

Padrões climáticos e implicações ecológicas em um ambiente montanhoso tropical: análise da Cadeia do Espinhaço meridional (Brasil)

João Francisco Ferreira Sobreiro¹
Annia Susin Streher^{1,2}
Thiago Sanna Freire Silva^{1,2}

1 Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP – Univ Estadual Paulista,
Ecosystem Dynamics Observatory (Ecodyn)
Av. 24 A, 1515, CEP 13506-900, Rio Claro – SP, Brasil
joaosobreiro@live.com; tsfsilva@rc.unesp.br

2 Instituto de Biociências, UNESP – Univ Estadual Paulista,
PPG em Ecologia e Biodiversidade
Av. 24 A, 1515, CEP 13506-900, Rio Claro – SP, Brasil
annia.streher@gmail.com; tsfsilva@rc.unesp.br

Abstract: The Espinhaço Mountains are considered one of the most important centers of plant endemism in Brazil. These endemic species are distributed along a landscape composed of several environmental factors acting in different scales, such as the regional climate and the topographical complexity. This study analyzed, using remote sensing products, the spatial and temporal distribution of precipitation and temperature patterns along the southern Espinhaço Mountains, to subsidize future studies on the interaction of biodiversity and climatic patterns. We used the products CHIRPS (precipitation) and MODIS MOD11A2 (temperature) were used. We calculated the averages and extreme values of each product. Well-defined latitudinal patterns for precipitation were observed, as well as longitudinal patterns for temperature, which were directly related to the South Atlantic Convergence Zone and the Atlantic Tropical Mass, respectively. The topography of the Espinhaço Mountains acted as a temperature divisor, and showed evidence of acting as a local orographic barrier for precipitation. This work provided the visualization of these patterns through remote sensing products, giving spatial continuity to the observed phenomena, extrapolating the limited vision of observations *in situ*, common in studies of this genre, which often masks the real regional climatic conditions. Furthermore, this study provided an overview about the close relations between climate and topography, showing the influences of the relief on patterns of temperature and precipitation. Those analyses can assist further investigations on how species are distributed along topoclimate gradients in tropical mountainous environments.

Palavras-chave: climatology, remote sensing, biogeography, climatologia, sensoriamento remoto, biogeografia.

1. Introdução

A cadeia do Espinhaço é uma região montanhosa com alta importância ecológica, localizada no sudeste brasileiro, entre os estados de Minas Gerais e Bahia. A região é um divisor dos domínios do Cerrado e da Mata Atlântica em sua porção centro-sul, e também um divisor do Cerrado e Caatinga em sua porção norte (SILVA et al., 2008). O Espinhaço é considerado um dos mais importantes centros de endemismos do Brasil, abrigando uma rica diversidade vegetal em um ambiente de transição climática e de biomas (RAPINI et al., 2008; SILVA et al., 2008). As espécies localizadas na região estão distribuídas ao longo de uma paisagem composta por vários fatores que as influenciam em diferentes escalas, tais como o clima atuante e a complexidade topográfica.

As montanhas são importantes elementos do sistema climático, sendo um dos mecanismos catalizadores da ciclogênese em médias latitudes, através de perturbações causadas nos padrões de fluxo atmosférico em larga escala (BENISTON et al, 1997).

Além de influenciar a dinâmica atmosférica, regiões montanhosas cumprem função importante no que diz respeito à distribuição espacial da biodiversidade. A complexidade topográfica influencia diretamente os padrões de riqueza de espécies e os processos de especiação (TRIGAS et al., 2013). Alta complexidade topográfica (por exemplo, variação na

inclinação e orientação de vertentes) aumenta a diversidade de habitats, disponibilidade espacial para particionamento de nichos e especiação, assim, permitindo a coexistência de diferentes espécies (HORTAL et al., 2009). Desta maneira, a complexidade topográfica propicia características favoráveis à manutenção, ou aumento, da riqueza de espécies (HORTAL et al., 2009).

