

Ondaleta Coerência aplicada em série temporal NDVI/MODIS para avaliação de fitofisionomias campestres

Andreise Moreira¹
Denise Cybis Fontana¹
Tatiana Mora Kuplich²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
Avenida Bento Gonçalves 9500 - 91501-970 - Porto Alegre - RS, Brasil
andreisem@gmail.com; dfontana@ufrgs.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Centro Regional Sul de pesquisas Espaciais - CRS
Caixa Postal 5021, CEP 97105-970 - Santa Maria - RS, Brasil
tatiana.kuplich@inpe.br

Abstract. In this paper, the technique of Wavelet Coherence was used to identify patterns in time series of NDVI/MODIS for different grassland typologies and the relationship with meteorological variables, such as rainfall and air temperature. The life cycle of plant species is sensitive to variations in weather conditions and, for a climate change scenario, is important for studying the variability of climate factors in local, regional and global scales. The study covered 10 grassland typologies in Rio Grande do Sul (RS) state, Southern Brazil and a NDVI/MODIS time series with a spatial resolution of 250 m, from 2000 to 2014. The Wavelet Coherence was applied in the NDVI/MODIS data and rainfall and air temperature to check for consistency. Two well-marked cycles were seen: an annual cycle, ranging between 1 and 23 observations and an interannual cycle that varies between 92 and 184 observations. These cycles were defined and represented by the y axis in the power spectrum and were distributed throughout the series (2000-2014) on the x-axis. In the humid subtropical climate conditions prevalent in the RS, the application of Wavelet Coherence was effective in showing where and when changes in the phenological pattern of grassland vegetation occurred, as well as to point out the intensity (correlation) between NDVI data and variability of weather conditions. In the annual cycle the association between the NDVI and air temperature (high frequency) was dominant. For the interannual cycles, events such as El Niño and La Niña, which impact strongly the precipitation in RS, caused the high correlation observed between NDVI data and rainfall.

Palavras-chave: vegetation index, rainfall, air temperature, índice de vegetação, precipitação pluvial, temperatura do ar.

1. Introdução

Estudos relacionados à fenologia da vegetação têm sido muito frequentemente desenvolvidos com uso de séries temporais de imagens de satélite, em que se destaca o uso do NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) e EVI (Índice de Vegetação Melhorado), obtidos do sensor orbital MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (Huete et al., 2002; Soudani et al., 2012).

Em especial, o índice NDVI permite a construção de perfis sazonais do desenvolvimento da vegetação, caracterizando a duração do período de crescimento, pico de verde e períodos de senescência determinando o padrão fenológico de diferentes fitofisionomias vegetais. As informações derivadas destes índices possibilitam uma maneira eficiente para realizar o monitoramento espaço-temporal da fenologia da vegetação em diferentes escalas (Tan et al., 2011) e sua relação com elementos meteorológicos, os quais podem alterar o início das fases fenológicas.

Técnicas que trabalham no domínio da frequência ou do tempo, como análise de Fourier e Transformada de Ondaleta ou *Wavelets* (TO), têm sido utilizadas para extração de informações de séries temporais de índices de vegetação e se mostrado adequadas na análise

da dinâmica temporal da vegetação (Percival et al., 2004; Bruce et al., 2006), detecção de mudanças (Piao et al., 2012) e na relação entre fatores meteorológicos e fenologia (Li e Kafatos, 2000; Carl et al., 2012; Kuplich et al., 2013). Porém, existe ainda uma carência de estudos nesta área, principalmente com enfoque na relação entre a resposta da vegetação campestre e as variáveis climáticas temperatura do ar e precipitação pluvial e de como a variabilidade do clima atua nas diferentes fitofisionomias de campo.

