

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

MILEIDE DE HOLANDA FORMIGONI

**ANÁLISE TEMPORAL DA VEGETAÇÃO ASSOCIADA À ESTIMATIVA DE
PRECIPITAÇÃO PLUVIAL POR SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE**

Alegre, ES

2018

MILEIDE DE HOLANDA FORMIGONI

**ANÁLISE TEMPORAL DA VEGETAÇÃO ASSOCIADA À ESTIMATIVA DE
PRECIPITAÇÃO PLUVIAL POR SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Produção Vegetal na linha de pesquisa de Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas.

Orientador: Dr. Alexandre Cândido Xavier.

Coorientador: Dr. Alexandre Rosa dos Santos.

Alegre, ES

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Sul, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Bibliotecária: Lizzie de Almeida Chaves – CRB-6 ES-000871/O

F723a Formigoni, Mileide de Holanda, 1981-
Análise temporal da vegetação associada à estimativa de precipitação
pluvial pelo sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do rio Doce /
Mileide de Holanda Formigoni. – 2018.
119 f. : il.

Orientador: Alexandre Candido Xavier.

Coorientador: Alexandre Rosa dos Santos.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Geoprocessamento. 2. Sensoriamento remoto. 3. Recursos
hídricos. I. Xavier, Alexandre Candido. II. Santos, Alexandre Rosa dos.
III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias
e Engenharias. IV. Título.

CDU: 63

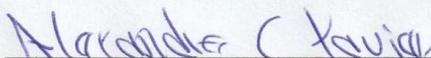
MILEIDE DE HOLANDA FORMIGONI

ANÁLISE TEMPORAL DA VEGETAÇÃO ASSOCIADA À ESTIMATIVA DE
PRECIPITAÇÃO PLUVIAL POR SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

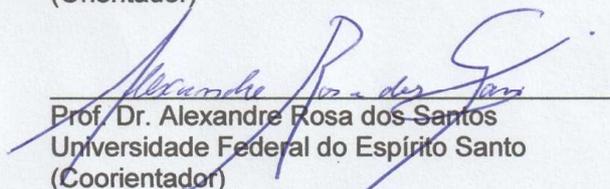
Tese de doutorado apresentada ao Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal, na linha de Pesquisa de Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas.

Aprovada em 02 de março de 2018.

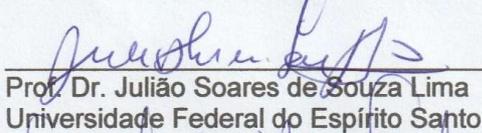
COMISSÃO EXAMINADORA



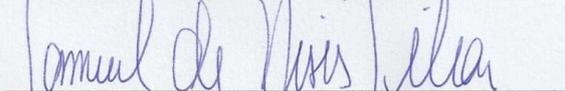
Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier
Universidade Federal do Espírito Santo
(Orientador)



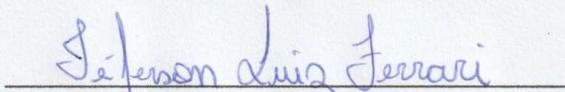
Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
(Coorientador)



Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Samuel de Assis Silva
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Jeferson Luiz Ferrari
Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Alegre

AGRADECIMENTOS

Pela conquista de concluir esse trabalho agradeço ao meu orientador, professor Dr. Alexandre Cândido Xavier, pela atenção, ensinamentos e confiança que fizeram encorajar-me cada vez mais nessa jornada.

Agradeço ao meu coorientador, professor Dr. Alexandre Rosa dos Santos, pela grande ajuda e incentivo de sempre buscar novos conhecimentos e criar possibilidades para minha formação profissional e pessoal.

Agradeço em especial aos meus pais, Zuleide e Nilson, pela criação e sabedoria transmitida, por sempre acreditarem e confiarem que meus esforços nunca foram em vão. Muito obrigada pelo apoio imprescindível de sempre e por entenderem a importância que essa conquista tem para mim. Aos meus irmãos, Lorena e Tiago, pelos momentos de descontração que me fizeram aliviar a tensão e pelo simples fato de existirem em minha vida.

Ao meu esposo, Douglas, que nunca mediu esforços para me apoiar e incentivar, obrigada por transmitir tanto amor e carinho e acima de tudo obrigada pela compreensão e paciência nesses quatro anos. Você é um parceiro e tanto!

Aos meus filhos, Nicole e Enrico, obrigada pela vida de vocês na minha vida. Agradeço pelos sorrisos e gargalhadas doadas a mim e pela compreensão nos momentos de ausência, vocês nem imaginam o quanto isso me deu força e coragem para seguir e conseguir fechar esse ciclo da minha vida.

Aos mestres do Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal do Espírito Santo, pelas inúmeras contribuições e experiências transmitidas.

Aos professores, Dr. Julião Soares de Souza Lima, Dr. Samuel de Assis Silva e Dr. Jeferson Luiz Ferrari, por terem aceitado compor a banca. Às secretárias do Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, Madalena e Alessandra, por sempre me atenderem bem, pela paciência e disposição.

Aos colegas integrantes do Geotechnology Applied to Global Environment (GAGEN), em especial à Rosane e Elvis por compartilharem seus conhecimentos quando mais precisei. A contribuição de vocês foi indispensável para conclusão deste trabalho.