A compreensão das relações entre topografia e clima e suas consequências sobre a distribuição de espécies exige uma análise detalhada dos padrões espaciais e temporais de temperatura e precipitação que atuam sobre a região. Entretanto, estas análises são limitadas pela baixa densidade da rede de monitoramento meteorológico no Brasil, além da escala reduzida de observação dos fenômenos climáticos; estações meteorológicas em solo apresentam características pontuais, que expressam maior correlação com os fenômenos microclimáticos, uma vez que sensores espalhados pela superfície terrestre coletam informações precisas da precipitação e temperatura somente para a pequena área localizada no entorno do dispositivo (DE ANGELIS, 2005). O monitoramento completo de extensas áreas exige, assim, a existência de uma densa rede de pluviômetros, o que é inviabilizado em áreas de difícil acesso como, por exemplo, regiões montanhosas (DE ANGELIS, 2005).

As dificuldades de aquisição de dados meteorológicos podem ser superadas através do uso de produtos de sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto aplicado à informações atmosféricas nos dá continuidade espacial aos fenômenos climáticos observados em escala local, assumindo um caráter de análise zonal e regional, facilitando a compreensão dos processos climáticos multi-escalares que atuam conjuntamente sobre determinada região da superfície terrestre (MENDELSON et al., 2007).

Desta maneira, este estudo teve por objetivo analisar, através de produtos de sensoriamento remoto, a distribuição espaço-temporal dos padrões de precipitação e temperatura na cadeia do Espinhaço meridional, afim de subsidiar futuros estudos sobre a interação da biodiversidade com os padrões climáticos atuantes.

2. Materiais e Métodos

A Cadeia do Espinhaço se estende por cerca de 1000 km, desde o Estado de Minas Gerais chegando até a Chapada Diamantina, na Bahia. Sua porção meridional, alvo de estudo deste projeto, abrange uma área compreendendo desde o centro até o norte de Minas Gerais, encontrando-se entre as faixas latitudinais de 15° e 20° Sul (Figura 1).

A vegetação da Cadeia do Espinhaço é caracterizada pelo alto nível de endemismo; a região representa cerca de 1% do território brasileiro mas abriga aproximadamente 10% da diversidade de plantas já registradas para o Brasil (RAPINI, 2008). A área de estudo se situa na interseção entre três domínios fitogeográficos: a Caatinga ao norte, a Mata Atlântica à leste, e o Cerrado à oeste, além da presença dos campos rupestres e campos de altitude nos topos de morros, sendo esta vegetação associada à presença de solos quartzíticos (BITENCOURT, 2013).

A topografia da região e suas relações com os padrões climáticos foram analisados através de modelos digitais de elevação obtidos dos produtos do projeto *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). Utilizamos o modelo digital de elevação com resolução de 3 arcos segundo, que corresponde à uma resolução espacial aproximada de 90 metros, e resolução vertical aproximada de 16 metros (GROHMANN, 2008). Os modelos digitais de elevação foram adquiridos através do site do *Earth Resources Observation and Science Center* (EROS), que é administrado pela *U.S. Geological Survey* (<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM>).

Os padrões temporais e espaciais de precipitação e temperatura foram analisados através de dados do produto *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS) e

dados de temperatura de superfície gerados a partir de imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), respectivamente.