Nesse sentido, a Transformada Coerência (TC) permite descrever e/ou representar dados em diferentes faixas de frequência e tempo, além de processar uma grande quantidade de dados, identificando semelhanças, padrões e variações nas séries temporais. A TC permite analisar sinais irregulares distribuídos em séries temporais não-estacionárias em diferentes frequências (Santos, Freire, Torrence, 2013). A técnica de Transformada Coerência surge como uma alternativa interessante para a análise de sinais não-estacionários, indicando correlação ou semelhança entre duas séries de tempo, podendo ser utilizada como alternativa na análise entre índices de vegetação e variáveis meteorológicas.

O objetivo deste estudo foi utilizar a Transformada Coerência para identificar a existência de padrões na série temporal de NDVI/MODIS de diferentes fitofisionomias campestres, assim como estabelecer relações com variáveis meteorológicas.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de estudo

O estudo abrangeu 10 regiões fisionômicas com predomínio de vegetação campestre nativa no estado do Rio Grande do Sul (RS), localizado no extremo meridional do Brasil, entre as latitudes 27° 05' e 33° 45' S e longitudes 49° 43' e 57° 39' W. O RS concentra aproximadamente 75% da vegetação campestre existente no Brasil (Overbeck et al., 2007), classificada como parte de dois diferentes biomas: Mata Atlântica e Pampa (IBGE, 2004).

As formações campestres do RS são resultantes da combinação de fatores geográficos como relevo, heterogeneidade de solos, distribuição da pluviosidade e temperatura do ar, que associados às variações florísticas permitiram classificar a vegetação campestre em 10 regiões fisionômicas homogêneas, segundo Boldrini (1997), Hasenack et al. (2010) e Boldrini e Longhi-Wagner (2011) (Figura 1), sendo estas regiões utilizadas como base para a extração das amostras de estudo no presente trabalho.

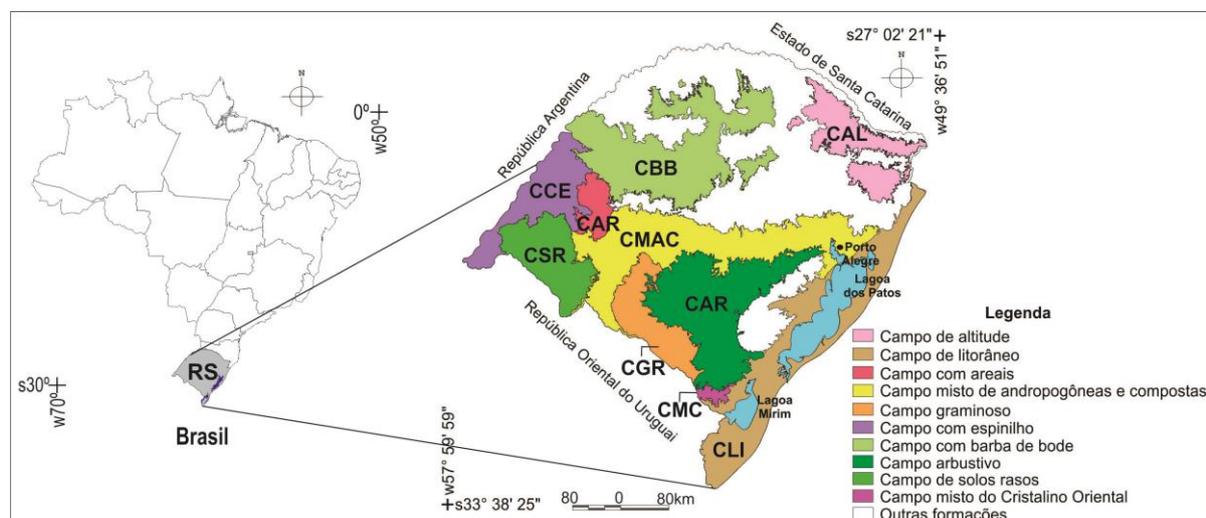


Figura 1. Fitofisionomias campestres do estado do Rio Grande do Sul.

