



**Análise de Tempo-Frequência de Alta Resolução da
Precipitação no Sudeste do Brasil Usando Técnica de Ondeleta**
High-Resolution Time-Frequency Analysis of the
Precipitation in Southeast Brazil Using Wavelet Technique

Edicarlos Pereira de Sousa¹; Célia Campos Braga²;
Vicente de Paulo Rodrigues da Silva²; Wanessa Luana de Brito Costa² & Maria Isabel Vitorino³

¹ Universidade Federal do Cariri, Instituto de Formação de Educadores,
Rua Olegário Emídio de Araújo, S/N, 63260-000, Centro, Brejo Santo, CE, Brasil

² Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas,
Rua Aprígio Veloso, 882, 58429-900, Bairro Universitário, Campina Grande, PB, Brasil

³ Universidade Federal do Pará, Faculdade de Meteorologia, Avenida Augusto Correia, 01, 66075-110, Guamá, Belém, PA, Brasil

E-mails: edicarlos.pereira@ufca.edu.br; celiadca@hotmail.com;
vicente.paulo@ufcg.edu.br; wanessaluanabc@hotmail.com; vitorino@ufpa.br

Recebido em: 17/04/2019 Aprovado em: 18/06/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_558_567

Resumo

Este estudo objetiva analisar o sinal da precipitação (PRP) e da radiação de onda longa (ROL) em diferentes escalas de tempo-frequência, a partir da técnica matemática da Transformada de Ondeletas (TO) no estado de Minas Gerais. Utilizaram-se séries de dados diários de PRP e ROL no período de 2003 a 2012 de distintas regiões homogêneas (RH) previamente determinadas. A técnica da TO aplicada a séries diárias possibilitou decompor o sinal da PRP em várias escalas de tempo, identificando oscilações subsazonais dos fenômenos em escala de alta frequência, associando-os com a ocorrência de eventos sinóticos que influenciaram as volumosas chuvas no estado, principalmente nos anos de 2010, 2011 e 2012. Os resultados mostraram que a escala dominante é de aproximadamente dez dias, interagindo com escalas menores e maiores no final da primavera e verão austral para todas as localidades estudadas. Nesse período, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) e a Oscilação de Madden-Julian (OMJ) foram os principais sistemas responsáveis pelas chuvas. Além disso, a técnica evidenciou oscilações em escalas menores que dez dias, no verão 2011/2012, possivelmente associados a sistemas meteorológicos de curto prazo, ou seja, os sistemas transientes em geral.

Palavras-chave: Oscilação Atmosférica; ROL; Minas Gerais

Abstract

This study aims to analyze the precipitation signal (PRP) and outgoing long-wave radiation (OLR) at different time-frequency scales, from the mathematical technique of the Wavelet Transform (WT) in the state of Minas Gerais. Daily PRP and OLR data series were used between 2003 and 2012 of previously defined homogeneous regions (HR). The WT technique applied to daily series made it possible to decompose the PRP signal at various timescales, identifying subseasonal oscillations of phenomena in high-frequency scale, associating them with the occurrence of synoptic events which most influenced the heavy rains in the state, especially in the years 2010, 2011 and 2012. The results showed that the dominant scale is approximately ten days, interacting with smaller and larger scales in late spring and austral summer for all studied locations of the state. In this period, the South Atlantic Convergence Zone (SACZ), South American Monsoon Systems (SAMS) and Madden-Julian Oscillation (MJO) were the main systems responsible for heavy rains. In addition, the technique evidenced oscillations in scales less than ten days, in summer 2011/2012, possibly associated with short-term meteorological systems, i.e., transient systems in general.

Keywords: Atmospheric Oscillation; OLR; Minas Gerais



1 Introdução

O estado de Minas Gerais apresenta clima predominante tropical e tropical de altitude, com território inteiramente planáltico e fortes chuvas, tornando-o, muitas vezes, suscetível a diversos transtornos e deixando a população sujeita a catástrofes e perdas irreparáveis. A precipitação (PRP) é uma das variáveis meteorológicas mais importantes e, por isso, estudos que analisam a variabilidade na distribuição das chuvas produzem informações fundamentais que podem ser usadas para melhorar as estratégias de proteção do meio ambiente, na previsão de enchentes e secas, no planejamento agrícola, na investigação de cenários de mudanças climáticas, dentre outros aspectos (Gocic & Trajkovic, 2013). Investigar a frequência de ocorrência de precipitação, associando os fenômenos físicos inibidores ou responsáveis e os riscos climáticos decorrentes, numa determinada região, é de fundamental importância na conjectura atual. A Análise de Ondeletas é uma ferramenta relevante e precisa em estudos de sinais não estacionários, como é o caso da precipitação e de outras variáveis, permitindo identificar as principais periodicidades de uma série de dados e a sua evolução no tempo (Torrence & Compo, 1998; Morettin, 1999; Vitorino *et al.*, 2006; Echer *et al.*, 2008). Torrence & Compo (1998) aplicaram a análise de ondeletas a séries temporais do El Niño Oscilação Sul e compararam a Transformada de Ondeletas (TO) com a Transformada Janelada de Fourier (TJF), mencionando a importância da escolha da função de ondeleta base adequada à natureza da variável a ser estudada, bem como a relação entre a escala de ondeleta e a frequência de Fourier. A partir de então, houve um grande avanço da técnica e de sua aplicação a diferentes variáveis meteorológicas visando detectar, em diferentes escalas de tempo-frequência, o comportamento das variáveis responsáveis pelas variações do clima.

Devido à natureza irregular dos sinais da precipitação, a análise de tempo-frequência revela características espectrais em função do tempo e da escala predominante. As ondeletas são capazes de caracterizar e detectar, em uma série de dados, valores extremos locais, como uma função de tempo e duração, alongando-se ou comprimindo-se ao longo do tempo (Nakken, 1999).