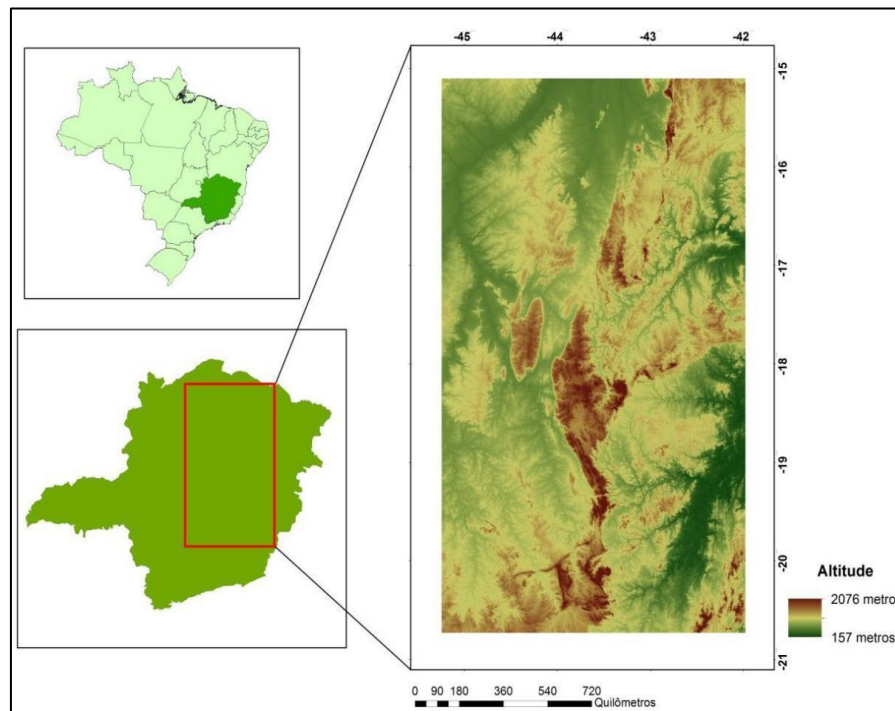


Figura 1: Localização da área de estudo. À esquerda, localização do estado de Minas Gerais na região sudeste do Brasil, e a área correspondente à Cadeia do Espinhaço Meridional. À direita, modelo digital de elevação do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), correspondente à área de estudo, evidenciando a complexidade topográfica da região.

O produto CHIRPS é desenvolvido por cientistas da Universidade da Califórnia, Santa Barbara e do *U.S. Geological Survey Earth Resources Observation and Science Center* (FUNK *et al*, 2014). Este produto quasi-global de precipitação está disponível em escalas temporais diárias à sazonais, com resolução espacial de 0.05° (aproximadamente 5.5 por 5.5 km), e com cobertura temporal de 1981 até o presente. Os três tipos de informação principais usadas na produção do produto CHIRPS são: (1) médias de precipitação global por produtos de satélite, (2) *grids* de estimativa de precipitação em infravermelho através da duração de nuvens frias (*cold cloud duration – CCD*) e (3) observações de precipitação *in situ*.

Buscando validar os dados do produto CHIRPS, foram selecionadas todas as 112 estações de solo localizadas na área de estudo, que possuíssem no mínimo 30 anos de dados de precipitação disponíveis, contemplando diferentes combinações de latitudes, longitudes e altitudes. Os dados brutos de cada estação foram adquiridos no site *hidroweb.ana.gov.br*, coordenado pela Agência Nacional de Águas (ANA).

Para as análises de temperatura, utilizamos o produto *Terra Day Land Surface Temperature MOD11A2*, versão 5, produzido a partir de imagens do sensor MODIS. Este produto compreende estimativas de temperatura da superfície terrestre (*land surface temperature*, LST) em uma resolução espacial de 1km e em resolução temporal com intervalos de 8 dias, gerados a partir da agregação (composição) de observações diárias. A composição de 8 dias foi escolhida em lugar do produto de observações diárias (MOD11A1) buscando a minimização de *gaps* e erros de observação devido à cobertura de nuvens. Os valores de LST foram convertidos para graus Celsius ($^\circ\text{C}$), utilizando-se a equação $LST * 0.02 - 273.15$ (NASA LP DAAC, 2016), e então foram calculados os percentis de 90% e 10% e a amplitude entre estes valores (Q90 – Q10) para toda a série, com o intuito de caracterizar a distribuição geográfica e topográfica dos extremos de temperatura, uma vez que esses valores

podem ser limitantes para a manutenção da vegetação. Foram calculados os percentis de temperatura uma vez que valores máximos e mínimos podem conter erros de aquisição dos dados, gerando ruídos na análise final.

O processamento e análise dos dados de precipitação e temperatura foram realizados utilizando os softwares R, versão 3.03 (R Development Core Team, 2010) e QGIS, versão 2.16.1.

3. Resultados e Discussão

Os dados CHIRPS foram validados através de regressão linear com dados de 112 estações de solo presentes na área de estudo, operadas pela Agência Nacional de Águas (ANA). Os dados CHIRPS apresentaram alta correspondência com os dados das estações meteorológicas, obtendo-se $R^2 = 0,98$ (Figura 2).

