvador (12,97°S; 38,57°W; 51,41m), onde foram analisados 51 (cinquenta e um) anos de registros mensais, compreendendo o período de 1961 a 2011.

Após uma classificação da precipitação por meio do método dos Percentis (Santos, et al., 2016), foi selecionado como evento climático extremo (ECE), o mês que apresentou o maior total pluviométrico da série observada, com o objetivo de caracterizar o cenário atmosférico e oceânico nessa situação extrema. Para isso, foram utilizados dados globais atmosféricos e oceânicos mensais, de reanálise, das componentes zonal e meridional do vento, do movimento vertical, da temperatura da superfície do mar (TSM), da pressão ao nível médio do mar (PNMM), e da radiação de onda longa (ROL), dos *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR). Esses dados abrangem o período de 1979 a 2010. A Figura 1 mostra a área das análises de grande

escala, que se estende de 45°N a 45°S de latitude, e de 180°W a 180°E de longitude.

Figura 1. Área geográfica das análises de grande escala. O ponto preto no mapa assinala a localização da cidade de Salvador-BA. As faixas limitadas pelas linhas em preto são as áreas nas quais foram obtidos valores ilustrados em seções verticais.

As variáveis foram analisadas por meio de seus valores médios mensais e respectivas anomalias, calculadas a partir de uma base climatológica de 32 anos, compreendendo o período de 1979 a 2010. Também foram analisadas as condições atmosféricas e oceânicas dos quatro meses que antecederam o ECE selecionado, para investigar a influência de condições de meses anteriores no seu desenvolvimento.

Inicialmente, foram elaborados mapas com a distribuição horizontal das anomalias de TSM e seções verticais para ilustrar a circulação anômala zonal e meridional. Na seção vertical zonal foram utilizadas as anomalias da componente zonal do vento e do movimento vertical, sendo representada a média calculada para a faixa latitudinal de 9°S a 15°S, de forma que a latitude de Salvador (12°S) está no ponto médio da faixa. Analogamente, foi selecionada a faixa longitudinal de 30°W a 50°W para obtenção das médias das anomalias da componente meridional do vento e do movimento vertical representadas nas seções verticais meridional. Este tipo de representação possibilitou diagnosticar as áreas com movimentos verticais anômalos na troposfera, tendo como ponto de referência as coordenadas geográficas de Salvador. Posteriormente, foram elaborados mapas para ilustrar as condições médias e anômalas da circulação atmosférica em níveis representativos da baixa e alta troposfera (850 e 200 hPa, respectivamente), da pressão ao nível médio do mar (PNMM), e da radiação de onda longa (ROL), uma vez que essa última variável possibilita identificar a presença de nuvens com grande desenvolvimento vertical.

Resultados e Discussão

Na série histórica de precipitação em estudo, o mês com maior volume de precipitação foi abril de 1984, com um acumulado de 889,8 mm,

caracterizando um evento climático extremo, uma vez que, a média deste mês fica em torno de 320,0 mm (Figura 2). Vale destacar que, no quadrimestre de AMJJ (abril, maio, junho e julho) de 1984, abril foi classificado como “muito chuvoso” (acima do percentil 85), enquanto que maio e junho tiveram classificação dentro do normal, e julho, “seco” (Santos, et al., 2016). Também merece destaque o fato de que os quadrimestres DJFM (dezembro, janeiro, fevereiro e março) e AMJJ de 1984 foram classificados, como “seco” e “muito chuvoso” respectivamente, (Santos, et al., 2016), sendo o último devido às chuvas de abril. No que diz respeito a TSM, Andreoli e Kayano (2006) identificaram condições neutras do ENOS e anomalias positivas no Atlântico Sul, nos trimestres DJF de 1983 – 1984 e MAM de 1984, cenário este que pode favorecer o aumento de nebulosidade sobre a região em estudo.

Figura 2. Variabilidade da precipitação na cidade de Salvador-BA no mês de abril, compreendendo o período de 1961-2011. Fonte de dados: INMET.

O volume de precipitação observado neste evento climático extremo de abril de 1984 causou, dentre outros desastres, o deslizamento de encosta que entrou para a história de grandes acidentes registrados no Brasil, com um total de 17 casos de óbitos na cidade de Salvador, conforme descrito em Rosa Filho e Cortez (2010).

Visando compreender a evolução das condições sinóticas e dinâmicas envolvidas neste evento, também foram estudados os quatro meses que o antecederam (dezembro, janeiro, fevereiro e março), com o objetivo de verificar se, condições anteriores influenciaram no elevado volume de precipitação observado em abril de 1984. Inicialmente, é feita uma discussão sobre o padrão espacial das anomalias de TSM, e a circulação anômala zonal e meridional, por meio das seções

verticais. Posteriormente, são analisadas as condições médias e anômalas da circulação atmosférica em níveis atmosféricos representativos da baixa e alta troposfera (níveis de 850 e 200 hPa, respectivamente).