Chen *et al.* (2011) aplicaram a TO para o estudo da variabilidade da chuva mensal na bacia do rio *Dongjiang*, sul da China. Os resultados indicam que a precipitação, na área pesquisada, é controlada principalmente pelas monções do Sudeste Asiático. Braga *et al.* (2014) aplicaram a TO para analisar e diagnosticar a variabilidade da precipitação mensal no estado da Paraíba, relacionando-a com regiões monitoradas da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Pacífico equatorial e Atlântico tropical. O espectro global da TO mostrou que o ciclo anual é predominante em todas as regiões do Estado. Oliveira *et al.* (2015) utilizaram a TO para o estudo de diferentes variáveis meteorológicas na Amazônia oriental. Os autores observaram que o escalograma de fase da TO mostrou que radiação de onda longa, temperatura média, temperatura máxima e insolação eram influenciadas pela convecção e apresentavam diferenças importantes entre cada fase da Oscilação de Madden-Julian. Santos (2016) usou a TO para estudar a variabilidade da chuva no estado da Bahia e sua relação com os mecanismos atmosféricos que atuam na região. Sousa (2016) também aplicou a TO em séries temporais mensais de precipitação e radiação de onda longa (ROL) para encontrar oscilações importantes no sinal dessas variáveis em diferentes escalas de tempo no estado de Minas Gerais. A técnica evidenciou que existe relação importante entre a chuva e os fenômenos atmosféricos que atuam na região, a exemplo da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). O trabalho de Nogués-Paegle *et al.* (2002) mostrou que o Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) e, conseqüentemente, a ZCAS desenvolvem-se durante a primavera, atingido o máximo no verão austral quando ocorrem grandes volumes de chuva na região central do Amazonas e sudeste do Brasil. Grimm (2011) relata que a ZCAS está relacionada com o Sistema de Monção da América do Sul. Assis *et al.* (2013) verificaram a passagem de frentes frias sobre Belo Horizonte, acompanhadas por turbulências, fortes mudanças na direção e velocidade do vento e, normalmente, precipitações intensas, especialmente quando associadas a atuação da ZCAS.

A ZCAS é um fenômeno atmosférico que desempenha papel fundamental no regime pluviométrico da América do Sul, estendendo-se desde o sul

da Amazônia, centro-oeste, sudeste e sul da Bahia, atuando diretamente nas chuvas no final da primavera e verão austral, principalmente no Brasil, sendo responsável por intensos e persistentes períodos de precipitações (Ferreira *et al.*, 2004). Recentemente, Nielsen *et al.* (2019) estudaram a caracterização dos diferentes tipos de ZCAS, com base em sua posição e diferenças na dinâmica analisada a partir de dezenove períodos durante o SMAS. Os autores concluíram que a previsibilidade da precipitação associada a eventos de ZCAS é importante em algumas regiões do Brasil e que os dias com ocorrência dessa banda de nebulosidade sempre foram iguais ou mais frequentes do que aqueles sem sua atuação, mostrando que os episódios de ZCAS têm concordância com o SMAS.

Neste trabalho, buscou-se usar uma técnica que fosse capaz de detectar e analisar o sinal de alta frequência da PRP e ROL em Minas Gerais com o propósito de mostrar, em diferentes escalas de tempo, os sistemas meteorológicos que impactam diretamente no regime de chuva da região. Para isso, aplicou-se a TO a séries diárias de PRP e ROL no período de 2003 a 2012 em cada região homogênea (RH) da PRP de Minas Gerais obtida por Sousa (2016). Para definição do período de estudo, foram consideradas as observações de eventos intensos de chuva entre 2010 e 2012. Assim, objetivando entender melhor as causas que provocaram essas chuvas intensas, fez-se um realce no escalograma de fase da PRP e da radiação de onda longa diária, a fim de precisar os sistemas atmosféricos que mais contribuíram para provocar essas chuvas no período analisado.

2 Material e Métodos

2.1 Área de Estudo

O estado de Minas Gerais localiza-se na região Sudeste do Brasil, entre os paralelos de 14,23° e 22,90° de latitude sul e entre os meridianos de 39,86° e 51,04°. Seu clima é bastante diversificado, devido às condições topográficas, altitudes dominantes e continentalidade (Costa *et al.*, 1998). Segundo o IBGE (2016), o estado possui basicamente três biomas: Cerrado, na porção central-ocidental (57%), Mata Atlântica, na região oriental (41%), e Caatinga, no setor norte (2%).

2.2 Dados

As regiões homogêneas de precipitação foram determinadas por Sousa (2016), a partir de dados mensais de 148 estações/postos pluviométricos com 36 anos de dados (1977-2012), período homogêneo, sem falhas. Para a construção dos escalogramas de fase da ondeleta, objeto deste estudo, foram utilizadas séries diárias completas de PRP e de ROL do período de 2003 a 2012, para seis localidades dentro das RH (Figura 1 B). Os dados diários de PRP e de ROL foram obtidos, respectivamente, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), derivados das observações de radiação do sensor *High-Resolution Infrared Radiation* (HIRS) a bordo do satélite NOAA TIROS-N e MetOp, com resolução de 1° x 1°.

2.3 Métodos

Para cada RH, foram selecionadas algumas estações para representar o regime pluviométrico (Figura 1 B). Em seguida, aplicou-se a técnica da Transformada de Ondeleta de Morlet e Grossman (Morettin, 1999; Vitorino *et al.*, 2006) para modular a variabilidade da PRP e ROL nas diferentes escalas de tempo-frequência. A técnica da TO refere-se a um conjunto de funções em forma de ondas geradas por dilatações e translações de uma função de variável real. O princípio matemático dessa técnica é gerar um novo espaço com base numa função padrão, de energia finita, por vezes referida como a ondeleta-mãe, dada pela Equação 1 (Morettin, 1999; Vitorino *et al.*, 2006; Blain & Kayano, 2011):

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

com $a, b \in \mathbb{R}$ e $a \neq 0$, sendo a o fator de dilatação e b o fator de translação. O parâmetro a determina a frequência de oscilação e o comprimento da ondeleta; o parâmetro de translação b determina a sua posição de deslocamento. Usualmente, tomam-se valores especiais para a e b : $a = 2^j$ e $b = k2^j$, com j e $k \in \mathbb{Z}$.