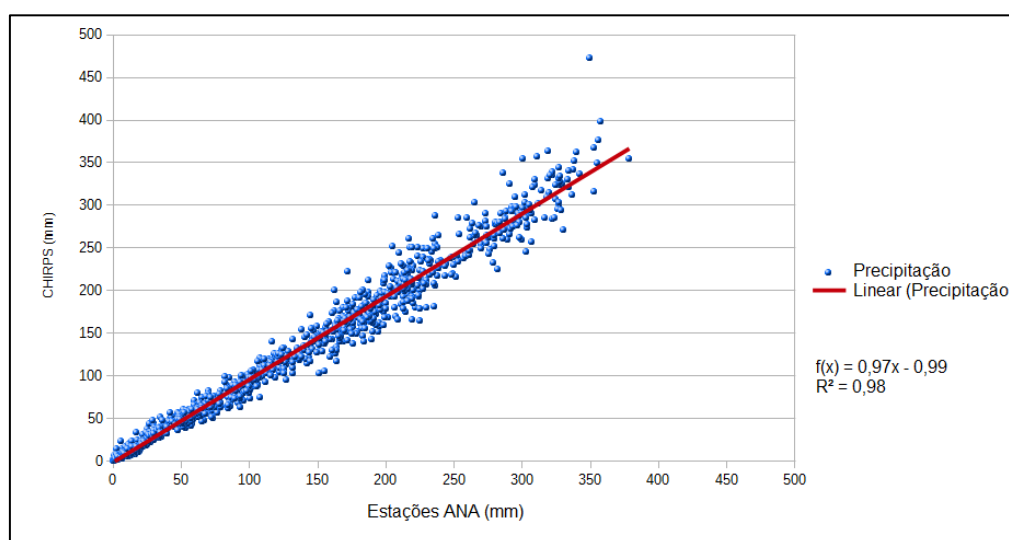


Figura 2: Relação entre os dados brutos de precipitação CHIRPS e das estações meteorológicas de solo selecionadas, na porção meridional da Cadeia do Espinhaço, MG, Brasil.

Os dados médios de precipitação mostraram que a região de estudo possui distribuição temporal bem demarcada em duas estações, uma chuvosa e uma seca; a estação chuvosa abarca os meses de Outubro, Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro, Março e Abril, e a estação seca engloba os meses de Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro (Figura 3).

Observou-se que nas latitudes mais altas há um considerável aumento do volume médio de precipitação em relação às latitudes mais baixas (Figura 4), com uma diferença de 322mm na precipitação média anual entre 15° e 20° graus de latitude (32% em relação ao menor valor). A precipitação no Estado de Minas Gerais durante a estação chuvosa está estreitamente ligada aos efeitos da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS atua de forma estacionária, principalmente nas latitudes 19° e 20° sul, o que corresponde à porção sul da Cadeia do Espinhaço, justificando a presença marcante do maior volume de chuvas nestas faixas latitudinais.

Foi possível observar um maior volume de precipitação na maioria dos meses chuvosos, tanto para as médias das regiões quanto para as médias dos locais onde existem estações meteorológicas, na porção oeste e na área montanhosa quando comparadas com a porção leste, apontando para evidências da atuação da ZCAS, com orientação noroeste/sudeste, e também de atuação da topografia como barreira local para precipitação e conseqüente maior volume de chuvas em altitude (Figura 5).