Aos amigos e familiares que de alguma forma participaram dessa etapa da minha vida, especialmente ao casal Marlla e Victor, pela amizade e apoio de sempre. Conviver com vocês na ausência da família foi fundamental para mim.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro na concessão da bolsa de estudos, que foi fundamental para a realização deste trabalho.

Agradeço, sobretudo, a Deus, por permitir que eu tenha tanto a agradecer.

*“Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e seus planos serão bem-sucedidos.” (Provérbios 16:3)*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Comportamento espectral de uma folha verde saudável.....	29
Figura 1.2	Localização da área de estudo, com destaque das macrorregiões dos estados de MG e ES inseridas na BHRD.....	43
Figura 2.1	Fluxograma contendo as etapas da pesquisa.....	61
Figura 2.2	Uso e cobertura da terra para a bacia hidrográfica do rio Doce.....	63
Figura 2.3	Unidades de Conservação inseridas na bacia hidrográfica do rio Doce....	64
Figura 2.4	Cenas h13v10, h13v11, h14v10 e h14v11 da área imageada pelo sensor MODIS.....	65
Figura 2.5	Representação do recorte da área de estudo correspondente à bacia hidrográfica do rio Doce. a. limite da área de estudo a nível de Brasil; b. dados brutos de índice de vegetação com destaque para a BHRD; c. dados de índices de vegetação após extração dos pixels indesejados e recorte da área de estudo.....	68
Figura 2.6	Média dos perfis temporais dos índices de vegetação NDVI e EVI para o período de 2001 a 2016 na bacia hidrográfica do rio Doce.....	71
Figura 2.7	Perfil temporal dos índices de vegetação NDVI e EVI para as classe de uso e cobertura da terra (IBGE, 2014), na bacia hidrográfica do rio Doce durante o período de 2001 a 2016. a. Vegetação florestal; b. Vegetação campestre; c. Silvicultura; d. Agricultura; e. Pastagem natural; f. Pastagem plantada; g. mosaico de vegetação florestal e agropecuária; h. mosaico de vegetação florestal e agricultura.....	73
Figura 2.8	Tendência linear dos índices de vegetação EVI e NDVI para o período de 2001 a 2016. Tendência de decréscimo da vegetação verde (intervalo de valores de - 28 a 0); tendência de aumento da vegetação verde (intervalo de 0,1 a 28).....	75
Figura 2.9	Tendência monotônica de Mann-Kendall dos índices de vegetação EVI e NDVI para o período de 2001 a 2016. Tendência negativa (intervalo de valores de -0,7 a 0); tendência positiva (intervalo de 0,1 a 0,6).....	77
Figura 2.10	Significância de Mann-Kendall dos perfis temporais dos índices de vegetação EVI e NDVI para o período de 2001 a 2016.....	78
Figura 3.1	Fluxograma contendo as etapas da pesquisa	88
Figura 3.2	Representação das imagens obtidas pelo satélite TRMM, produto 3B43-V7, com destaque para o índice médio de precipitação mensal (mm), para o ano de 2004 na bacia do rio Doce.....	92