O fator $\frac{1}{\sqrt{a}}$ é chamado de constante de normalização da energia de cada ondeleta-filha, de

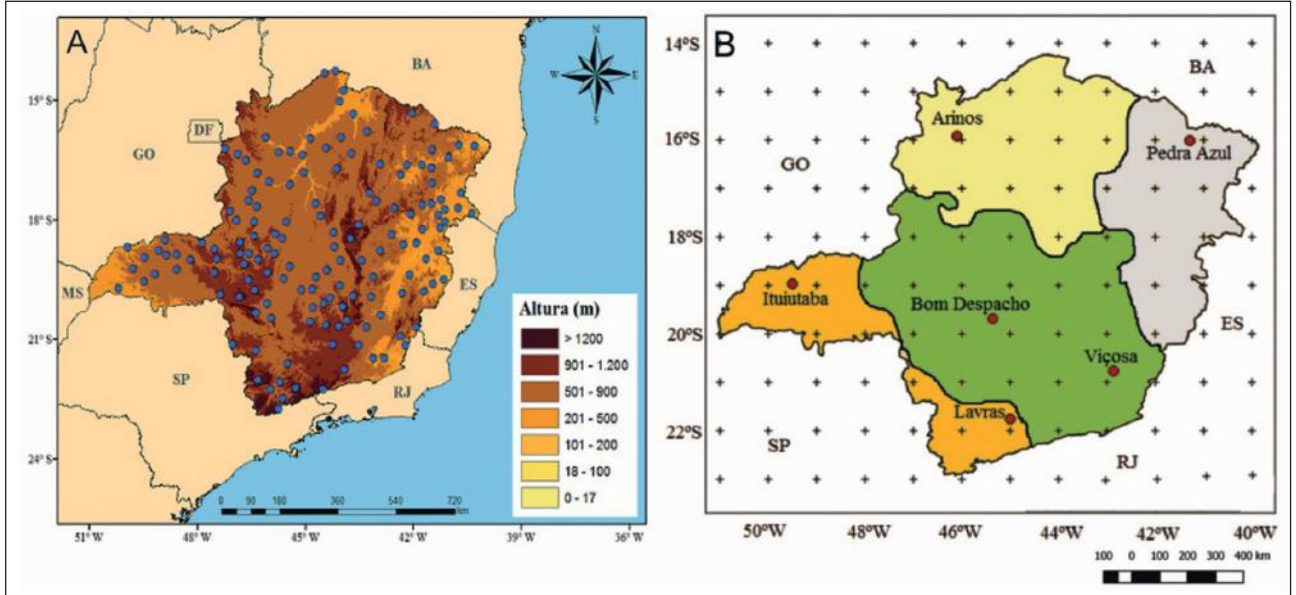


Figura 1 A. Distribuição espacial das 148 estações/postos pluviométricos usados na definição das regiões homogêneas de precipitação; B. Regiões homogêneas da precipitação de Minas Gerais. Os pontos em vermelho correspondem às estações pluviométricas e os pontos (preto +) grade 1° x 1° de ROL (satélite NOAA TIROS-N e MetOp).

forma que juntas mantenham a mesma energia da ondeleta principal $\psi(t)$. A Equação 2 representa as ondeletas-filhas e pode ser expressa por (Bolzan, 2006):

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \psi\left(\frac{t-k}{j}\right) \quad (2)$$

com $j, k \in \mathbb{R}$ e $j \neq 0$, sendo j o fator de dilatação e k o fator de translação.

A Transformada de Ondeletas, em relação a ψ , é expressa na Equação 3 a seguir (Morettin, 1999; Vitorino *et al.*, 2006):

$$(W_{\psi}f)(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

com $a, b \in \mathbb{R}$ e $a \neq 0$.

A técnica de TO é bastante utilizada em séries de dados meteorológicos, por se tratar de uma função complexa que tem desejáveis propriedades de simetria/assimetria e variações de tempo íngremes e suaves capazes de evidenciar eventos importantes de alta frequência em séries temporais. Segundo a

literatura, esse é um dos critérios de escolha da função ondeleta de Morlet, pois esta pode ser entendida como uma função periódica cuja amplitude é modulada por uma função gaussiana (Weng & Lau, 1994; Torrence & Compo, 1998; Vitorino *et al.*, 2006; Blain & Kayano, 2011).

3 Resultados e Discussão

Séries diárias de PRP e ROL, do período de 2003 a 2012, foram utilizadas na análise de ondeletas para as diferentes RH de Minas Gerais obtidas por Sousa (2016) (Figura 1 B). A partir da aplicação da TO aos dados diários dessas variáveis, foi possível identificar eventos intensos de chuva. Dentro da janela temporal analisada, destacam-se, principalmente, os anos de 2010, 2011 e 2012, cujos escalogramas serão apresentados posteriormente. De modo geral, a técnica da TO permitiu avaliar as oscilações nas escalas de tempo-frequência de chuva e ROL, a fim de detectar quais foram os sistemas atmosféricos que mais contribuíram para tais anomalias. Com a análise diária, foi possível decompor o sinal das variáveis e encontrar padrões importantes e detalhados de sua variabilidade, assim como investigar oscilações subsazonais dos fenômenos em escala de alta

frequência e associá-las com a ocorrência de eventos sinóticos que influenciaram as chuvas. Na escolha das localidades representativas de cada RH, buscou-se obter postos que tivessem séries completas de dados, de modo a minimizar os possíveis erros provenientes da variabilidade espacial decorrente de efeitos locais e dinâmicos.

Na Figura 2 (A, B, C e D), observam-se que os maiores totais médios mensais de PRP se situam de outubro a março, considerado como período chuvoso (úmido) de Minas Gerais. Resultados semelhantes foram encontrados por Vieira *et al.* (2010) para Diamantina, no vale do Jequitinhonha, que definiram a estação seca e a chuvosa: período chuvoso prolongando-se de outubro a março, acumulando 88% do total da precipitação anual, e período seco de abril a setembro.

As Figuras 3 e 4 ilustram os escalogramas de fase para precipitação diária e ROL realçadas (ampliadas) para os três anos em destaque na série pesquisada. O eixo vertical corresponde à escala (ou frequência) de 1 a 90 dias. Os coeficientes reais da TO são expressos em cores, em que a cor vermelha representa as maiores energias. O eixo horizontal corresponde ao tempo, em dias, no período de outubro de 2010 a março de 2012. A análise dos escalogramas mostra que, de maio a setembro de 2011, em todas as localidades, predomina a ausência de cores fortes (meses de estiagem, com pouca ou nenhuma precipitação).