Fonte: Malha Digital, IBGE (2012); Adaptado de Hasenack et al. (2010).

2.2 Período de estudo e definição das amostras

Foi utilizada uma série temporal de dados NDVI/MODIS, do produto MOD13Q1 (coleção 5), com resolução espacial de 250 m e composição de imagens de máximo valor a cada 16 dias, considerando o período de fevereiro de 2000 a dezembro de 2014, totalizando 342 imagens. Os valores de NDVI foram obtidos de 20 polígonos amostrais para as 10 fitofisionomias campestres do estado do RS. Atribuiu-se às 10 fitofisionomias campestres os valores das médias de NDVI extraído das 20 amostras para cada fisionomia, com variação entre 2.462 a 4.284 pixels. O número de pixels coletados mostrou-se suficiente e foi definido a partir da aplicação do método *bootstrap* (Efron, 1979), considerando 1.000 iterações e nível de significância de 5%, que determinou valor mínimo de 1.500 pixels para a realização das análises.

2.3 Temperatura do ar e Precipitação pluvial

Dados de temperatura do ar foram obtidos do ERA Interim, a mais recente reanálise global atmosférica produzida pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) para o período de 1979 até o presente (Berrisford et al., 2011). Neste estudo foram utilizados dados de temperatura do ar a 2m da superfície com grade de resolução horizontal de 0,25°. A temperatura do ar a 2 m da superfície corresponde a dados observados do horário 12 UTC (9:00 horas no Brasil). Para compor a série de dados de temperatura do ar para os 20 polígonos amostrais de cada fisionomia campestre foram obtidas as médias dos valores diários organizados em ciclos de 16 dias.

Já os dados de precipitação pluvial foram obtidos do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), lançado em 1997 em um projeto conjunto entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *Japan Aerospace and Exploration Agency* (JAXA). Diferentes produtos são gerados a partir do TRMM, neste estudo foram utilizados dados obtidos do produto 3B42 (*Daily TRMM and Others Rainfall Estimate - 3B42 V7 derived*), que disponibiliza estimativas de precipitação pluvial diária acumulada (mm/dia) originadas a cada 3 horas em grade de resolução espacial de 0,25° x 0,25° obtidas de dois diferentes sensores: sensor de micro-ondas TMI (*TRMM Microwave Imager*) e sensores infravermelho (IR) (Huffman et al., 2007). Os valores de precipitação pluvial foram acumulados a cada 16 dias e obtidas as médias dos 20 polígonos amostrais para cada fisionomia campestre.

2.4 Transformada Coerência

A Transformada Coerência pode ser utilizada para identificar áreas que apresentam alta correlação, semelhante ao tradicional coeficiente de correlação (Pearson), porém localizado no tempo-frequência (Alcântara, 2010). Para identificação das áreas com coerência entre as séries temporais nos dados de NDVI/MODIS e precipitação pluvial e entre NDVI/MODIS e temperatura do ar aplicou-se a Transformada Coerência desenvolvida por Torrence e Webster (1999).

A partir da Transformada Coerência, a série temporal de dados (NDVI e precipitação pluvial - NDVI e temperatura do ar) foram representadas em um diagrama tempo-frequência, denominado escalograma ou espectro de potência elaborada no aplicativo MatLab. No escalograma foi utilizada uma escala de cores, que variou do azul ao vermelho, representando o coeficiente da ondaleta. A tonalidade azul indica menor intensidade e a tonalidade em vermelho a maior intensidade dos coeficientes da ondaleta.

A Transformada Coerência apresenta valores que variam entre 0 e 1, quanto mais próximo do valor 1, maior é a correlação entre os sinais. Nos espectros gerados pela Transformada Coerência foram observados também a direção das setas, as quais indicam a diferença de fase entre os sinais. Setas para a direita (\rightarrow) indicam que as séries estão

completamente em fase e as setas para a esquerda (\leftarrow) indicam que as séries estão em fase completamente oposta, acusando correlação inversa.