Figura 3.3	Coeficiente médio mensal de NDVI e EVI no período de 2001 a 2016 na bacia hidrográfica do rio Doce.....	97
Figura 3.4	Índices médios anuais de precipitação pluvial (mm), estimado à partir dos dados do TRMM para a bacia hidrográfica do rio Doce, entre 2001 a 2016.....	98
Figura 3.5	Médias mensais dos índices de precipitação pluvial (mm), estimados à partir dos dados oriundos do TRMM, entre 2001 e 2016 na bacia hidrográfica do rio Doce e seus respectivos valores percentuais.....	99
Figura 3.6	Valores mínimos, médios e máximos da precipitação pluvial (mm), estimados à partir dos dados oriundos do TRMM, para o período de 2001 a 2016 na bacia hidrográfica do rio Doce.....	100
Figura 3.7	Correlação entre os perfis temporais anuais dos índices NDVI e EVI e da precipitação pluvial na BHRD durante o período de 2001 a 2016.....	101
Figura 3.8	Correlação linear de Pearson entre os valores dos índices de vegetação (EVI e NDVI) e a precipitação pluvial na BHRD. *Valores significativos a 1% de probabilidade. N=192.....	102
Figura 3.9	Cálculo de “r” na correlação espacial pixel a pixel entre as séries de imagens EVI e NDVI com índices de precipitação pluvial.....	104
Figura 3.10	Coeficiente médio de NDVI e EVI associado ao índice de precipitação pluvial no período de 2001 a 2016 na bacia hidrográfica do rio Doce. a. Mosaico de vegetação florestal e agropecuária; b. Pastagem plantada; c. Mosaico de vegetação florestal e agricultura; d. Vegetação florestal.....	105
Figura 3.11	Composições RGB nas amplitudes e fases resultantes da análise de tendência sazonal para o índice de EVI no período de 2001 a 2016.....	109
Figura 3.12	Composições RGB nas amplitudes e fases resultantes da análise de tendência sazonal para o índice de NDVI no período de 2001 a 2016.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Produtos do sensor MODIS voltados para a superfície terrestre.....	32
Tabela 1.2	Instrumentos do satélite TRMM.....	35
Tabela 1.3	Características dos produtos derivados do satélite TRMM.....	37
Tabela 2.1	Descrição e quantificação das classes de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Doce.....	62
Tabela 2.2	Datas utilizadas pelo sensor MODIS das imagens adquiridas para a área de estudo.....	66
Tabela 2.3	Valores de confiabilidade para os índices EVI e NDVI obtidos das imagens Pixel Reliabilily.....	67
Tabela 3.1	Quantidade das imagens MODIS para cada <i>tile</i> representativo da área de estudo no período analisado.....	89
Tabela 3.2	Resposta dos índices de vegetação aos índices de precipitação pluvial em diferentes níveis de defasagem.....	94
Tabela 3.3	Representação das etapas envolvidas na Análise de Tendência Sazonal (STA).....	96
Tabela 3.4	Correlação entre os valores médios de EVI e NDVI atribuídos às classes de uso e cobertura da terra (descritas pelo IBGE, 2014) e os índices de precipitação pluvial na bacia hidrográfica do rio Doce para o período de 2001 a 2016 por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r).....	103
Tabela 3.5	Resultados da correlação entre os índices de vegetação do MODIS e os índices de precipitação oriundos do TRMM para o período de 2001 a 2016, observando o período de defasagem de 0 a 3 meses...	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BHRD	Bacia Hidrográfica do Rio Doce
CAMS	Climate Assessment and Monitoring System (Sistema de Avaliação e Monitoramento Climático)
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System (Nuvens e o Sistema de Energia Radiante da Terra)
EOS	Earth Observing System (Sistema de observação da Terra)
EOSDIS	NASA's Earth Observing System Data and Information System (Sistema de Informação e Dados do Sistema de Observação da Terra da NASA)
ETM	Earth Trends Modeler (Modelagem das Tendências da Terra)
EVI	Enhanced Vegetation Index (Índice de Vegetação Melhorado)
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite (Satélite Ambiental Operacional Geoestacionário)
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre (Centro Global de Climatologia de Precipitação)
HDF	Hierarchy Data Format (Formato de Dados de Hierarquia)
IMG	Integrated Multimedia Gateway
IVs	Índices de Vegetação
JAXA	Japanese Aerospace Exploration Agency (Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial)
LAG	Período de defasagem
LIS	Lightning Imaging Sensor
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Espectroradiômetro de Imagem de Resolução Moderada)
MRT	Modis Reprojection Tools (Ferramenta de Reprojção MODIS)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

NetCDF	Network Common Data Form (Formulário de Dados Comuns da Rede)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica)
PR	Precipitation radar (Radar de Precipitação)
STA	Seasonal Trend Analysis (Análise de Tendência Sazonal)
RGB	Red Green Blue (Vermelho Verde Azul)
TIFF	Tagged Image File Format (Formato de Arquivo de Imagem Marcado)
TMI	TRMM Microwave Imager (Imageador de Micro-ondas)
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission (Missão de Medição de Chuvas Tropicais)
UCs	Unidades de Conservação
UTM	Universal Transverse Mercator
UCT	Uso e Cobertura da Terra
UTC	Universal Time Coordinated (Tempo Universal Coordenado)
VIRS	Visible and Infrared Scanner (Sensores no Visível e Infravermelho)

FORMIGONI, Mileide de Holanda, Universidade Federal do Espírito Santo, março de 2018. **Análise temporal da vegetação associada à estimativa de precipitação pluvial por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do rio Doce.** Orientador: Dr. Alexandre Cândido Xavier. Coorientador: Dr. Alexandre Rosa dos Santos.

RESUMO GERAL

O sensoriamento remoto destaca-se como um dos métodos mais modernos para monitorar os ecossistemas terrestres, abrangendo áreas extensas e com alta resolução temporal. A busca pelo conhecimento da dinâmica temporal da vegetação revela padrões, processos e mecanismos usados para obter estratégias de proteção e conservação dos recursos florestais, que se encontram cada vez mais prejudicados direta ou indiretamente por alterações antrópicas, levando à necessidade de inferir sobre a realidade que envolve as conexões entre as esferas de cunho ambiental, econômico e social. O levantamento de informações relacionadas às variáveis climáticas no contexto da vegetação, sobretudo a precipitação, é fundamental para inúmeras aplicações. A utilização de dados oriundos de sensores orbitais para análise da correlação entre os índices de vegetação e a precipitação pluvial contribui no avanço das pesquisas envolvendo a resposta da vegetação em grandes áreas. O objetivo dessa pesquisa foi a análise de tendências interanuais e sazonais do comportamento da vegetação envolvendo o conjunto de observações de forma constante, dos índices de vegetação *Enhanced Vegetation Index* (EVI) e *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), produto MOD13Q1 e da precipitação pluvial utilizando dados do *satélite Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), produto 3B43-V7 na bacia hidrográfica do rio Doce, no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2016. As análises das tendências interanuais das séries temporais do EVI e do NDVI foram realizadas mediante os perfis temporais e as metodologias de tendência linear, correlação linear e tendência monotônica de Mann-Kendall. As tendências sazonais foram analisadas utilizando resultados das correlações entre os dados de precipitação e índices de vegetação, por meio das técnicas de modelagem linear, expressas estatisticamente. Com a geração dos perfis temporais dos índices de vegetação, observou-se que o EVI apresentou maior variação de valores quando comparado ao NDVI. As tendências interanuais analisadas foram positivas em sua maioria, apresentaram menor variação da vegetação verde, nesse caso, representada pelas áreas com vegetação florestal e unidades de conservação na bacia. A resposta da correlação entre os índices de vegetação e a precipitação foi positiva e significativa, no entanto,