As maiores energias da PRP são observadas em Viçosa, Bom Despacho, Ituiutaba e Lavras, nas regiões centro-sul e oeste do estado. Essas características extraídas pela TO confirmam os padrões médios de precipitação obtidos por Sousa (2016). Em Arinos (região norte), Figura 3 A, verificam-se

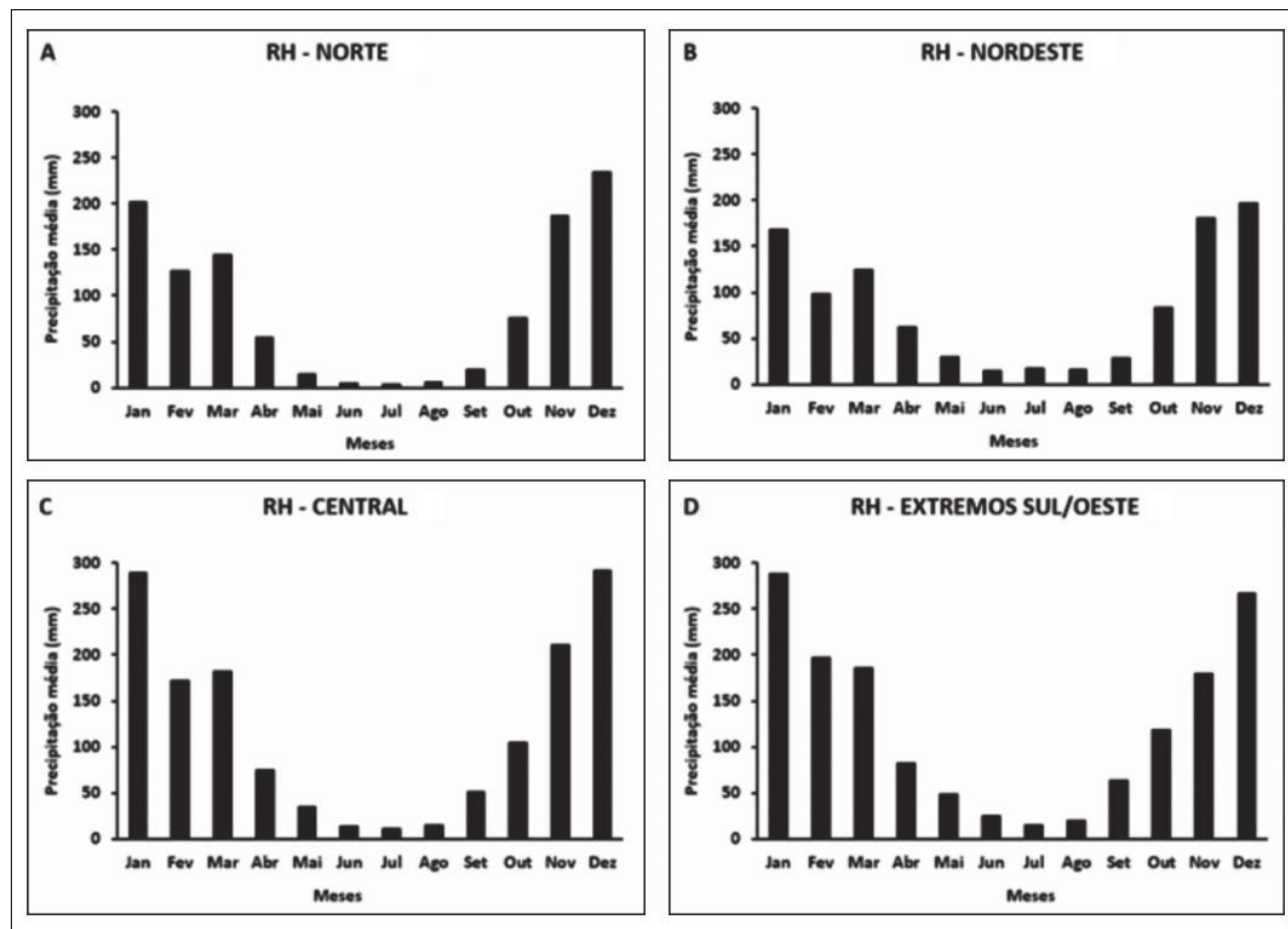


Figura 2 Totais médios mensais de precipitação, por região homogênea, no estado Minas Gerais, no período de 1997-2012; A. RH - Norte; B. RH - Nordeste; C. RH - Central; D. RH - Extremos Sul/Oeste.

frequências de oscilações em torno de trinta e sessenta dias, no período úmido de novembro de 2010 a março de 2011, interagindo com escalas inferiores à mensal entre 10-20 dias, no final de 2010, início de 2011 e de novembro de 2011 a fevereiro de 2012. Somam-se a essas, frequências de oscilações inferiores a dez dias, em períodos intermitentes dos meses de novembro e dezembro de 2010, voltando a se repetir em janeiro/março/novembro/dezembro de 2011. No escalograma de fase de ROL, os padrões concordam com a PRP, destacando-se maiores energias da TO nas escalas de 50-90 dias, no início de 2011, e de 20-40 dias no primeiro trimestre de 2012 (Figura 4 A). O escalograma de fase da TO da chuva para Pedra Azul (nordeste de Minas) apresenta energias mais elevadas abaixo de dez dias e entre 10-20 dias, nos dois últimos meses de 2010, janeiro/novembro/dezembro de 2011 e forte oscilação na escala de trinta dias em janeiro de 2012 (Figura 3 B). Nesse mesmo período, a escala de trinta dias também está evidenciada no escalograma de ROL (Figura 4 B).

A análise dos escalogramas de fase da TO da chuva para Viçosa e Bom Despacho mostra escalas mais energéticas de até vinte dias no final de 2010. No primeiro trimestre de 2011, a onda vai perdendo energia, diminuindo a frequência de oscilação, inte-

ragindo com escalas maiores em torno de trinta dias e persistindo acima de oitenta dias. No final de 2011 e início de 2012, o sinal da fase é marcante de 30-40 dias em Viçosa, e de sessenta dias em Bom Despacho, interagindo com oscilações inferiores a dez dias (Figura 3 C e 3 D). No escalograma de ROL, o comportamento é similar à variabilidade diária da chuva no período (Figura 4 C e 4 D). A TO aplicada a PRP e ROL, na região central de Minas Gerais, mostrou que a oscilação de alta frequência é predominante nas menores escalas de tempo, evidenciando a presença de sistemas transientes. Esses resultados corroboram com os resultados obtidos por Escobar (2014) que identificou, no final de 2011, a presença de uma área de baixa pressão continental sobre o sul da América do Sul, se deslocando em direção ao oceano, e um sistema de alta pressão localizado mais ao sul da sua posição climatológica. O sistema de baixa pressão contribui para o levantamento de ar quente e úmido determinando uma forte convergência de massa e umidade sobre toda a região Sudeste do Brasil (Escobar & Carvalho, 2005). Para as localidades de Ituiutaba e Lavras, a TO da chuva mostrou que escalas dominantes abaixo de vinte dias são visualizadas no final de 2010. Porém, as flutuações reduzem