Aspectos Oceânicos e da Circulação Atmosférica Zonal e Meridional

As Figuras 3 a 7 ilustram a distribuição horizontal das anomalias de TSM observadas entre dezembro de 1983 e abril de 1984, e também as seções verticais do movimento anômalo.

No mês de dezembro de 1983 foram observadas anomalias negativas de TSM ao longo de todo o Pacífico equatorial, com valores de até -2°C (Figura 3a). Dependendo do tempo de permanência, essa condição oceânica altera o padrão de circulação atmosférica zonal resultando, em geral, em movimentos ascendentes anômalos do ar sobre as Regiões Norte e Nordeste do Brasil, favorecendo a formação de nuvens. No Atlântico Sul havia duas áreas de águas mais quentes que o normal (em torno de 1°C), localizadas entre 10°S e 20°S , aproximadamente.

Na seção vertical zonal ilustrada na Figura 3b é possível observar movimentos ascendentes anômalos fracos em torno da longitude de Salvador (38°W), acima do nível de 700 hPa. Analogamente, a seção vertical meridional ilustrada na Figura 3c também mostra movimentos ascendentes anômalos fracos, em torno da latitude de Salvador (12°S), acima do nível de 850 hPa. Dois outros aspectos merecem destaque nesse campo de anomalias: (1) a subsidência forte em torno de 30°N , o que sugere maior intensidade da alta subtropical do Atlântico

Norte e (2) o movimento ascendente com intensidade de fraca a moderada, em torno de 30°S , possivelmente relacionada com o jato subtropical.

No mês de janeiro de 1984 ainda havia anomalias negativas de TSM no Pacífico equatorial, porém menos intensas (1°C abaixo da média, aproximadamente) e com área menor (Figura 4a). No Atlântico Sul, as anomalias de TSM estavam mais intensas do que em dezembro (até $1,5^{\circ}\text{C}$ acima da média), e ocupavam grande parte da área entre 10°S e 30°S . Outra área extensa de anomalias positivas (de até 1°C) é vista a partir do litoral da Região Sul, Uruguai e Argentina. Por outro lado, um extenso núcleo de anomalias negativas dominava a área central do Atlântico Sul, ao sul de 30°S .

Na seção vertical zonal permanecem movimentos ascendentes anômalos fracos em torno da longitude de Salvador (38°W), acima do nível de 700 hPa (Figura 4b). A seção vertical meridional também mostra movimentos ascendentes anômalos fracos, em torno da latitude de Salvador (12°S), acima do nível de 850 hPa (Figura 4c). Quatro outros aspectos merecem destaque nesse campo de anomalias: (1) a subsidência em torno de 30°N , com intensidade consideravelmente menor, (2) a ascendência forte, em torno de 15°N , possivelmente relacionada com o jato subtropical e processos ciclogênicos, (3) a ascendência com intensidade de fraca a moderada, ao sul de 15°N e acima de 700 hPa e (4) a subsidência moderada ao sul de 15°S . A orientação dos vetores nas áreas de ascendência indica convergência de massa em vários níveis da atmosfera nessas latitudes do Hemisfério Norte.

Figura 3. Anomalias mensais observadas em campos atmosféricos e oceânicos em dezembro de 1983, considerando: (a) distribuição horizontal relativa à temperatura da superfície do mar ($^{\circ}\text{C}$); (b) seção vertical zonal (média entre 9°S e 15°S) da componente zonal do vento (m.s^{-1}) e do movimento vertical ($50 \times 10^{-3} \text{m.s}^{-1}$); (c) seção reta vertical meridional (média entre 30°W e 50°W) da componente meridional do vento (m.s^{-1}) e do movimento vertical ($50 \times 10^{-3} \text{m.s}^{-1}$). As linhas contínuas (pontilhadas) em (a) representam valores positivos (negativos) de acordo com a escala de tons de cinza vista abaixo do mapa. A escala dos vetores em (b) e (c) é vista no lado direito de cada figura (Fonte de dados: NCEP/NCAR).

Figura 4. Idem da Figura 3 mas, para janeiro de 1984.

No mês de fevereiro, a área de anomalias negativas de TSM no Pacífico equatorial estava ainda menor quando comparada com os meses anteriores, localizando-se apenas próximo ao litoral da América do Sul, e em torno de 180°W

(Figura 5a), com valores de até -2°C na área costeira. No Atlântico Sul as anomalias positivas ocupavam quase toda a extensão oceânica costeira do continente, e avançavam até o meridiano de Greenwich numa larga faixa latitudinal centrada

em aproximadamente 15°S. Outra área com extensão longitudinal maior era vista a leste do Uruguai e do nordeste da Argentina. A presença dessas anomalias quentes em uma extensa área contínua representava um fator favorável a um maior teor de umidade da atmosfera e ao desenvolvimento de nuvens. Na área adjacente à costa oeste da África também foi observado um aquecimento, em torno de 3°C, um padrão indicativo de maior frequência de distúrbios ondulatórios de leste com propagação sobre o Atlântico Sul (Souza, 2013, comunicação pessoal). O núcleo de anomalias negativas permanecia na área central do Atlântico Sul, porém menos intenso que no mês anterior.