algumas áreas da bacia apresentaram valores baixos, evidenciando a influência de outros fatores climáticos nas mudanças de comportamento da dinâmica da vegetação no período analisado. Tendências estatisticamente significativas, segundo o teste de significância de Mann-Kendall, são mais evidenciadas na série temporal do NDVI, ocupando 50,59% da extensão dos pixels, em relação ao EVI representados por 48,71% dos pixels. As tendências significativas compreendem principalmente as áreas de vegetações e remanescentes florestais presentes na área de estudo e as não significativas representam as áreas com agropecuária, pastagem e agricultura. Esses resultados permitem a compreensão do processo de degradação ambiental da bacia hidrográfica do rio Doce, além de apresentarem contribuições nos trabalhos que envolvam o planejamento ambiental na bacia.

Palavras-chave: Sensores orbitais. Perfil temporal. Índices de vegetação. Clima.

FORMIGONI, Mileide de Holanda, Universidade Federal do Espírito Santo, Federal University of Espírito Santo, march, 2018. **Temporal analysis of vegetation associated with the estimation of rainfall by remote sensing in the hydrographic basin of the river Doce**. Advisor: Alexandre Cândido Xavier. Coadvisor: Alexandre Rosa dos Santos.

GENERAL ABSTRACT

Remote sensing stands out as one of the most modern methods for monitoring terrestrial ecosystems, covering large areas with high temporal resolution. The search for knowledge of the temporal dynamics of vegetation reveals patterns, processes and mechanisms used to obtain strategies for the protection and conservation of forest resources, which are increasingly directly or indirectly hampered by anthropic alterations, leading to the need to infer about the reality which involves the connections between the environmental, economic and social spheres. The collection of information related to climatic variables in the context of vegetation, especially precipitation, is fundamental for many applications. The use of data from orbital sensors to analyze the correlation between vegetation indices and rainfall contributes to the progress of research involving vegetation response in large areas. The objective of this research was to analyze the interannual and seasonal trends of vegetation behavior involving the set of constant observations of the vegetation indices Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), product MOD13Q1 and rainfall using data from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite, product 3B43-V7 in the hydrographic basin of the river Doce, from January 2001 to December 2016. Analysis of the interannual trends of the series EVI and NDVI were performed using the temporal profiles and the linear trend, linear correlation and Monotonic trend methodologies of Mann-Kendall. Seasonal trends were analyzed using correlation results between precipitation data and vegetation indices, using linear modeling techniques, statistically expressed. With the generation of temporal profiles of the vegetation indices, it was observed that the EVI showed a greater variation of values when compared to NDVI. The interannual trends analyzed were mostly positive, presenting lower green vegetation variation, in this case, represented by areas with forest vegetation and conservation units in the basin. The response of the correlation between vegetation indices and precipitation was positive and significant, however, some areas of the basin presented low values, evidencing the influence of other climatic factors on changes in vegetation dynamics behavior in the analyzed period. Statistically significant trends, according to the Mann-Kendall significance test, are more evidenced in the NDVI time series, occupying 50.59% of the pixel extension, compared to EVI represented by 48.71% of the pixels. Significant trends include mainly the areas of vegetation and forest remnants present in the study area and the non significant ones

represent areas with agriculture, pasture and agriculture. These results allow an understanding of the process of environmental degradation of the Doce river basin, in addition to presenting contributions in the works that involve environmental planning in the basin.

Keywords: Orbital sensors. Temporal profile. Vegetation indices. Climate.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	16
2 OBJETIVO GERAL	19
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 HIPÓTESES	20
4 REFERÊNCIAS	21
CAPÍTULO I – ESTIMATIVAS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL UTILIZANDO INSTRUMENTOS DO SENSORIAMENTO REMOTO	23
1 INTRODUÇÃO	27
1.1 PADRÃO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO.....	27
2 SENSOR MODIS E SUAS APLICAÇÕES	31
3 ESTIMATIVAS DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL POR SENSORIAMENTO REMOTO	33
3.1 SATÉLITE TRMM.....	34
4 CORRELAÇÃO DOS DADOS TRMM E MODIS	38
4.1 SÉRIES TEMPORAIS.....	39
4.1.1 Modelo de tendência linear.....	40
4.1.2 Modelo de Mann-Kendall.....	41
5 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE	42
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
7 REFERÊNCIAS	47
CAPÍTULO II – ANÁLISE TEMPORAL DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DO SENSOR MODIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE	57
1 INTRODUÇÃO	59
2 MATERIAL E MÉTODOS	61
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	61
2.2 BASE DE DADOS.....	64
2.3 TENDÊNCIAS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	69
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	71