3. Resultados e Discussão

A Transformada Coerência permitiu identificar nas séries analisadas (entre NDVI e a precipitação pluvial e entre NDVI e a temperatura do ar) dois ciclos bem marcados, um anual que varia entre 1 e 23 observações e um ciclo interanual que varia entre 92 e 184 observações. Estes ciclos são definidos e representados pelo eixo y no espectro de potência e se distribuem ao longo da série de tempo (2000 - 2014) no eixo x. No ciclo anual se alternam áreas com as colorações azuis (valores $< 0,5$) e vermelhas (valores $> 0,5$), indicando que existe variação na intensidade e sentido da correlação entre as variáveis ao longo do ano (sazonalidade). Já no ciclo interanual a alternância das cores azul e vermelha é menor e evidencia que fenômenos de escala maior tem influência nas relações entre as variáveis.

Verificou-se que a temperatura do ar apresentou alta coerência (valores em torno de 1) com o índice NDVI, principalmente para o período anual e para a maioria das fitofisionomias campestres (CAL, CLI, CCA, CMAC, CGR, CBB, CAR e CMC). Como exemplo, destacam-se as fitofisionomias CAL e CMAC (Figura 2a). Os elevados valores de coerência indicam que as séries apresentam variações na mesma frequência e alta correlação. Nesse sentido, observa-se que o aumento ou diminuição da temperatura do ar condiciona o aumento ou diminuição nos valores de NDVI atuando como um dos fatores determinantes do padrão fenológico das diferentes fitofisionomias campestres do RS.

Além das correlações observadas entre o NDVI e a temperatura do ar, também buscou-se analisar a relação entre o NDVI e a precipitação pluvial (Figura 2a e 2b). No ciclo anual a relação entre o NDVI e a precipitação pluvial é pouco marcada para a maioria das fitofisionomias campestres. No entanto, para o ciclo entre 92 e 184 observações intensifica-se a relação entre os valores de NDVI e a precipitação pluvial, principalmente em anos de ocorrência de eventos de El Niño e La Niña.

Altos valores de coerência entre as séries de dados de NDVI/MODIS e a precipitação pluvial (CAL, CAR, CMAC, CCE, CSR, CBB, CCA, CGE e CMC) e temperatura do ar (CAL e CLI – valores em torno de 1 e CCE – valores em torno de 0,6) foi observada em anos de ocorrência de eventos de El Niño ou La Niña (Figura 2a e 2b), principalmente durante o ciclo interanual que ocorre entre 92 e 184 observações.

Como demonstrado em diferentes trabalhos (Fontana e Berlato, 1997; Berlato e Fontana, 2003; Wagner, 2013), o fenômeno ENOS (El Niño Oscilação Sul) produz anomalias tanto positivas como negativas de precipitação pluvial e temperatura do ar sobre o Estado, alterando o crescimento, desenvolvimento e a produtividade das diferentes espécies vegetais.

A temperatura do ar demonstrou alta correlação com o índice de vegetação NDVI no período anual para todas as fitofisionomias campestres, enquanto a relação entre o NDVI e a precipitação pluvial é marcante durante eventos de El Niño e La Niña e apresentou alta coerência para a maioria das fitofisionomias campestres (CAL, CAR, CMAC, CCE, CSR, CBB, CCA, CGE e CMC) (Figura 2a e 2b) e durante o ciclo interanual que ocorre entre 92 e 184 observações.