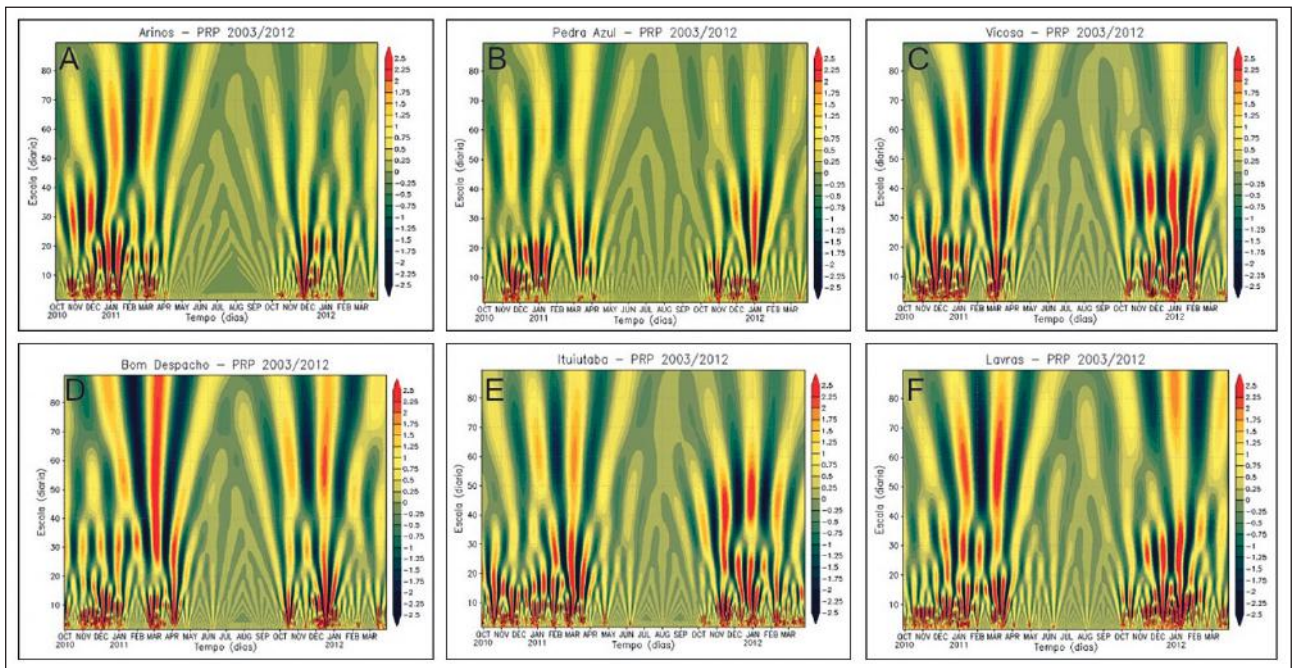


Figura 3 Escalograma de fase da TO para precipitação diária, de outubro de 2010 a março de 2012. A. Arinos; B. Pedra Azul; C. Viçosa; D. Bom Despacho; E. Ituiutaba; F. Lavras.

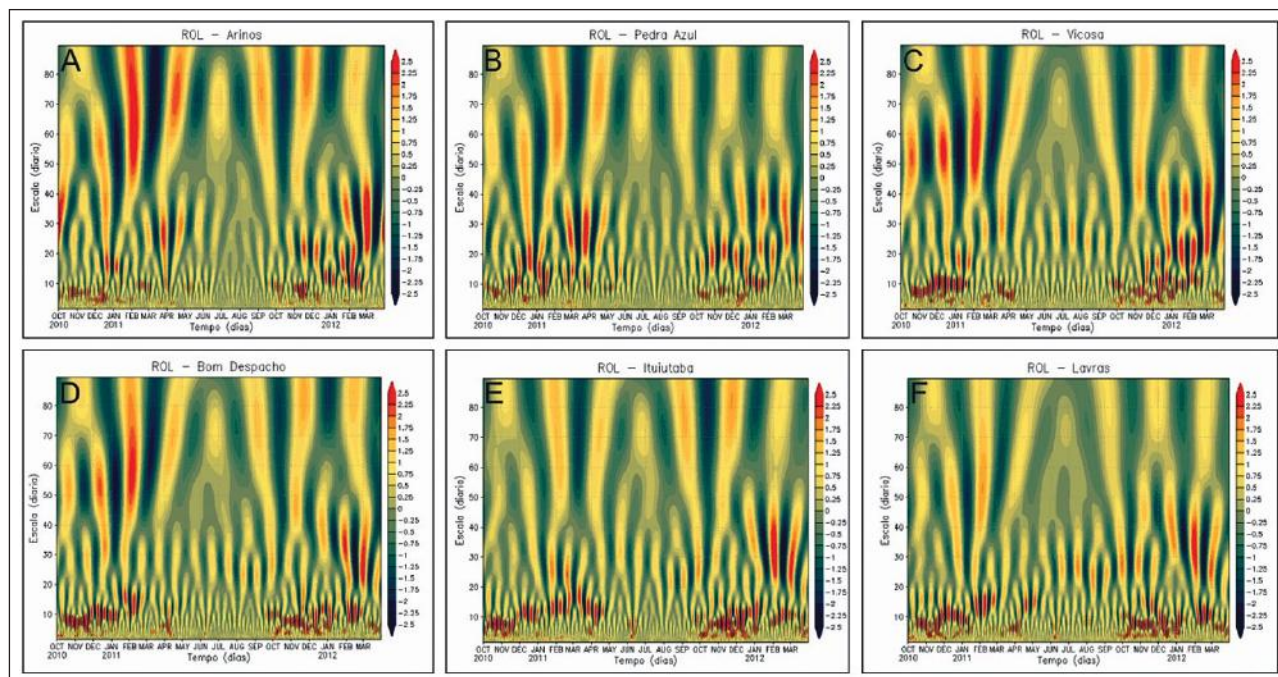


Figura 4 Escalograma de fase da TO para ROL diária, de outubro de 2010 a março de 2012. A. Arinos; B. Pedra Azul; C. Viçosa; D. Bom Despacho; E. Ituiutaba; F. Lavras.

as frequências, aumentando para escala de até trinta dias (Figura 3 E e 3 F). De novembro de 2010 até março de 2011, em quase todas regiões, as escalas inferiores a dez dias estão coerentes com a atuação de episódios de maior frequência de ZCAS, como foi o caso de 2011 (Quadro *et al.*, 2016). Escobar (2014) constatou a ocorrência de quatro episódios de ZCAS em dezembro de 2011, período em que se registrou as maiores chuvas daquele ano. Além disso, o Boletim Agroclimatológico (de janeiro de 2012) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2012) reforçou que dois episódios de ZCAS foram os principais responsáveis pelas chuvas em Minas Gerais em janeiro de 2012. Segundo o documento, os maiores acumulados mensais de precipitação foram observados em Lavras (529,2 mm) com quase o dobro da média para o mês de janeiro (281,6 mm). As escalas de trinta (Lavras) e cinquenta (Ituiutaba) dias registradas pela TO podem ser decorrentes de uma possível influência de sinais de oscilações intrazonais favoráveis ao aumento das chuvas (Melo & Figueroa, 2012).