Na seção vertical zonal ainda permanecem movimentos ascendentes anômalos fracos em torno da longitude de Salvador (38°W), porém acima de 850 hPa e com intensidade um pouco maior em alguns níveis neste mês (Figura 5b). A seção reta vertical meridional também mostra movimentos ascendentes anômalos fracos em torno da latitude

de Salvador (12°S), com intensidade um pouco maior na baixa troposfera (Figura 5c). De maneira geral, três das principais configurações vistas na Figura 4c também são vistas nesta seção vertical, mas abrangem uma faixa latitudinal maior e/ou estão deslocadas para sul: (1) a ascendência forte, em torno de 15°N, possivelmente relacionada com o jato subtropical e processos ciclogênicos, atinge latitudes ao sul de 15°N, (2) a área de movimentos ascendentes anômalos vista no mês anterior ao sul de 15°N e acima de 700 hPa, está centrada no equador e se estende sobre latitudes austrais na baixa troposfera, características que indicam relação com a ZCIT, e (3) a subsidência moderada situada ao sul de 15°S na Figura 4c está centrada em 30°S e muito intensa, indicando a presença de uma circulação anticiclônica anômala forte em latitudes subtropicais. Vale destacar ainda neste mês a presença de movimentos descendentes (moderados entre 1000 e 850 hPa, e fracos acima) entre as duas áreas de movimentos ascendentes mencionadas acima.

Figura 5. Idem da Figura 3 mas, para fevereiro de 1984.

O campo das anomalias de TSM do mês de março é, semelhante ao de fevereiro na área do Pacífico equatorial (Figura 6a). Em contrapartida, no Atlântico Sul destaca-se uma área contínua de anomalias positivas com extensão menor do que no mês anterior e configuração zonal, se estendendo da América do Sul à África, centrada em torno de 15°S. Permanecem as anomalias quentes mais elevadas próximo à costa oeste da África. Anomalias negativas são vistas em duas pequenas áreas do Atlântico subtropical.

Na seção vertical zonal são evidentes os movimentos ascendentes, de fracos a moderados, que ocupam quase toda a faixa longitudinal entre 60°W e o meridiano de Greenwich, notadamente em 700 hPa e nos níveis acima (Figura 6b). Movimentos ascendentes mais fortes e organizados também são vistos na seção vertical meridional, entre o equador e 15°S, também em 700 hPa e nos níveis acima (Figura 6c). O desenvolvimento desse padrão de movimentos ascendentes anômalos, indicativo da atuação da ZCIT ao sul do equador,

foi favorecido pela superfície oceânica anormalmente quente do Atlântico Sul, observada desde janeiro de 1984. Outra característica marcante é a área de movimentos descendentes intensos centrados próximo de 30°N, característicos de uma anomalia anticiclônica forte. Uma estrutura semelhante, porém, com intensidade

e extensão latitudinal consideravelmente menor, é ilustrada pela Figura 3c de dezembro de 1983. Contrastando com o mês de fevereiro, os movimentos descendentes centrados em torno de 30°S são de fracos a moderados, em toda a coluna atmosférica.

Figura 6. Idem da Figura 3 mas, para março de 1984.

No mês do evento climático extremo em Salvador, abril de 1984 (Figura 7), as anomalias negativas de TSM no Pacífico equatorial se restringiam a sua porção centro-oeste, com valores de até -1°C. No Atlântico Sul, a área de anomalias positivas diminuiu consideravelmente, restringindo-se à área oceânica próxima ao continente africano, com valores de até 2°C. Outra diferença marcante em relação ao mês anterior é a extensa área de anomalias negativas que ocupa grande parte do Atlântico subtropical, ao sul de 25°S.

Apesar das mudanças no campo das anomalias de TSM, a seção vertical zonal apresenta movimentos ascendentes mais intensos, porém em uma faixa longitudinal mais estreita, entre 20°W e 50°W, aproximadamente. Movimentos ascendentes mais intensos que em março também são vistos na seção reta meridional, ao norte de 15°S, um indicativo da atuação da ZCIT ao sul do equador. Movimentos descendentes moderados são vistos próximo de 30°S.

Figura 7. Idem da Figura 3 mas, para abril de 1984.

Análise sinótica

Dezembro de 1983

Na análise do campo médio do vento em 200 hPa nota-se a configuração do Cavado do Nordeste (CN), com eixo estendido desde o norte da Região Amazônica, passando pelo Nordeste brasileiro, até o Atlântico adjacente (Figura 8a). Observa-se ainda uma área de circulação anticiclônica, com centro posicionado em torno de $10^{\circ}\text{S}/70^{\circ}\text{W}$. Esta circulação representa a Alta da Bolívia (AB), sistema meteorológico típico da alta troposfera no verão do Hemisfério Sul. Na interface entre os dois sistemas (CN e AB), é possível perceber uma área de difluência. Essa difluência na alta troposfera favorece confluência em superfície, o que resulta em convergência de massa, e possível formação de nuvens. Na Figura 8b, que ilustra a anomalia do vento em 200 hPa, destaca-se uma circulação ciclônica intensa sobre o centro-sul do América do Sul. Rocha (2012) também encontrou um ciclone anômalo, no mês de dezembro de 2005, em seu estudo do evento extremo de abril de 2006, outro mês classificado como “muito chuvoso”. Entretanto, nesse caso o ciclone anômalo estava centrado sobre a área oceânica próximo da Argentina. Outra área bem configurada de anomalias é a da circulação (anticiclônica) sobre o Atlântico subtropical. Os ventos anômalos de leste na faixa equatorial do Atlântico Sul indicam o enfraquecimento do escoamento de oeste e, consequentemente, do CN.