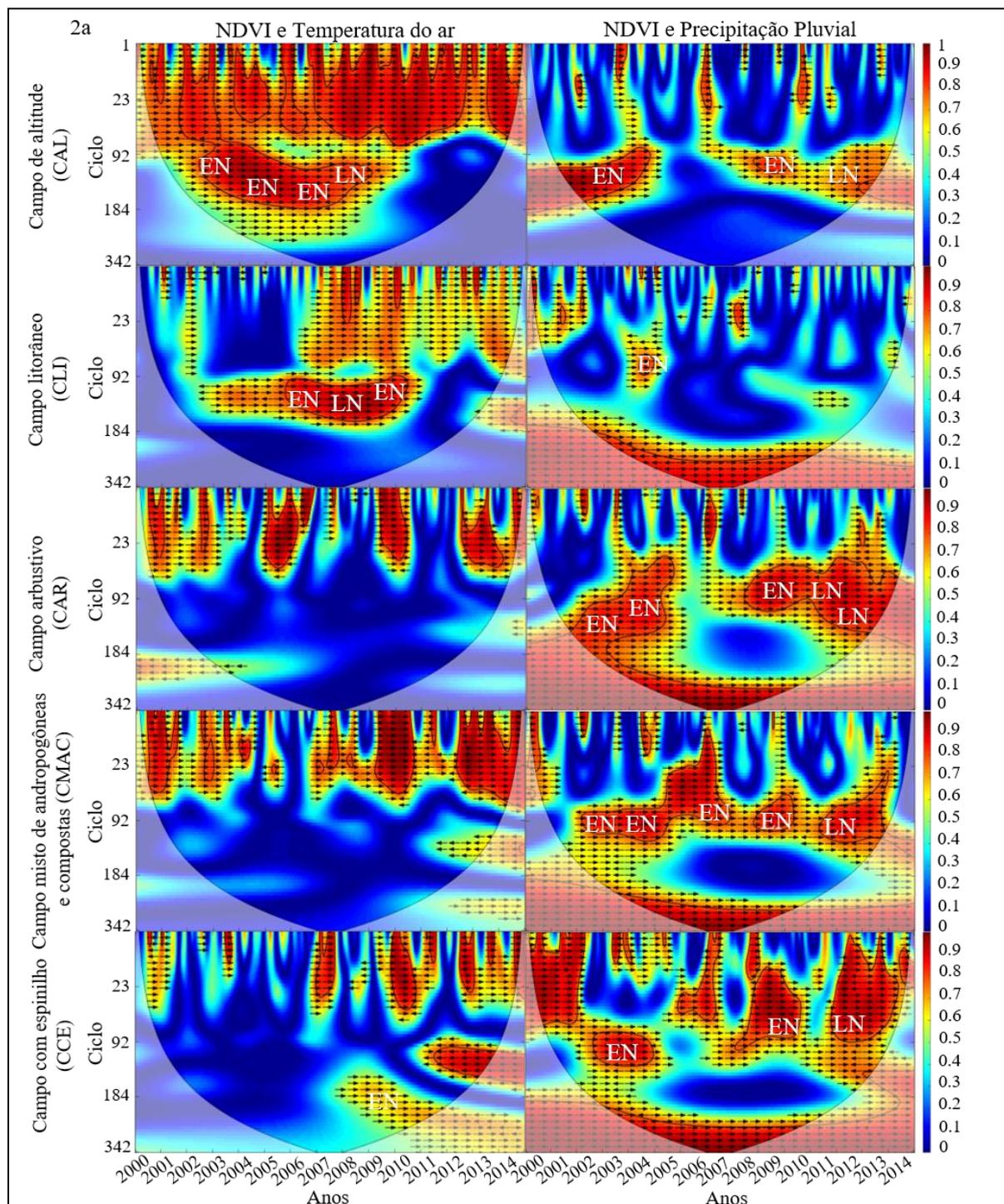


Figura 2a. Espectro de potência da Transformada Coerência (cores) e diferença de fase da ondaleta (setas) entre a série NDVI/MODIS, temperatura do ar e precipitação pluvial para a vegetação campestre de 10 fitofisionomias predominantes no Rio Grande do Sul. EN e LN referem-se aos eventos de El Niño (EN) e La Niña (LN) ocorridos no período de estudo (2000-2014).