3.1 PERFIS TEMPORAIS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	71
3.2 TENDÊNCIAS INTERANUAIS.....	75
4 CONCLUSÕES.....	80
5 REFERÊNCIAS.....	81
CAPÍTULO III – CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E PRECIPITAÇÃO PLUVIAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE.....	84
1 INTRODUÇÃO.....	86
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	88
2.1 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	88
2.1.1 Imagens MODIS	88
2.1.2 Imagens TRMM.....	90
2.2 CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E PRECIPITAÇÃO PLUVIAL	93
2.2.1 Modelagem Linear.....	94
2.2.2 Análise de Tendência Sazonal.....	95
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	97
3.1 PERFIS TEMPORAIS.....	97
3.1.1 Índices de vegetação.....	97
3.1.2 Precipitação pluvial.....	98
3.2 CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E PRECIPITAÇÃO PLUVIAL.....	100
3.3 TENDÊNCIA SAZONAL.....	108
4 CONCLUSÕES.....	111
5 REFERÊNCIAS.....	112
Anexo A – Classes de Cobertura e Uso da Terra.....	116

1 INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, existe um constante aprimoramento dos instrumentos de aquisição e processamento de dados espaciais, associados à necessidade de utilização de novas tecnologias que objetivam a representação e a quantificação das áreas da superfície terrestre para auxiliar nos diagnósticos finais, principalmente aqueles relacionados ao meio ambiente. Os dados de sensoriamento remoto obtidos por satélites fornecem informações detalhadas sobre as propriedades da superfície terrestre, permitindo, portanto, aperfeiçoar a adquirir informações sobre os alvos a partir de diversos projetos desenvolvidos para essa função.

Dados de sensoriamento remoto têm sido utilizados em estudos temporais para análise das mudanças do Uso e Cobertura da Terra (UCT) (FOODY, 2010; GÓMEZ et al., 2011). Nessas aplicações, o principal interesse é caracterizar diferentes ambientes biológicos e compreender as mudanças ocorridas na paisagem ao longo do tempo (FENSHOLT et al., 2009; COUTO JUNIOR et al., 2011; KUPLICH et al., 2013).

Os processos de mudanças relacionadas ao UCT vêm sendo discutidos há algumas décadas, sobretudo no que se refere à produção de alimentos. Os sistemas terrestres respondem às alterações antrópicas, causando mudanças em seus ciclos que, conseqüentemente, afetam as atividades humanas (LIANA e SHIMABUKURO, 2007).

Por outro lado, a produção vegetal brasileira tem relevantes contribuições a dar ao desenvolvimento econômico e social. Em escala global, o gerenciamento e a avaliação do setor da produção vegetal tem se tornado cada vez mais sofisticado, necessitando de informações continuamente atualizadas, de maneira a se obter levantamentos confiáveis sobre o desempenho desses processos (GUSSO et al., 2012).

Apesar da aparente semelhança no que diz respeito ao plano básico de todos os vegetais, o desenvolvimento de cada espécie passa por uma série de processos a partir da integração com fatores bióticos e abióticos. Esses fatores diferem de acordo com suas exigências específicas, variando conforme a região geográfica e o clima em que a espécie está inserida, formando assim, diferentes tipos de vegetação. Da mesma forma, diferentes culturas têm seus próprios estágios fenológicos representativos durante sua fase de crescimento, que diferem consideravelmente de outros tipos de vegetação (PAN et al., 2012).

Diante disso, o monitoramento da vegetação utilizando dados de sensores é embasado na necessidade de análise dos recursos vegetais, contribuindo para o

acompanhamento temporal e obtenção de informações, como a distribuição dos tipos de vegetação, fenologia e mudanças do UCT.

Durante a última década, o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) tornou-se uma ferramenta chave para o monitoramento da vegetação devido à sua alta resolução temporal, alcance extenso e rápida disponibilidade de vários produtos (PAN et al., 2012). O MODIS é um dos cinco sensores a bordo dos satélites TERRA e AQUA do Sistema de Observação da Terra, denominado de EOS (*Earth Observing System*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Esse sensor trabalha com 36 bandas espectrais cobrindo desde a região do visível até o infravermelho termal, resultando em imagens com resolução espacial de 250, 500 e 1.000 m para diferentes bandas. Cada cena desse sensor cobre uma faixa de 2.330 km de largura (SOUSA JR. e LACRUZ, 2006).

O conhecimento da realidade relacionada às atividades com diferentes configurações nas paisagens em áreas com potencial para recuperação ambiental torna-se relevante pelo fato de envolver as conexões entre as esferas de cunho ambiental, econômico e social. Couto Jr et al. (2011), caracterizaram as formações savânicas, formações florestais e áreas de cerrado convertidas pela ação antrópica, utilizando séries temporais de índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) do sensor MODIS, e observaram grande eficiência na diferenciação dos tipos de vegetação.

Kuplich et al. (2013), identificaram a dinâmica fenológica das principais tipologias vegetais do Rio Grande do Sul, para o período de 2000 a 2010, utilizando dados de EVI e concluíram que as séries temporais de índices de vegetação podem ser utilizadas para caracterizar a dinâmica fenológica de tipologias vegetais. Os autores identificaram a necessidade de estudos adicionais para quantificar a relação existente entre os índices de vegetação e as variáveis meteorológicas durante o período citado.