A Figura 8c ilustra a circulação atmosférica média no nível de 850 hPa, evidenciando a atuação dos anticlones

subtropicais. Nota-se também a confluência dos ventos alísios sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico equatorial, representando a área de atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Sobre o continente Sul Americano, o escoamento é canalizado pela Cordilheira dos Andes e muda para noroeste, definindo uma área de confluência sobre o Centro-oeste e o Sudeste, indicativa da atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Os ventos anômalos na região da América do Sul são, de maneira geral, fracos, mas sua orientação indica ventos alísios mais intensos na área costeira leste do Brasil (Figura 8d). Há confluência anômala na área litorânea do Sudeste. Destaca-se também o cavado com ventos fortes associados na área subtropical do Atlântico Sul.

No campo médio da pressão ao nível médio do mar é evidente o domínio de pressão relativamente baixa na América do Sul e de um cavado de pequena amplitude no centro-leste do continente, indicativo da localização da ZCAS (Figura 8e). Também é possível observar a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), com núcleo de 1020 hPa, centrado em torno de $30^{\circ}\text{S}/10^{\circ}\text{W}$. Neste mês, a Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) também atuou com núcleo de 1020 hPa, centrado em torno de $35^{\circ}\text{S}/85^{\circ}\text{W}$. As anomalias indicam que a pressão esteve abaixo da média na ASPS e acima da média na área da América do Sul e em quase todo o Oceano Atlântico, indicando o enfraquecimento da baixa pressão continental e a intensificação da ASAS e da Alta Subtropical do Atlântico Norte (ASAN) (Figura 8f).

No campo da Radiação de Onda Longa (ROL), os valores abaixo de 240 Wm^{-2} , indicativos da presença de nebulosidade convectiva, são vistos em uma área alongada, com orientação noroeste/sudeste, que se estende da Amazônia ao Atlântico subtropical (Figura 8g). Essa área pode ser associada à ZCAS, não só pela orientação como também pelo padrão da pressão ao nível médio do mar (PNMM) e do vento em baixos e altos níveis

da troposfera. Vale destacar sobre o continente os valores entre 180 Wm^{-2} e 200 Wm^{-2} (associados com convecção profunda). No campo das anomalias há valores negativos de até -50 Wm^{-2} sobre parte das Regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, além do noroeste do continente, indicando nebulosidade acima da média nessas áreas (Figura 8h).

Figura 8. Campos atmosféricos médios observados em dezembro de 1983, considerando: (a) Linhas de corrente e velocidade (ms^{-1}) do vento em 200 hPa; (b) anomalia do vento (ms^{-1}); (c) Linhas de corrente e velocidade (ms^{-1}) do vento em 850 hPa; (d) anomalia do vento (ms^{-1}). A magnitude do vento é vista em escala de cinza abaixo do mapa para (a) e (c); (e) pressão ao nível médio do mar (hPa); (f) anomalia (hPa); (g) radiação de onda longa (Wm^{-2}); e (h) anomalia (Wm^{-2}). As anomalias foram calculadas em relação ao período 1979 – 2010. (Fonte de dados: NCEP/NCAR).

Janeiro de 1984

Neste mês o campo médio do vento em 200 hPa também evidencia o CN, com eixo estendido sobre o Amapá, nordeste do Pará, Nordeste e Atlântico adjacente, onde se acopla a um Vórtice

Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), centrado sobre a área oceânica ao leste do Nordeste (Figura 9a). Essa configuração sugere que a área de Salvador é influenciada pela periferia oeste do VCAN. Tipicamente, movimentos ascendentes

(descendentes) predominam na periferia (área central) dos VCAN. No campo das anomalias há indicação de uma circulação oposta à do VCAN (Figura 9b), o que pode ter contribuído para os movimentos fracos vistos nas seções verticais da Figura 4. Ainda na Figura 9a, é evidente a predominância da circulação da AB sobre grande parte do continente sul-americano, centrada ao sudeste de sua posição climatológica. Uma circulação anticiclônica anômala, localizada ao sul de 15°S e centrada ao leste do Uruguai, é responsável pela subsidência moderada vista na Figura 4c.