A série temporal diária de ROL mostra que, entre maio e setembro de 2011, predomina radiação

mais elevada próxima de $300W/m^2$. Consequentemente, há pouca atividade convectiva nesse período. No início de março de 2011, a radiação oscila em torno de $140W/m^2$, caracterizando intensa atividade convectiva nas porções norte, nordeste, extremos oeste e sul mineiros (Figura 5 A, 5 B, 5 E e 5 F, respectivamente). Os escalogramas de PRP e ROL mostraram que, no início de 2011, as maiores contribuições estão nas escalas sinóticas e intrasazonais, principalmente para Viçosa, Bom Despacho, Ituiutaba e Lavras. Nesse mesmo ano, oscilações nas escalas de 30-60 dias são nitidamente observadas em Bom Despacho e Lavras. Esses padrões concordam com a dinâmica da Oscilação de Madden-Julian, comumente definida como OMJ (Madden-Julian, 1971; Oliveira *et al.*, 2015). Isso pode ser visualizado na série temporal da amplitude do índice da OMJ (Figura 6) que, nesse período, se encontrava na sua fase ativa, sugerindo que essa oscilação intensifica a atuação de sistemas moduladores do regime climático da região. Os resultados encontrados corroboram com estudos desenvolvidos por Kayano e Kousky (1999) que enfocam que a fase ativa da OMJ sobre a região favorece a atividade convectiva. Relata-se que a OMJ também esteve ativa no último trimestre

de 2011 e nos quatro primeiros meses de 2012. Nesse período, os escalogramas de fase da PRP mostraram flutuações inferiores a dez dias, intensificando para as escalas de 30-60 (Figura 3 D, 3 E e 3 F). Esses padrões de chuva estão de acordo com Melo & Coelho (2011) que enfatizam que os eventos extremos em meados de janeiro de 2012 podem ter sido modulados pela OMJ.

No início de 2012, uma possível atuação do sinal da OMJ foi detectada nos escalogramas de fase da TO para PRP e ROL (Figuras 3 e 4, respectivamente). Para a chuva, frequências marcantes de 38 dias são observadas em Lavras, 45 dias em Viçosa, 50 dias em Ituiutaba e 60 dias em Bom Despacho, respectivamente. Oliveira (2012) defende que constantes perturbações da OMJ ocorrem ao longo de seu deslocamento. Essa oscilação é uma onda que atua na escala subsazonal, em toda a região tropical, com um ciclo de evolução que leva, aproximadamente, trinta a sessenta dias para dar uma volta ao redor do equador, no sentido leste. À medida que circunda o globo, afeta o regime de chuvas em várias localidades da região tropical. Por isso, a frequência obser-

vada nas oscilações da chuva de Minas Gerais pode ser pouco diferente daquela originalmente detectada pelos precursores da OMJ (Oliveira, 2012; Ventrice *et al.*, 2013).

A análise dos escalogramas de fase da TO mostra que as oscilações em escalas menores que dez dias foram observadas em vários meses ao longo do período estudado. Esse padrão é coerente com a dinâmica das chuvas mineiras que também sofrem influência dos sistemas de curto prazo, tais como os sistemas frontais que frequentemente atuam no sudeste do Brasil (Nielsen *et al.*, 2019).

Os escalogramas de fase da PRP mostraram também concentrações importantes de energia na escala abaixo de dez dias em Viçosa, Bom Despacho, Ituiutaba e Lavras (Figura 3). Estudos realizados na região Sudeste do Brasil enfatizam que boa parte dos eventos extremos de chuva em Minas Gerais e nos demais estados estão relacionados aos episódios de ZCAS associada ao SMAS, no período úmido do final da primavera e verão austral. Além disso, é importante frisar que alguns episódios de ZCAS podem