Muitos trabalhos vêm associando dados multitemporais da vegetação às variáveis ambientais, apresentando resultados consideráveis, em especial relacionados a índices de precipitação (ZHANG et al., 2005; ADAMI et al., 2008; DU et al., 2013; YADUVANSHI et al., 2015).

A precipitação pluvial é considerada a variável mais importante em todos os processos hidrológicos e possui característica de grande aleatoriedade espacial e temporal, não permitindo uma previsão com grande antecedência. É amplamente reconhecida por muitos pesquisadores como a variável climatológica mais relevante na região tropical,

sendo fundamental para o planejamento das atividades humanas e do desenvolvimento local (AMANAJAS e BRAGA, 2012). Porém existe grande dificuldade no que diz respeito à mensuração ideal, dado a sua alta variabilidade espaço-temporal, especialmente sobre as regiões tropicais, onde essa variável é um indicador da qualidade de vida, além de ser parâmetro fundamental na análise do ambiente, dos recursos hídricos e das atividades socioeconômicas.

O levantamento de informações sobre dados de precipitação pluvial é fundamental para inúmeras aplicações críticas, considerando que a demanda por estimativas de precipitação ininterruptas e precisas está aumentando cada vez mais. Esses conjuntos de dados são usados em diferentes áreas, com benefícios significativos, incluindo os estudos de mudanças globais ou de investigação do ecossistema (HÜTTICH et al., 2009; SMITH et al., 2014).

Existem diversas metodologias no âmbito do sensoriamento remoto, em diferentes bandas do espectro eletromagnético, com objetivo de obter estimativas de precipitação com maior detalhamento e acurácia em diferentes resoluções espaciais e temporais, como: NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*); GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*); Meteosat e; TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*).

O satélite TRMM é uma parceria entre a NASA e a JAXA (*Japanese Aerospace Exploration Agency*), cujo objetivo principal é o monitoramento e o estudo da precipitação pluvial nos trópicos. Os dados gerados pelo satélite permitem verificar como os índices de precipitação influenciam no clima global (KUMMEROW et al., 2000).

Collischonn et al. (2007) avaliaram as estimativas de precipitação do satélite TRMM sobre a bacia do Alto Paraguai, verificando ser possível reproduzir com bastante fidelidade o regime de precipitação da bacia. Quirino et al. (2015), analisaram a correlação entre os dados de precipitação obtidos na estação evaporimétrica da Universidade Federal de Goiás, em Goiânia, com os dados de satélite TRMM. Os resultados indicaram uma interdependência, expressando que os dados das amostras analisadas são compatíveis, o que torna os dados de satélite TRMM uma alternativa confiável às informações de precipitação com qualidade espacial e temporal.

O presente estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), que possui grande importância para o desenvolvimento das diversas atividades econômicas nos estados de Minas Gerais (MG) e Espírito Santo (ES), havendo destaque para lavouras tradicionais e silvicultura; produção e exportação do café; produção de frutas; fábrica de

polpas; e pecuária. Todas essas atividades necessitam do monitoramento de fatores abióticos, como por exemplo a precipitação, para obter bons resultados na produção (SOUZA et al., 2010). O cenário atual de desenvolvimento socioeconômico na área de estudo permite-nos visualizar a necessidade de compreender quais os níveis de alterações antrópicas e consequente qual é a velocidade dos processos de mudanças do UCT na BHRD.

O desenvolvimento e os resultados deste trabalho foram organizados em três capítulos subsequentes. O capítulo I apresenta uma revisão de literatura sobre o sensor MODIS e o satélite TRMM, para as análises dos índices de vegetação e da precipitação pluvial, respectivamente; o capítulo II apresenta uma análise das tendências de comportamento temporal dos índices de vegetação EVI e NDVI na BHRD para o período de 2001 a 2016; e o capítulo III mostra os resultados da análise temporal da vegetação utilizando dados de EVI e NDVI correlacionados à estimativa de precipitação pelo produto 3B43-V7 do TRMM na área de abrangência da BHRD.

2 OBJETIVO GERAL

Analisar as tendências do comportamento da vegetação, utilizando índices de vegetação do sensor MODIS, produto MOD13Q1 e da precipitação pluvial utilizando dados oriundos do satélite TRMM, produto 3B43-V7 na BHRD, no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2016.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- 1) Analisar as tendências de comportamento da vegetação utilizando dados de EVI e NDVI do sensor MODIS durante o período de 2001 a 2016, para a compreensão do processo de degradação ambiental na BHRD;
- 2) Correlacionar os índices de vegetação EVI e NDVI com a variabilidade mensal dos dados de precipitação pluvial obtidos por meio do satélite TRMM;
- 3) Analisar as tendências de comportamento das diferentes fisionomias vegetais existentes na BHRD durante o período de 2001 a 2016, utilizando resultados da correlação entre índices de vegetação e precipitação pluvial.

3 HIPÓTESES

- 1) A BHRD vem sofrendo muitas alterações antrópicas em decorrência do seu grande desenvolvimento econômico.
- 2) O processo de mudanças do UCT na BHRD gera consequências graves, levando a ocorrências de supressão da vegetação do bioma mata atlântica nas unidades de conservação.