A Figura 9c ilustra a circulação atmosférica média no nível de 850 hPa. Nota-se o escoamento de leste na área equatorial do Atlântico, que muda para nordeste no norte da América do Sul. No oeste dessa área os ventos são de noroeste devido à presença da Cordilheira dos Andes. A configuração do escoamento sugere confluência no centro-norte do continente, uma condição que, aliada ao calor e umidade da região, representam condições dinâmicas e termodinâmicas favoráveis à formação de nuvens. No campo das anomalias há ventos de sudoeste moderados no noroeste da Amazônia, ventos de sudeste (fracos a moderados) sobre o Nordeste e o Centro-Oeste, e ventos fortes de noroeste sobre o Paraguai, Uruguai e Região Sul (Figura 9d). Destaca-se também o cavado com ventos fortes associados na área subtropical do Atlântico Sul e a circulação anticiclônica intensa em latitudes subtropicais do Atlântico Norte.

No campo médio da pressão ao nível médio do mar (Figura 9e) ainda é possível observar o domínio de pressão relativamente baixa sobre a

América do Sul e de um cavado de pequena amplitude sobre o centro-leste do continente, na periferia oeste da ASAS, que apresenta pressão central de 1018 hPa, próximo de 0°. A ASPS está bem configurada, com núcleo de 1020 hPa, centrado em 35°S/90°W, aproximadamente. O campo das anomalias indica que a ASAS e a ASPS tem pressão abaixo da média, enquanto que a ASAN e a Alta Subtropical do Pacífico Norte (ASPN) estão mais intensas (Figura 9f). Como seria de esperar, esse padrão de anomalias está diretamente relacionado com o do nível de 850 hPa (Figura 9d).

No campo da ROL os valores são inferiores a 240 Wm⁻² sobre toda a América do Sul, ao norte de 30°S, com exceção da Colômbia, Venezuela, metade leste do NEB e parte do Sudeste, e também sobre o centro-oeste do Atlântico Norte equatorial, área de atuação da ZCIT (Figura 9g). Vale destacar ainda que no centro-oeste do continente há uma área extensa de valores inferiores a 200 Wm⁻² que indicam a presença de nuvens convectivas profundas, padrão típico do verão. Essa distribuição de valores também pode ser associada ao padrão de ventos em baixos níveis (850 hPa) e à difluência em altitude (200 hPa), como comentado anteriormente. O campo das anomalias apresenta valores abaixo da média sobre o norte do continente e em uma banda alongada no sentido noroeste-sudeste, que se estende do Peru ao sul do Brasil (Figura 9h). No leste do NEB e em parte do Sudeste a ROL apresenta valores acima da média, representando assim, uma menor quantidade de nuvens nesse mês.

Figura 9. Idem da Figura 8 mas, para janeiro de 1984.

Fevereiro de 1984

No campo médio do vento em 200 hPa ilustrado na Figura 10a, a circulação anticiclônica da AB está bem configurada e mais deslocada para sudeste (em relação ao mês anterior) em comparação com a climatologia. Destaca-se também, a permanência do VCAN, com núcleo posicionado entre a faixa leste do NEB e o Atlântico adjacente, ao norte de 15°S. Da mesma forma que em janeiro, que também apresenta o VCAN (Figura 9a), espera-se pouca nebulosidade na sua área central, enquanto que nuvens convectivas profundas organizadas podem ser encontradas na sua periferia. Também como na análise do mês anterior, este sistema é parte integrante do eixo de um cavado que atua no extremo norte da América do Sul, da Venezuela ao NEB. De maneira geral, na região do continente sul-americano a circulação anômala em 200 hPa é semelhante à de janeiro (Figura 10b), com destaque para o anticiclone centrado ao leste do Uruguai, cujos ventos fortes de leste na área continental

indicam o enfraquecimento do escoamento de oeste nessas latitudes e, conseqüentemente, o posicionamento anômalo da AB.

A análise conjunta dos campos médio e anômalo do vento em 850 hPa (Figuras 10c e 10d) indica que as altas subtropicais estão mais/menos intensas em determinadas áreas nesse mês de fevereiro. A ASAS é um exemplo; ela apresenta um núcleo na área oceânica adjacente às Regiões Sul e Sudeste (Figura 10c), onde um anticiclone anômalo está centrado (Figura 10d). Por outro lado, ao leste desse anticiclone há ventos anômalos de sudoeste, oeste, noroeste, configurando um cavado na área de atuação da ASAS. Dessa forma, o setor oeste (leste) da ASAS se apresenta intensificado (enfraquecido). De maneira geral, isso também pode ser observado em relação à ASPS, à ASAN e à Alta Subtropical do Índico. No campo médio esses sistemas se apresentam subdivididos em dois núcleos (Figura 10c).

Na Figura 10e, que ilustra o campo médio da pressão ao nível médio do mar (PNMM), é mais

evidente o que foi discutido no parágrafo anterior devido à presença de dois núcleos de alta pressão na área de atuação da ASAS, da ASPS e da Alta Subtropical do Índico. No caso da ASAS nota-se um núcleo sobre o setor oeste do Atlântico Sul subtropical, em torno de 30°S, e outro núcleo em torno do meridiano de Greenwich. De maneira geral, a localização dos núcleos de alta pressão no hemisfério sul coincide com a posição das anomalias positivas da PNMM vistas na Figura 10f. Sobre o centro-sul do continente, e demais áreas do Atlântico Sul, os valores de pressão são abaixo da média.