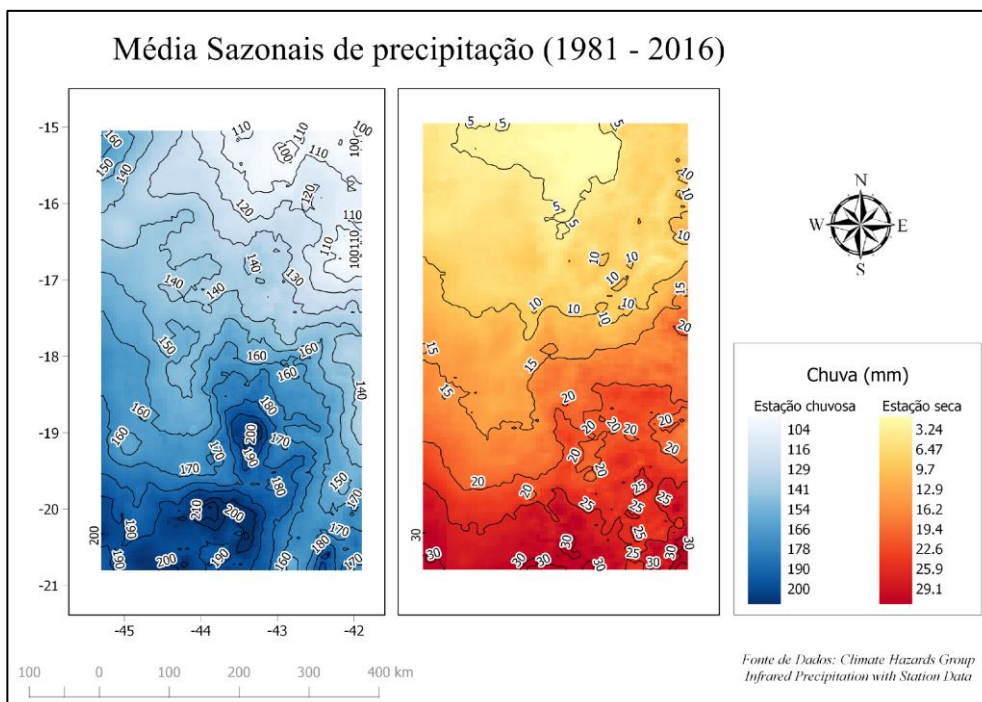


Figura 3: Médias climatológicas extraídas dos valores mensais de precipitação CHIRPS para o período chuvoso (Outubro, Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro, Março e Abril), à esquerda e, à direita, para o período seco (Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro), ao longo da Cadeia do Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil.

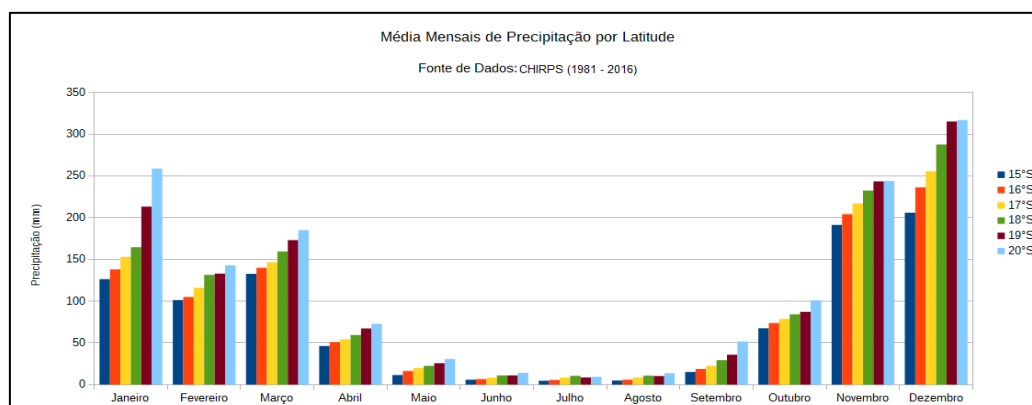


Figura 4: Médias mensais de precipitação extraídas por faixa latitudinal de 15°S à 20°S. Os dados são referentes aos dados CHIRPS no período 1981-2016.