4 REFERÊNCIAS

ADAMI, M.; FREITAS, R. M. de; PANDOVANI, C. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; MOREIRA, M. A. Estudo da dinâmica espaço-temporal do bioma Pantanal por meio de imagens MODIS. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.43, n.10, p.1371-1378, 2008.

AMANAJAS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 27, n.4, p. 423-434, 2012.

COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai Superior. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 59, n.1, p. 93-99, 2007.

COUTO JUNIOR, A. F.; CARVALHO JUNIOR, O. A. de; MARTINS, E. de S.; SANTANA, O. A.; SOUZA, V. V. de; ENCINAS, J. I. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.3, Edição Especial, p.699-705, 2011.

DU, L.; TIAN, Q.; YU, T.; MENG, Q.; JANCOSO, T.; UDVARDY, P.; HUANG, Y. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 245-253, 2013.

FENSHOLT R.; RASMUSSEN, K., NIELSEN, T. T.; MBOW, C. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 9, p. 1886–1898. 2009.

FOODY, G. M. Assessing the accuracy of land cover change with imperfect ground reference data. **Remote Sensing of Environment**, v.114, p.2271-2285, 2010.

GÓMEZ, C.; WHITE, J. C.; WULDER, M. A. Characterizing the state and processes of change in a dynamic forest environment using hierarchical spatio-temporal segmentation. **Remote Sensing of Environment**, v.115, p.1665-1679, 2011.

GUSSO, A., FORMAGGIO, A. R., RIZZI, R., ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Method for soybean area estimation based on multi-temporal MODIS/EVI images. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 3, 425-435, 2012.

HÜTTICH, C.; GESSNER, U.; HEROLD, M.; STROHBACH, B. J.; SCHMIDT, M. K.; DECH, S. On the Suitability of MODIS Time Series Metrics to Map Vegetation Types in Dry Savanna Ecosystems: A Case Study in the Kalahari of NE Namibia. **Remote Sensing**, v. 1, n. 4, p. 620-643, 2009.

KUMMEROW, C. W. S., OLSON, G., L. A simplified scheme for obtaining precipitation and vertical hydrometeor profiles from passive microwave sensors. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, p. 1213-1232, 2000.

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.17, n.10, p.1116–1123, 2013.

LIANA, A. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Monitoramento da cobertura terrestre: fenologia e alterações antrópicas. In: Rudorff, B. F. T.; Shimabukur, Y. E.; Ceballos, J. C. (ed.) **O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Silva Vieira, Cap. 14, p.185-205, 2007.

PAN, Y.; LI, L.; ZHANG, J.; LIANG, S.; ZHU, X.; SULLA-MENACHE, D. Winter wheat area estimation from MODIS-EVI time series data using the Crop Proportion Phenology Index. **Remote Sensing of Environment**, v. 119, p. 232-242, 2012.

QUIRINO, D. T.; CASAROLI, D.; PEREIRA, R. M.; OLIVEIRA, R. A.; ALMEIDA, R. T.. Avaliação das estimativas de precipitação do satélite TRMM (algoritmo 3B42 Versão 7 e Real Time) utilizadas no balanço hídrico climatológico no Estado de Goiás. **Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, p. 5094 – 5101, 25 a 29 de Abr. de 2015.

SMITH, A. M. S.; KOLDEN, C. A.; TINKHAM, W. T.; TALHELM, A. F.; MARSHALL, J. D.; HUDAK, A. T.; BOSCHETTI, L.; FALKOWSKI, M. J.; GREENBERG, J. A.; ANDERSON, J. W.; KLISKEY, A.; ALESSA, L.; KEEFE, R. F.; GOSZ, J. R. Remote sensing the vulnerability of vegetation in natural terrestrial ecosystems. **Remote sensing of environment**. v. 154, p. 322-337, 2014.

SOUSA JUNIOR, M. A.; PARDI LACRUZ, M. S. Monitoramento de desastres naturais utilizando imagens MODIS - estudo de caso: Pantanal. In: I Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2006, Campo Grande. **Anais... Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**. Campinas; São José dos Campos: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 739- 748, 2006.

SOUZA, P. I.; CARVALHO, A.; KOTZIAN, H. B.; MARCIEL JUNIOR. **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce**: Relatório final. Consórcio Ecoplan - LUME, v. 1, 2010.

YADUVANSHI, A.; SRIVASTAVA, P. K.; PANDEY, A. C. Integrating TRMM and MODIS satellite with socio-economic vulnerability for monitoring drought risk over a tropical region of India. **Physics and Chemistry of the Earth**, Parts A/B/C, v. 83-84, p. 14-27, 2015.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; LIU, Z. Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. **Journal of geophysical research**, v. 110, 14 p., 2005. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JD005263/epdf>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2018.

CAPÍTULO I: ESTIMATIVAS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL UTILIZANDO INSTRUMENTOS DO SENSORIAMENTO REMOTO

FORMIGONI, Mileide de Holanda, Universidade Federal do Espírito Santo, março de 2018. **Estimativas dos índices de vegetação e da precipitação pluvial utilizando instrumentos do sensoriamento remoto.** Orientador: Alexandre Cândido Xavier. Coorientador: Alexandre Rosa dos Santos.