Semelhantemente ao observado em janeiro (Figura 9g), o campo médio da ROL apresenta valores inferiores a 240 Wm⁻² sobre a maior parte do continente, ao norte de 30°S, e também sobre o centro-oeste do Atlântico Norte equatorial (Figura

10g). Entretanto, neste mês a ROL acima de 240 Wm⁻² ocupa uma área mais extensa do NEB, do Sudeste e do extremo norte do continente, o que é evidente no campo médio (Figura 10g). No centro-oeste do continente, há uma área extensa de valores inferiores a 200 Wm⁻² que indicam a presença de nuvens convectivas profundas, padrão típico do verão, associado à área de difluência entre a AB e o CN (VCAN). Além disso, destaca-se que os valores elevados (e anomalias positivas) da ROL no NEB estão relacionados com o posicionamento do núcleo do VCAN ilustrado na Figura 10a. Ainda no campo das anomalias, valores negativos são vistos em áreas do norte do continente e em uma banda alongada no sentido noroeste-sudeste, que se estende do Peru ao Uruguai e sul do Brasil (Figura 10h).

Figura 10. Idem da Figura 8 mas, para fevereiro de 1984.

Março de 1984

Contrastando com janeiro e fevereiro, em março o VCAN não é observado sobre o leste do NEB e Atlântico adjacente no campo médio do vento em 200 hPa (Figura 11a). Por outro lado, é possível observar o CN, com eixo inclinado na direção noroeste-sudeste sobre o extremo norte da América do Sul e área oceânica a leste do NEB. Outra dessemelhança está relacionada com a AB, que se apresenta ao noroeste da posição ocupada no mês anterior, uma posição mais próxima da climatologia. Nessa configuração a área de difluência entre o CN e a AB atua sobre parte do NEB, favorecendo o levantamento e a instabilidade do ar nessa área. Esse levantamento se reflete nas anomalias encontradas nas proximidades de Salvador na Figura 6b e 6c. Outro padrão relevante nesse campo é o par de anticiclones centrado na África, cuja circulação se estende sobre o Atlântico. Na área de transição entre esses sistemas há difluência, o que induz movimentos ascendentes do ar e formação de nuvens. É importante observar que o anticiclone do norte da África não está presente em janeiro (Figura 9a) e fevereiro (Figura 10a). Outro par de anticiclones é visto dominando o oeste do Pacífico, a Austrália, a Oceania e o leste do Índico. No campo das anomalias há circulações anticiclônicas bem configuradas nessa área e também no norte da África (Figura 11b). Por outro lado, permanece o anticiclone anômalo na área da América do Sul, agora deslocado para noroeste e com centro no estado de São Paulo, aproximadamente. Esse sistema favoreceu o posicionamento da AB ilustrado no campo médio (Figura 11a). Corrente abaixo, ao sul de 30°S, há uma nova configuração: um cavado cujo eixo está meridionalmente alinhado ao longo de 30°W.

O campo da circulação média em 850 hPa indica que o ASAS atua com menor intensidade sobre a América do Sul, enquanto que a circulação da ASPS está melhor definida (Figura 11c). No norte da África e no Atlântico equatorial a confluência é evidente, o que favorece os movimentos ascendentes e a formação de nuvens. Essa configuração na baixa troposfera, aliada àquela discutida para a alta troposfera, possibilita a

presença de uma ZCIT intensa conforme indicado pelas anomalias na seção reta vertical da Figura 6c. A menor intensidade da ASAS fica mais evidenciada através do campo das anomalias devido à circulação ciclônica que atua sobre o centro-leste do continente e o oeste do Atlântico (Figura 11d), uma indicação de confluência anômala nessa área.

No campo médio da pressão ao nível médio do mar (Figura 11e) é possível observar a ASAS com centro ao leste do meridiano de Greenwich. O enfraquecimento desse sistema, evidenciado pela área de anomalias negativas da PNMM na Figura 11f, e pelo cavado anômalo visto na Figura 11d, explica essa nova posição. A ASPS tem configuração semelhante a do mês de fevereiro, com núcleo de 1020 hPa, centrado ao sul de 30°S e em torno de 90°W. No norte da África, as anomalias negativas indicam a intensidade acima da média do centro de baixa pressão situado nessa área (Figura 11e e 11f).