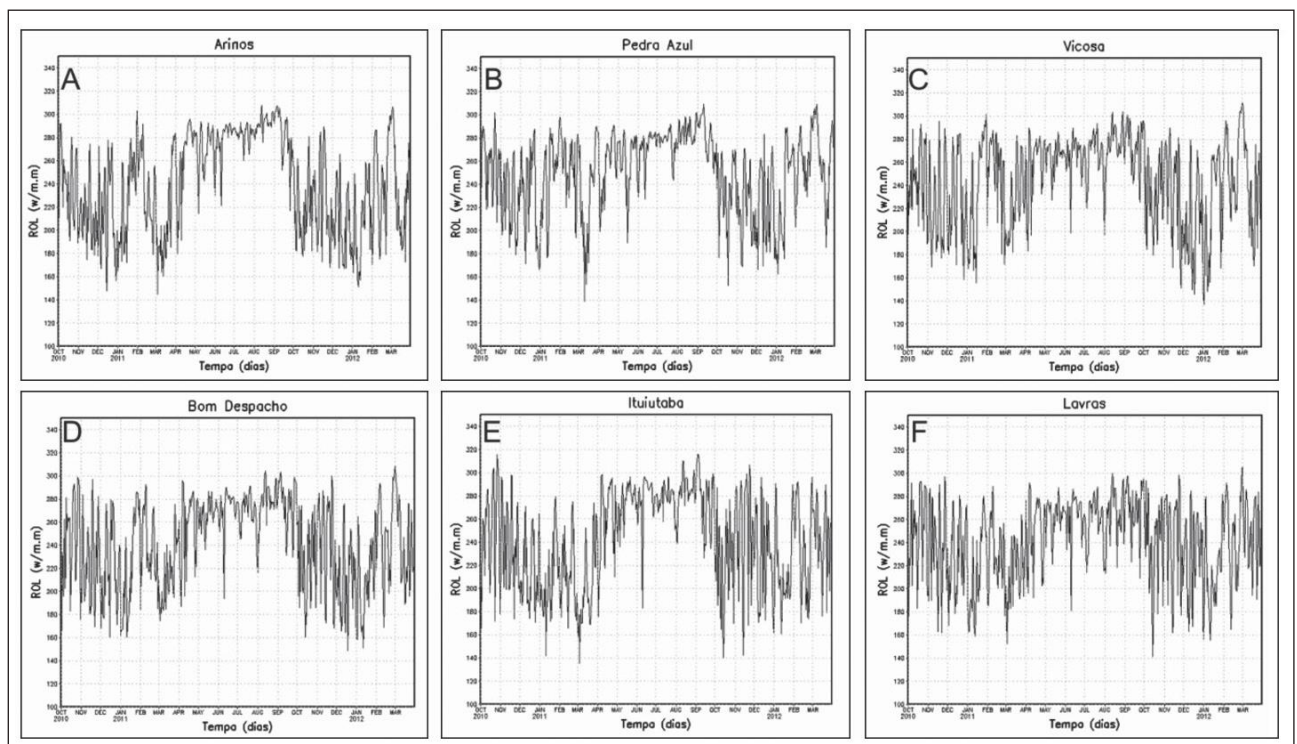


Figura 5 Série temporal diária de ROL, de outubro de 2010 a março de 2012. A. Arinos; B. Pedra Azul; C. Viçosa; D. Bom Despacho; E. Ituiutaba; F. Lavras.

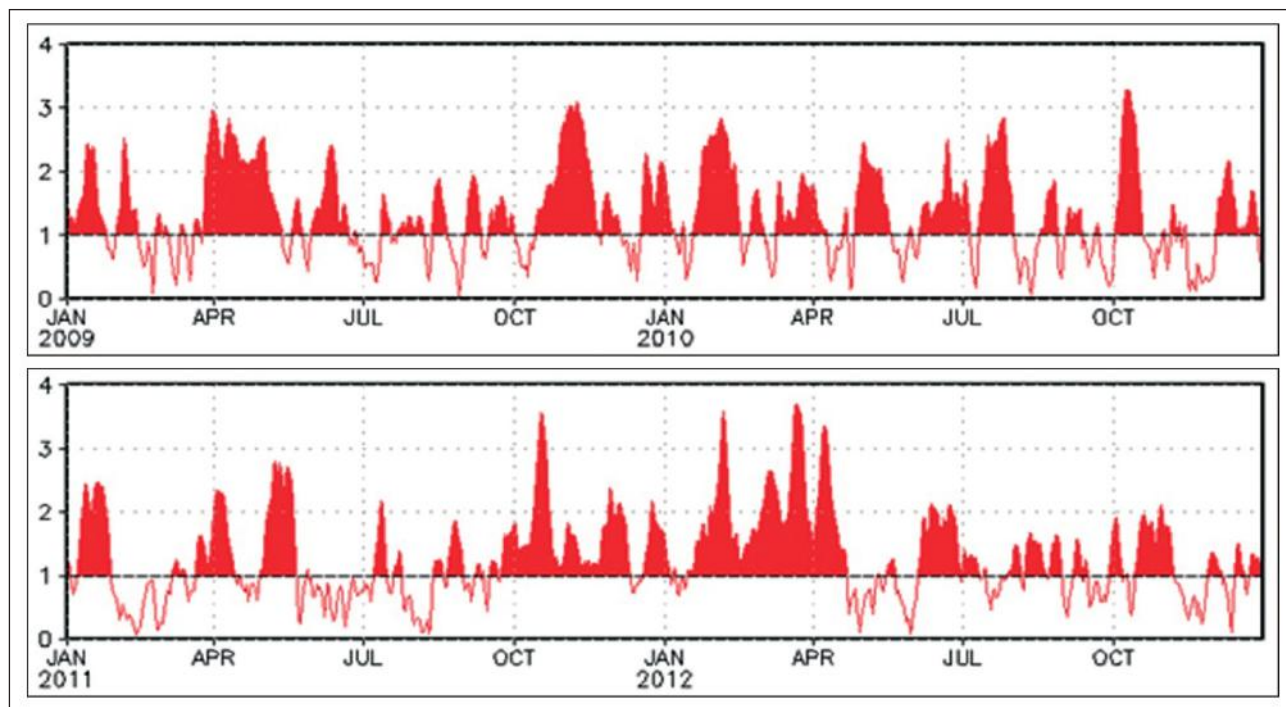


Figura 6 Série temporal diária da amplitude do índice de Madden-Julian, de janeiro de 2009 a dezembro de 2012 (adaptada de CPC/NCEP/NOAA, 2016).

apresentar dinâmica relacionada às frentes frias que também atuam na região (Nielsen *et al.*, 2019). Em meados de janeiro de 2011, os eventos de grande intensidade de chuva detectados pelo sinal de alta frequência da PRP e ROL ocorreram, principalmente, pela atuação de ZCAS que, nesse ano, registrou o maior número de episódios dentro do período de 1996 a 2013 (Quadro *et al.*, 2016).

4 Conclusões

A aplicação da TO aos dados diários de precipitação e ROL identificou eventos intensos de chuva que ocorreram entre outubro e março, período chuvoso (úmido) de Minas Gerais, destacando principalmente os anos de 2010, 2011 e 2012.

Os escalogramas de fase para PRP e ROL mostraram que a escala dominante de alta frequência é de, aproximadamente, dez dias para as duas variáveis, interagindo com escalas maiores e menores no final da primavera e verão austral em todas as localidades estudadas.

A decomposição do sinal das variáveis analisadas permitiu encontrar padrões importantes, de-

tectando oscilações subsazonais dos fenômenos em escala de alta frequência, associando-os com a ocorrência de eventos sinóticos que mais influenciaram as chuvas no final da primavera e verão austral, a exemplo da ZCAS, SMAS, OMJ e sistemas frontais.

A técnica evidenciou ainda que oscilações mais energéticas, menores que dez dias, ocorreram nas escalas sinóticas, no verão 2011/2012, acentuadamente nas localidades de Viçosa, Bom Despacho, Ituiutaba e Lavras. Estudos anteriores denotam que os eventos de chuva ocorridos em meados de janeiro de 2011 foram modulados, principalmente, pelos episódios de ZCAS e reforçados pela atuação da OMJ.

Por fim, conclui-se que os resultados encontrados reforçam outros estudos realizados para a região Sudeste do Brasil que apontam ZCAS, SMAS e OMJ como os principais sistemas atmosféricos responsáveis por chuvas volumosas na região.

5 Agradecimentos

Este trabalho é parte da tese de doutorado do primeiro autor, desenvolvida no Programa de Pós-

-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O referido autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo.