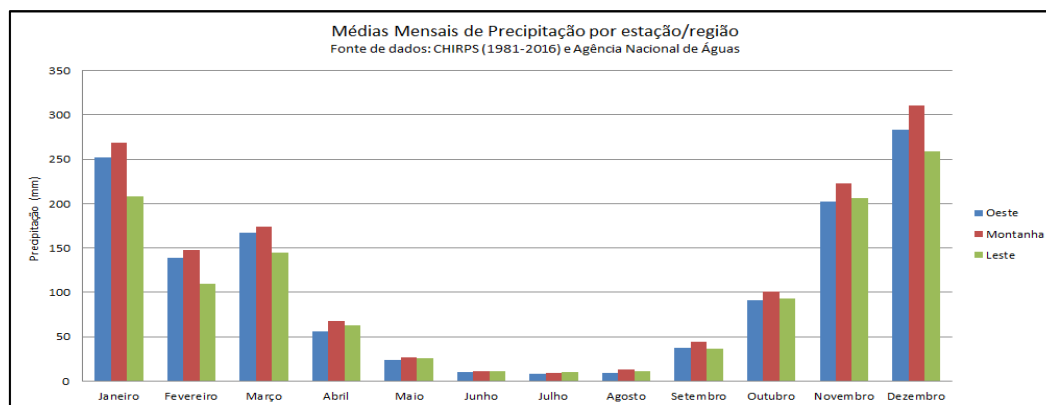


Figura 5: Médias mensais de precipitação por localização de estações meteorológicas (ANA). As regiões foram selecionadas de acordo com a topografia, sendo áreas rebaixadas à oeste e leste, e a cadeia de montanhas que corresponde à Cadeia do Espinhaço Meridional. Foi realizada a extração dos dados de precipitação CHIRPS

(1981-2016) respeitando as localizações das estações meteorológicas, controladas pela Agência Nacional de Águas, e as regiões pré-estabelecidas (leste; oeste; montanha).

Os extremos de temperatura observados, extraídos de toda a série histórica, apresentaram distribuição espacial equivalente (Figura 6), uma vez que as menores temperaturas concentraram-se na porção leste da Cadeia do Espinhaço, entre as latitudes aproximadas de 17°S à 20°S, e as maiores temperaturas, em sua maioria, estabeleceram-se na porção oeste do Espinhaço, com destaque para as latitudes de 15°S à 17°S. O percentil de 90% de temperatura variou entre 27,5°C e 40,4°C, enquanto o percentil de 10% variou entre 19,2°C e 27,6°C.

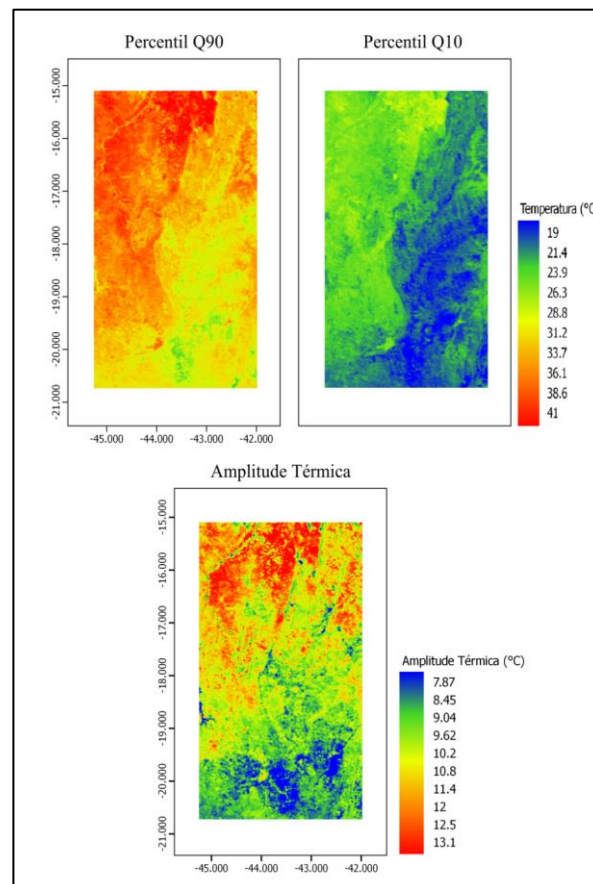


Figura 06: Extremos de temperatura de toda a série histórica (2000-2015) ao longo da Cadeia do Espinhaço Meridional (Brasil) calculados através dos percentis de 90 e 10, utilizando o produto MOD11A2 LST do sensor MODIS.

Foi possível observar a forte influência da topografia nos padrões espaciais de distribuição das temperaturas, uma vez que as maiores temperaturas encontraram-se na porção oeste e as menores ao leste da Cadeia do Espinhaço (Figura 7). Este padrão pode ser explicado pela ação da Massa Tropical Atlântica sobre a região, uma vez que é possível identificar uma concentração de nuvens que se estende por toda porção leste da Cadeia do Espinhaço, relacionando-se com a maior umidade e também com temperaturas mais baixas devido à menor incidência dos raios solares na superfície (DOS REIS et al., 2005).