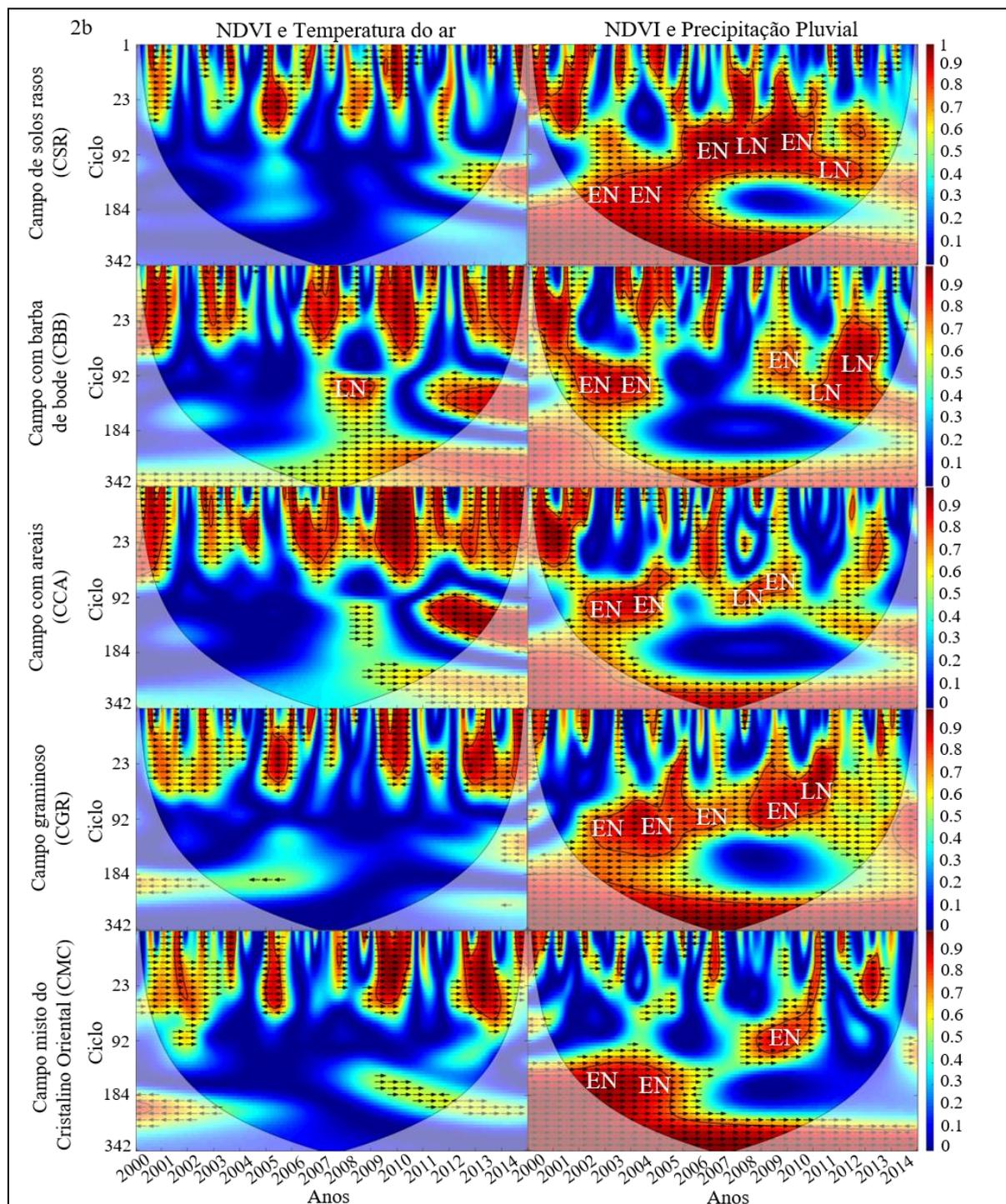


Figura 2b. Espectro de potência da Transformada Coerência (cores) e diferença de fase da ondaleta (setas) entre a série NDVI/MODIS, temperatura do ar e precipitação pluvial para a vegetação campestre de 10 fitofisionomias predominantes no Rio Grande do Sul. EN e LN referem-se aos eventos de El Niño (EN) e La Niña (LN) ocorridos no período de estudo (2000-2014).