6 Referências

- Assis, W.L.; Parizzi, M.G. & Ribeiro, S.M. 2013. Identificação dos sistemas atmosféricos responsáveis por inundações e deslizamentos no município de Belo Horizonte: análise dos períodos chuvosos de 2011-2012 e 2012-2013. *Revista Geografias*, 9(2): 38-55.
- Blain, G.C. & Kayano, M.T. 2011. 118 anos de dados mensais do Índice Padronizado de Precipitação: série meteorológica de Campinas, estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(1): 137-148.
- Bolzan, M.J.A. 2006. Transformada em ondeleta: Uma necessidade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 8(4): 563-567.
- Braga, C.C.; Amanajás, J.C.; Cerqueira, H.D.V. & Vitorino, M.I. 2014. The Role of the Tropical and Pacific Oceans SST in Modulating the Rainfall of Paraíba State, Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, 32(1): 97-107.
- Chen, Y.D.; Zhang, Q.; Lu, X.; Zhang, S. & Zhang, Z. 2011. Precipitation variability (1956-2002) in the Dongjiang River (Zhujiang River basin, China) and associated large-scale circulation. *Quaternary International*, 244(2): 130-137.
- Costa, C.M.R.; Hermann, G. & Martins, C.S. 1998. *Biodiversidade em Minas Gerais - um Atlas para sua Conservação*. Belo Horizonte, Fundação Biodiversitas, 94p.
- CPC/NCEP/NOAA. 2016. Climate Prediction Center/National Centers for Environmental Prediction/National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_mjo_index/pentad.shtml>. Acesso em: 21 jan. 2016.
- Echer, M.P.S.; Echer, E.; Nordemann, D.J.; Rigozo, N.R. & Prestes, A. 2008. Wavelet analysis of a centennial (1895-1994) southern Brazil rainfall series (Pelotas, 31°46'19"S; 52°20'33"W). *Climatic Change*, 87(3-4): 489-497.
- Escobar, G.C.J. 2014. Padrões de circulação em superfície e em 500 hpa na América do Sul e eventos de anomalias positivas de precipitação no estado de Minas Gerais durante o mês de dezembro de 2011. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(1): 105-124.
- Escobar, G.C.J. & Carvalho, C.I. 2005. Situações meteorológicas associadas a episódios da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). In: CONGRESSO ARGENTINO DE METEOROLOGIA, 9, Buenos Aires, Anais, CD-ROM.
- Ferreira, N.J.; Sanches, M. & Dias, M.A.F.S. 2004. Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Períodos de El Niño e La Niña. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19(1): 89-98.
- Gocic, M. & Trajkovic, S. 2013. Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980-2010. *Journal of Hydrology*, 494: 32-42.
- Grimm, A.M. 2011. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4): 537-554.
- IBGE. 2016. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapas de Biomas e de Vegetação. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 11 fev. 2016.
- INMET. 2012. Boletim Agroclimatológico Mensal do Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=agrometeorologia/boletinsAgroclimatologicos>>. Acesso em: 27 jan. 2016.
- Kayano, M.T. & Kousky, V.R. 1999. Intraseasonal (30 - 60 day) variability in the global tropics: principal modes and their evolution. *Tellus*, 51: 373-386.
- Madden, R.A. & Julian, P.R. 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(5): 702-708.
- Melo, A.B.C. & Coelho, C.A.S. 2011. Infoclima, São José dos Campos, ano 18, n. 4. Disponível em: <<http://infoclima.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 27 jan. 2016.
- Melo, A.B.C. & Figueroa, S.N. 2012. Infoclima, São José dos Campos, ano 19, n. 2. Disponível em: <<http://infoclima.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 30 jan. 2016.
- Morettin, P.A. 1999. *Ondas e Ondeletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondeletas*. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 276p.
- Nakken, M. 1999. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns. *Environmental Modelling & Software*, 14: 283-295.
- Nielsen, D.M.; Belém, A.L.; Marton, E. & Cataldi, M. 2019. Dynamics-based regression models for the South Atlantic Convergence Zone. *Climate Dynamics*, 52: 5527-5553.
- Nogués-Paegle, J.; Mechoso, C.R.; Fu, R.; Berbery, E.H.; Chao, W.C.; Chen, T.C.; Cook, K.; Diaz, A.F.G.; Enfield, D.; Ferreira, R.; Grimm, A.M.; Kousky, V.; Liebmann, B.; Marengo, J.; Mo, K.; Neelin, J.D.; Paegle, J.; Robertson, A.W.; Seth, A.; Vera, C.S. & Zhou, J. 2002. Progress in Pan American CLIVAR Research: understanding the South American Monsoon. *Meteorological*, 27: 3-30.
- Oliveira, J.V. 2012. *A Oscilação Madden-Julian na Amazônia Oriental: variáveis superficiais*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Pará, Dissertação de Mestrado, 112p.
- Oliveira, J.V.; Vitorino, M.I. & Sá, L.D.A. 2015. Implication of Madden-Julian Oscillation phase on the Eastern Amazon climate. *Atmospheric Science Letters*, 16: 318-323.
- Quadro, M.F.L.; Pezzi, L.P. & Rosa, E.B. 2016. O climanálise e o monitoramento da ZCAS nos últimos 30 anos. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/quadroetal.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- Santos, N.A. 2016. *Modulação Regional da Precipitação e Temperatura da Superfície do Mar no Estado da Bahia*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Dissertação de Mestrado, 89p.
- Sousa, E.P. 2016. *Padrões Climáticos de Eventos Extremos de Chuva Utilizando Análise Multivariada e de Ondeletas no Estado de Minas Gerais*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Tese de Doutorado, 120p.
- Torrence, C. & Compo, G.P.A. 1998. Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79: 61-78.
- Ventrice, M.J.; Wheeler, M.C.; Hendon, H.H.; Schreck, C.J.; Thorncroft, C.D. & Kiladis, G.N. 2013. A modified multivariate Madden-Julian oscillation index using velocity potential. *Monthly Weather Review*, 141(12): 4197-4210.
- Vieira, J.P.G.; Souza, M.J.H.; Teixeira, J.M. & Carvalho, F.P. 2010. Estudo da precipitação mensal durante a estação chuvosa em Diamantina, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(7): 762-767.
- Vitorino, M.I.; Silva Dias, P.L. & Ferreira, N.J. 2006. Observational study of the seasonality of the submonthly and intraseasonal signal over the tropics. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 93: 17-35.
- Weng, H. & Lau, K.M. 1994. Wavelet, Period Doubling, and Time-Frequency Localization with Application to Organization of Convection over the Tropical Western Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51(17): 2523-2541.