O campo médio da ROL apresenta três características que são distintas daquelas observadas nos dois meses anteriores (Figuras 9g e 10g), em relação aos valores inferiores a 240 Wm⁻²: (1) eles são vistos em todo o NEB, à exceção de uma estreita faixa no leste da região, (2) na África, eles se estendem para noroeste sobre o continente, cruzando o equador, e (3) eles cobrem uma faixa zonalmente orientada que se estende sobre o Atlântico equatorial, da América do Sul à África (Figura 11g). Em particular, valores inferiores a 220 Wm⁻² cobrem grande parte do NEB e a área oceânica adjacente ao litoral norte da região. É importante observar que essas mudanças foram provocadas pelas alterações nos padrões de circulação discutidas anteriormente. No campo das anomalias, os valores negativos na área do Atlântico indicam maior atividade convectiva na ZCIT (Figura 11h). Outro aspecto importante relacionado com esse campo é a ausência de valores positivos de ROL vistos em janeiro (Figura 9h) e fevereiro (Figura 10h) no leste do NEB, o que indica cobertura de nuvens dentro da média na região de Salvador.

Figura 11. Idem da Figura 8 mas, para março de 1984.

Abril de 1984 (evento climático extremo)

O campo médio de vento em 200 hPa evidencia a AB posicionada ao norte de 15°S, sobre a área central do continente, com a sua periferia leste influenciando o NEB (Figura 12a). Paralelamente, permanece o par de anticiclones centrado na África, cuja circulação se estende sobre o Atlântico. Dessa forma, continua o padrão de difluência identificado nessas áreas no mês anterior (Figura 11a). Entretanto, os movimentos anômalos ilustrados nas seções retas verticais da Figura 7 indicam que esse padrão se acentuou, já que a ascendência é mais forte na região de Salvador, em comparação com o mês anterior (Figura 6). Também permanece o par de anticiclones do oeste do Pacífico, Austrália, Oceania e leste do Índico, embora com menor intensidade e mudança na posição central, conforme indicam as anomalias na Figura 12b. Ainda no campo das anomalias, destaca-se a circulação anticiclônica que se estende

sobre o Sudeste, o Sul e o Atlântico Sul, até o meridiano de Greenwich. O conjunto de análises discutido a seguir indica que essa anomalia está presente em toda a troposfera, até o nível médio do mar, ao sul de 30°S. Na faixa latitudinal entre o equador e 15°S, os ventos são de leste ou leste-sudeste, com velocidade entre 5ms⁻¹ e 10ms⁻¹, sobre a América do Sul, África e Atlântico. Esses ventos anômalos também são vistos em março (Figura 11b), e sobre a África e o Atlântico em janeiro (Figura 9b) e fevereiro (Figura 10b).

O campo médio da circulação atmosférica em 850 hPa indica que a circulação associada às altas subtropicais do Pacífico e Atlântico ocupa uma área maior e é mais intensa neste mês (Figura 12c), em comparação com março (Figura 11c), à exceção da ASAN. No campo das anomalias, é possível identificar circulações anticiclônicas nessas áreas (Figura 12d). Em particular, merece destaque o centro anticiclônico que domina o

litoral leste do Brasil, e o litoral do Uruguai e do norte da Argentina, e que se estende até o meridiano de Greenwich, apresentando ventos de sudeste de intensidade moderada no Sudeste e no sul do NEB (Figura 12d). A presença desses ventos representa um fator que pode ter contribuído para o aumento da advecção de umidade do oceano para o continente, o que contribuiria para o elevado total pluviométrico de Salvador nesse mês. Outro fator seria as anomalias de temperatura acima de $0,5^{\circ}\text{C}$ na superfície do Atlântico Sul tropical, no período de janeiro a março (Figuras 4a, 5a e 6a), o que favoreceria o aumento da evaporação e, consequentemente, um maior teor de umidade do ar sobre essa superfície oceânica. Ainda no campo médio, permanece a confluência no norte da África e no Atlântico equatorial (também presente no campo das anomalias), o que favorece os movimentos ascendentes e a formação de nuvens (Figura 12c). Semelhantemente ao mês anterior, essa configuração na baixa troposfera, aliada àquela discutida para a alta troposfera, possibilita a presença de uma ZCIT intensa conforme indicado pelas anomalias na seção vertical da Figura 7c.

No campo médio da pressão ao nível médio do mar a ASAS se apresenta mais intensa, com núcleos de 1020 hPa, em torno de 35°S (Figura 12e). A ASPS, também mais intensa, com núcleo de 1022 hPa, está centrada em torno de

$35^{\circ}\text{S}/80^{\circ}\text{W}$. Essas altas têm pressão central acima da média do período, conforme comprovam as anomalias positivas na Figura 12f. O oposto é visto na área da ASAN. No norte da África, a configuração do campo médio se assemelha à do mês anterior, o que implica em que não houve grandes mudanças na área do centro de baixa pressão (Figura 12e e 12f).

No campo médio da ROL, a área com valores inferiores a 240 Wm^{-2} se apresenta deslocada para norte sobre os continentes sul-americano e africano (Figura 12g), enquanto que sobre o Atlântico há valores de ROL mais baixos (inferiores a 220 Wm^{-2}), em comparação com o mês anterior (Figura 11g). Esses valores sobre o Atlântico indicam maior atividade convectiva na área da ZCIT. Um aspecto fundamental do campo médio é a presença da ROL inferior a 240 Wm^{-2} na região de Salvador. No campo das anomalias uma área negativa zonalmente orientada se estende por todo o Atlântico, cobrindo também grande parte das regiões Norte, Nordeste, e Centro-oeste do Brasil (Figura 12h). Essa área de anomalias negativas sugere que a interação da ZCIT com sistemas de escala sinótica e sub-sinótica, que atuaram de forma frequente e persistente, favoreceu a intensificação e organização da convecção na região de Salvador.