Outro fenômeno capaz de justificar o padrão de temperatura observado é o gradiente variável de temperatura em regiões montanhosas (BONAN, 2016). O ar ascendente na vertente à barlavento, proveniente da Massa Tropical Atlântica, resfria seguindo a taxa de resfriamento adiabático do ar seco (1°C/100m) até este ar tornar-se saturado. A partir deste momento há o surgimento de nuvens e o resfriamento do ar decresce seguindo a taxa de resfriamento adiabático do ar úmido (0,5°C/100m). Caso a formação de nuvens resulte em

precipitação, o ar torna-se insaturado e descende na vertente à sotavento seguindo a taxa de aquecimento adiabático do ar seco ($1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), desta maneira, o ar ao chegar à porção oeste do Espinhaço, apresentaria temperatura maior do que aquela encontrada inicialmente na porção leste.

Sabe-se que a face leste da Cadeia do Espinhaço é dominada por formações vegetais de Mata Atlântica e a face oeste por formações de Cerrado. O volume de precipitação não parece justificar sozinho esta divisão, por apresentar um padrão latitudinal mais pronunciado que o padrão longitudinal. Entretanto, os padrões de temperatura em conjunto com a formação de nuvens estacionárias, provenientes da Massa Tropical Atlântica, parecem propiciar um ambiente com temperaturas mais amenas, o que pode resultar em redução da perda de água por evapotranspiração, formando assim um ambiente mais úmido na face leste, favorecendo a manutenção das formações florestais de Mata Atlântica, enquanto a face oeste experimenta um volume de precipitação similar ao da face leste mas com temperaturas mais altas, gerando maior perda de água atmosférica e propiciando características favoráveis às formações vegetacionais do Cerrado.

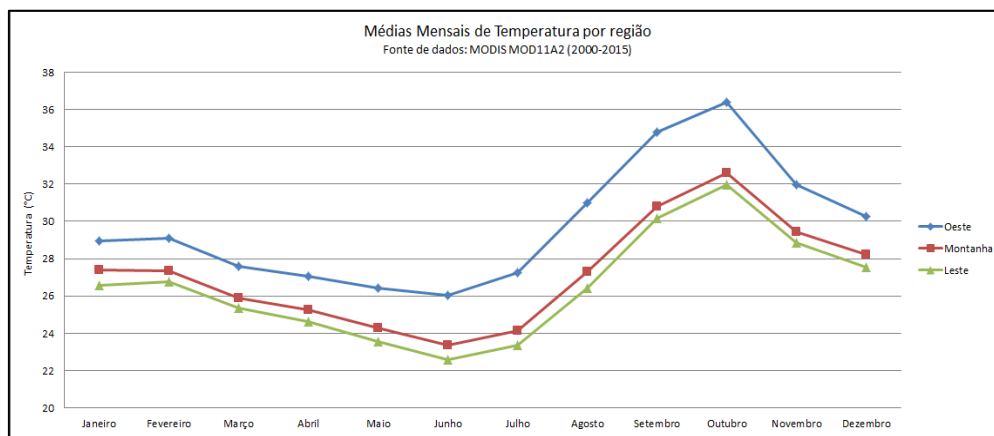


Figura 07: Média mensais de temperatura por região. As regiões foram selecionadas de acordo com a topografia, sendo áreas rebaixadas à oeste e leste, e a cadeia de montanhas que corresponde à Cadeia do Espinhaço Meridional. Os dados foram analisados através de médias calculadas do produto MODIS MOD11A2 (2000-2015).

4. Conclusões

Neste trabalho, foi possível caracterizar os padrões de precipitação e temperatura para a Cadeia do Espinhaço Meridional, observando-se padrões latitudinais bem demarcados para as chuvas, e padrões longitudinais para a temperatura. O maior volume de chuvas deu-se na porção sul da área de estudo, enquanto as maiores temperaturas apresentaram-se na porção oeste da região. Estas características estão diretamente ligadas à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul e da Massa Tropical Atlântica, respectivamente. Não foram encontradas diferenças importantes de precipitação em relação ao gradiente longitudinal da região (face leste vs. face oeste), mas sim diferenças significativas em relação ao gradiente latitudinal. Entretanto, foi possível observar ligeiros aumentos de precipitação devido à altitude, apontando para indícios de atuação local da Cadeia do Espinhaço como barreira orográfica para a distribuição das chuvas.