Também, destaca-se que mesmo em anos considerados neutros, como por exemplo entre 2013 e 2014 ocorreu no Estado precipitação pluvial acima da normal climatológica para o RS e, principalmente em 2014 (DISME/INMET e CPPMet/UFPel, 2014) resultando em alta correlação com o NDVI, e em específico para as fitofisionomias CCE e CAR (Figura 2a). Estas fitofisionomias desenvolvem-se sobre solos rasos e pedregosos, com predomínio de

gramíneas de porte ereto submetidas frequentemente a déficit hídrico no verão (Overbeck et al., 2015). Em anos de regularidade ou alta ocorrência de precipitação pluvial como ocorrido em 2014, é possível observar forte relação entre o NDVI e a precipitação pluvial.

4. Conclusões

1. Nas condições de clima subtropical úmido predominantes no RS, a aplicação da Transformada Coerência é eficiente em mostrar onde e quando ocorrerem alterações no padrão fenológico da vegetação campestre, assim como em apontar a intensidade (correlação) entre os dados de NDVI e a variabilidade das condições meteorológicas.
2. No ciclo anual é mais evidente a associação entre o índice NDVI e a temperatura do ar (alta frequência).
3. No período interanual, associado aos eventos de El Niño e La Niña observou-se alta correlação entre a série de dados de NDVI e precipitação pluvial.

Agradecimentos

Andreise Moreira agradece a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da Bolsa de Doutorado.

Referências Bibliográficas

- Alcântara, E.H. **Sensoriamento remoto da temperatura e dos fluxos de calor na superfície da água do reservatório de Itumbiara (GO)**. 2010. 136 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2010.
- Ávila, A.M.H.; Berlato, M., Silva, J.; Fontana, D.C. Probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial mensal igual ou maior que a evapotranspiração potencial para a estação de crescimento das culturas de primavera-verão no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 2, n. 2, p. 149-154, 1996.
- Berlato, M.A.; Fontana, D.C. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 110 p.
- Berrisford, P.; Dee, D.; Poli, P.; Brugge, R.; Fielding, K.; Fuentes, M.; Kallberg, P.; Kobayashi, S.; Uppala, S.; Simmons, A. **The ERA-Interim archive Version 2.0**. Inglaterra: European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 2011. 27 p.
- Boldrini I.I. Campos do Rio Grande do Sul: caracterização fisionômica e problemática ocupacional. **Boletim do Instituto de Biociências**: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, n. 56, p.1-39, 1997.
- Boldrini, I.I.; Longhi-Wagner, H. M. Poaceae no Rio Grande do Sul: diversidade, importância na fisionomia e conservação. **Ciência & Ambiente**, v. 1, n. 42, p.71-92, 2011.
- Carl, G.; Doktor, D.; Koslowsky, D.; Kühn, I. Phase difference analysis of temperature and vegetation phenology for beech forest: a wavelet approach. **Stoch Environ Res Risk Assess**, v. 27, p. 1221–1230, 2012.
- Distrito de Meteorologia (DISME); Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas (CPPMet); Universidade Federal de Pelotas (UFPeL). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/boletimRioGrandeDoSul/>>. Acesso em: 15.jun.2015.
- Efron, B. Bootstrap methods: another look at the Jackknife. **Annals of Statistics**, v. 7, n. 1, p. 1-26, 1979.
- Fontana, D.C.; Berlato, M.A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 1, n. 5, p. 127-132, 1997.
- Hasenack, H.; Weber, E.; Boldrini, I.I.; Trevisan, R. **Mapa de sistemas ecológicos da ecorregião das savanas uruguaias em escala 1:500.000 ou superior e relatório técnico descrevendo insumos utilizados e metodologia de elaboração do mapa de sistemas ecológicos**. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Centro de Ecologia/The Nature Conservancy, 2010. 22 p.