Figura 12. Idem da Figura 8 mas, para abril de 1984.

Conclusão

O presente trabalho abordou o estudo da precipitação, associada às condições climáticas, em uma área propícia à ocorrência de desastres naturais no Nordeste do Brasil: Salvador, capital do estado da Bahia. O resultado da análise mensal possibilitou identificar o extremo climático com o total pluviométrico mensal mais elevado: abril de 1984.

No mês de abril de 1984, a difluência associada à Alta da Bolívia posicionada ao norte de 15°S na área central da América do Sul favoreceu o levantamento do ar no leste do Nordeste do Brasil. Um fator adicional foi a atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul com intensidade acima da média. Uma hipótese a ser verificada, relacionada com a alta, é a de que o transporte de umidade para o continente foi acima da média nesse mês, devido a ventos alísios mais intensos, e a um maior teor de umidade na atmosfera proporcionado por temperaturas anormalmente

quentes na superfície do Atlântico Sul em meses anteriores. Assim, condições dinâmicas propícias na alta e baixa troposfera, em conjunto com uma estrutura termodinâmica favorável, teriam propiciado o levantamento na coluna de ar abaixo de 200 hPa e a formação de nebulosidade convectiva profunda.

O volume de chuva observado nesse evento climático extremo causou, dentre outros desastres, o escorregamento que entrou para a história de grandes acidentes ocorridos no Brasil, principalmente pelas dezessete mortes registradas em Salvador.

O avanço no conhecimento das condições climáticas associadas à ocorrência de eventos extremos de chuva, possibilita o aperfeiçoamento das previsões sazonais, fundamental para a tomada de decisão dos órgãos envolvidos em evitar ou minimizar desastres naturais. O presente trabalho representa uma contribuição nesse sentido.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado concedida ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da UFCG e a Dra. Werônica Meira pelas valiosas contribuições.

Referências

- Andreoli, R. V., Kayano, M. T., 2006. Tropical Pacific and South Atlantic effects on rainfall variability over northeast Brazil. *International Journal of Climatology* 26, 1895-1912.
- Barbosa, T. F., Correia, M. F., 2005. Sistemas Convectivos Intensos no Semi-Árido Brasileiro: O Controle da Grande Escala. *Revista Brasileira de Meteorologia* 20, 395-410.
- Changnon A. S., 1996. *The Great Flood of 1993: Causes, Impacts, and Responses*. Westview Press, Boulder.
- Kobiyama, M., Mendonça, M., Moreno, D. A., Marcelino, I. P. V. O., Marcelino, E. V., Gonçalves, E. F., Brazetti, L. L. P., Goerl, R. F., Moller, G. S. F., Rudorff, F. M., 2006. *Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos*. Organic Trading, Curitiba.
- Marcelino, E. V., 2008. Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos. Disponível: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.02.16.22/doc/publicacao.pdf>. Acesso: 08 set. 2011.
- Marengo, J. A., 2011. Mudanças climáticas, Condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil. Disponível: <http://www.fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-504.pdf>. Acesso: 21 mar. 2012.
- Rocha, F. G., 2012. *Evolução Temporal de Padrões Atmosféricos em Ano Chuvoso na Cidade de Salvador*. Dissertação (Mestrado). Campina Grande, UFCG.
- Rosa Filho, A., Cortez, A. T. C., 2010. A Problemática Sócioambiental da Ocupação Urbana em Áreas de Risco de Deslizamento da “Suíça Brasileira”. *Revista Brasileira de Geografia Física* 3, 33-40.
- Santos, A. H. M., 2008. *Eventos Extremos de Chuva em Salvador, Bahia: Condições Atmosféricas e Impactos Ambientais*. Dissertação (Mestrado). Campina Grande, UFCG.
- Santos, E. P., Correia, M. F., Silva Aragão, M. R., Silva, F. D. S., 2011. Eventos extremos de chuva e alterações no regime hidrológico da bacia hidrográfica do Rio São Francisco: uma aplicação do índice RAI (rainfall anomaly index). *Engenharia Ambiental* 8, 315-330.
- Santos, A. P. P., 2013. *Precipitação na Cidade de Salvador: Classificação em Quantis e Análise de um Evento Climático Extremo*. Dissertação (Mestrado). Campina Grande, UFCG.
- Santos, A. P. P., Aragão, M. R. S., Correia, M. F., Santos, S. R. Q., Silva, F. D. S., Araújo, H. A., 2016. Precipitação na Cidade de Salvador: Variabilidade Temporal e Classificação em Quantis. *Revista Brasileira de Meteorologia* 31, 454-467.