Este trabalho proporcionou a visualização destes padrões através de produtos de sensoriamento remoto, dando continuidade espacial aos fenômenos observados, extrapolando a ótica pontual das observações de campo, comum em estudos deste gênero, e que muitas vezes mascaram as reais condições climáticas regionais.

Agradecimentos

Agradecemos o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP #2013/50155-0). J.F.F. Sobreiro é bolsista PIBIC CNPq (#2016/37877), A.S. Streher é bolsista de doutorado FAPESP #2015/17534-3, e T. S F. Silva é bolsista de produtividade CNPq (processo n° 310144/2015-9)..

Referências Bibliográficas

BENISTON, M.; DIAZ H. F.; BRADLEY, R. S. Climate Change at high elevation sites: an overview. **Climate Change**, 36, 233p – 251p, 1997.

BONAN, G. **Ecological Climatology: concepts and applications**. New York: Cambridge University Press, 2016. 692p.

BITENCOURT, C. C. C. **Biogeografia das Asclepiadoideae (Apocynaceae) na Cadeia do Espinhaço: o futuro incerto dos refúgios glaciais de Campos Rupestres**. 2013. 64p. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Estadual de Feira de Santana, 2013.

DE ANGELIS, C. F. Análise dos sistemas precipitantes no Brasil a partir de dados processados em um integrador de informações adquiridas por pluviômetros, satélites, rede de relâmpagos e radares meteorológicos - PRECIBRA. **Projeto de Pesquisa CPTEC-INPE**, 2005.

DOS REIS, R. J.; GUIMARÃES, D. P.; COELHO, C. W. G. A.; PAIXÃO, G. M.; BAPTISTA, E. A. Análise espacial do período chuvoso em Minas Gerais. **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada - 4 a 9 de setembro de 2005 - Universidade de São Paulo**.

GROHMANN, C. H.; Aplicações dos Modelos de Elevação SRTM em Geomorfologia. **Rev. Geogr. Acadêmica** v.2 n.2, viii. 2008, p. 73-83.

GROVES, C. R.; GAME, E. T.; ANDERSON, M. G.; CROSS, M.; ENQUIST, C.; FERDAÑA, Z.; GIRVETZ, E.; GONDOR, A.; HALL, K. R.; HIGGINS, J.; MARSHALL, R.; POPPER, K.; SCHILL, S.; SHAFER, S. L. Incorporating climate change into systematic conservation planning. **Biodiversity and Conservation**, Biodivers Conserv (2012) 21:1651–1671, 2012.

HORTAL, J.; TRIANTIS, K. A.; MEIRI, S.; THÉBAULT, E.; SFENTHOURAKIS, S. Island Species Richness Increases with Habitat. **The American Naturalist**. Vol. 174, No. 6, p. 205-217, 2009.

MANOSSO, F. C.; GOMES, M. F.; AOKI, A.; MANOSSO, D. C. C. Distribuição espacial e temporal da precipitação e temperatura média na região da serra do cadeado (PR). **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 9 – Vol. 12, p. 172 -186, JAN/JUL 2013.

MENDELSON, R.; KURUKULASURIYA, P.; BASIST, A.; KOGAN, F.; WILLIAMS, C. Climate analysis with satellite versus weather station data. **Climatic Change**, 81:71–83 DOI 10.1007/s10584-006-9139-x, 2007.

SILVA, J. D. A. et al. Identificação de áreas insubstituíveis para conservação da Cadeia do Espinhaço , estados de Minas Gerais e Bahia , Brasil. **Megadiversidade**, v. 4, n. 1–2, p. 248–270, 2008.

TRIGAS, P.; PANITSA M.; TSIFTSIS S. Elevational Gradient of Vascular Plant Species Richness and Endemism in Crete – The Effect of Post-Isolation Mountain Uplift on a Continental Island System. **PLoS ONE** 8(3): e59425. doi:10.1371/journal.pone.0059425