Huete, A.R.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.

Huffman, G.J.; Adler, R.F.; Bolvin, D.T.; Gu, G.; Nelkin, E.J.; Bowman, K.P.; Hong, Y.; Stocker, E.F.; Wolf, D.B. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38-55, 2007.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Malha Digital**. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referencias/bases-cartograficas/malhas-digitais.html/>>. Acesso em: 12.ago.2014.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Biomas do Brasil**. 2004. Disponível em: <http://www2.ibge.gov.br/download/mapas_murais/biomas_pdf.zip>. Acesso em: 20 Set. 2013.

Kuplich, T. M.; Moreira, A.; Fontana, D. C. Série temporal de índice de vegetação sobre diferentes tipologias vegetais no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.10, n.17, p. 1116-1123, 2013.

Li, Z.; Kafatos, M. Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Niño/Southern Oscillation. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, p. 239-247, 2000.

Overbeck, G.E.; Boldrini, I.I.; Carmo, M.R.B. do; Garcia, E.N.; Moro, R.S.; Pinto, C.E.; Trevisan, R.; Zannin, A. Fisionomia dos Campos. In: Pillar, V.P.; Lange, O. (Org.). **Os Campos do Sul**. 2015. cap. 3, p. 31-39.

Overbeck, G.E.; Müller, S.C.; Fidelis, A.; Pfadenhauer, J.; Pillar, V.D.; Blanco, C.C.; Boldrini, I.I.; Both, R.; Forneck, E.D. Brazil's neglected biome: The South Brazilian Campos. **Science Direct**, v. 9, p. 101-116, 2007.

Percival, D.B.; Wang, M.; Overland, J.E. An introduction to wavelet analysis with application to vegetation time series. **Community Ecology**, v. 5, p. 19-30, 2004.

Piao, Y.; Yan, B.; Guot, S.; Guant, Y.; Li, J.; Cai, D. Change detection of MODIS Time Series using a Wavelet Transform. **ICSAI - International Conference on Systems and Informatics**, v. 1, p. 2093-2097, 2012.

Santos, C.A.G.; Freire, P.K.M.M.; Torrence, C. A transformada wavelet e sua aplicação na análise de séries hidrológicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 271-280, 2013.

Soudani, K.; Hmimina, G.; Delpierre, N.; Pontailier, J. Y.; Aubinet, M.; Bonal, D.; Caquet, B.; Grandcourt, A.; Burban, B.; Flechard, C.; Guyon, D.; Granier, A.; Gross, P.; Heinesh, B.; Longdoz, B.; Loustau, D.; Moureaux, C.; Ourcival, J. M.; Rambal, S.; Saint André, L.; Dufrêne, E. Ground-based Network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 234-245, 2012.

Tan, B.; Morisette, J.T.; Wolfe, R.E.; Gao, F.; Ederer, G.A.; Nightingale, J.; Pedelty, J.A. An Enhanced TIMESAT Algorithm for Estimating Vegetation Phenology Metrics From MODIS Data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.4, n.2, p. 361-371, 2011.

Torrence, C.; Webster, P.J. Interdecadal changes in the ENSO-Monsoon system. **American Meteorological Society**, v. 12, n. 1, p. 2679-2690. 1999.

Wagner, A.P.L. **Dinâmica temporal de Índices de Vegetação no Pampa do Rio Grande do Sul e Uruguai e suas relações com os elementos meteorológicos regionais**. 2013. 160 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013.