RESUMO

O sensoriamento remoto destaca-se como um dos métodos mais modernos para monitorar os ecossistemas terrestres, assim como para determinar o estado da vegetação, excluindo a necessidade de utilização de métodos onerosos e demorados, abrangendo áreas extensas e com alta resolução temporal. O presente estudo objetivou contextualizar a contribuição do sensoriamento remoto utilizando dados da correlação de sensores orbitais, para análises relacionadas ao comportamento temporal da vegetação. Os resultados deste capítulo foram obtidos por meio de uma revisão descritiva da literatura, embasado na busca bibliográfica em periódicos científicos nacionais e internacionais. As técnicas de sensoriamento remoto utilizadas para o monitoramento da vegetação ocorrem por meio dos índices de vegetação, que são formas de processamento digital de imagens para esse fim. O índice de vegetação NDVI tem o objetivo de eliminar diferenças sazonais do ângulo de elevação solar e minimizar os efeitos de atenuação atmosférica observados para dados multitemporais. Porém, com o aprimoramento do sensoriamento remoto, um novo índice, EVI, foi proposto para aperfeiçoar o sinal da vegetação verde minimizando os efeitos do solo e da atmosfera, que tem se mostrado mais sensível às alterações na biomassa vegetal, sobretudo em regiões com áreas de florestas, que apresentam vegetação com maior quantidade de biomassa verde. O produto MOD13Q1, do MODIS, é considerado consistente para análises temporais das condições da vegetação, devido à sua resolução temporal, podendo ser utilizado para monitorar a atividade fotossintética da vegetação e interpretações da fenologia. Nesse caso, EVI e NDVI se complementam fornecendo informações consistentes sobre a detecção de mudanças vegetais e parâmetros biofísicos do dossel. A precipitação pluvial é amplamente reconhecida como a variável climatológica mais importante na região tropical. O satélite TRMM possibilita monitorar a precipitação em regiões onde os dados convencionais são escassos. Trabalhos têm demonstrado que a utilização de técnicas agrupadas por meio da integração de dados de diferentes sensores orbitais é válida tanto para estimativas de produção vegetal como para análises e soluções

de conflitos ambientais. As imagens fornecidas pelo sensor MODIS permitem um acompanhamento dos ciclos vegetativos e do desenvolvimento das demais formações vegetais. As imagens dos produtos do satélite TRMM representam uma boa alternativa aos dados de campo para a estimativa de precipitação pluvial fornecida, favorecendo bons resultados da correlação entre dados do sensor MODIS e dados do satélite TRMM. O registro de imagens por sensores orbitais cobrindo grandes áreas da superfície terrestre permite a construção e a análise de séries temporais de dados de vegetação de diferentes fisionomias, auxiliando no estudo da dinâmica da vegetação e de seus ecossistemas.

Palavras-chave: Satélites orbitais. Séries temporais. EVI. NDVI.

FORMIGONI, Mileide de Holanda, Federal University of Espirito Santo, december, 2017. **Estimates of vegetation rates and pluvial precipitation through remote sensing instruments.** Advisor: Alexandre Cândido Xavier. Coadvisor: Alexandre Rosa dos Santos.

ABSTRACT

Remote sensing stands out as one of the most modern methods to monitor terrestrial ecosystems, as well as to determine the state of vegetation, excluding the need to use costly and time-consuming methods, covering large areas with high temporal resolution. The present study aimed to contextualize the contribution of remote sensing using correlation data of orbital sensors for analyzes related to temporal behavior of vegetation. The results of this chapter were obtained through a descriptive review of the literature, based on the bibliographic search in national and international scientific journals. The remote sensing techniques used to monitor vegetation occur through vegetation indices, which are forms of digital image processing for this purpose. The NDVI vegetation index aims to eliminate seasonal differences in the solar elevation angle and to minimize observed atmospheric attenuation effects for multitemporal data. However, with the enhancement of remote sensing, a new index, EVI, was proposed to improve the green vegetation signal, minimizing the effects of soil and atmosphere, which has been more sensitive to changes in plant biomass, especially in regions with areas of forests, which present vegetation with greater amount of green biomass. The MOD13 product MOD13Q1 is considered to be consistent for temporal analysis of vegetation conditions, due to its temporal resolution, and can be used to monitor the photosynthetic activity of vegetation and phenology interpretations. In this case, EVI and NDVI complement each other by providing consistent information on the detection of plant changes and biophysical parameters of the canopy. Rainfall is widely recognized as the most important climatological variable in the tropical region. The TRMM satellite makes it possible to monitor precipitation in regions where conventional data is scarce. Studies have shown that the use of grouped techniques through the integration of data from different orbital sensors is valid for both estimates of plant production and for analyzes and solutions of environmental conflicts. The images provided by the MODIS sensor allow monitoring of vegetative cycles and the development of other plant formations. The images of the TRMM satellite products represent a good alternative to the field data for the estimation of rainfall provided favoring good results of the correlation between MODIS sensor data and TRMM satellite data. The recording of images by orbital sensors covering large areas of the earth surface allows the construction and analysis of time series of

vegetation data of different physiognomies, helping to study the dynamics of vegetation and its ecosystems.

Keywords: Orbital satellites. Time series. EVI. NDVI.

1 INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto pode ser definido como o conjunto de dados que objetiva investigar o ambiente terrestre utilizando informações do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra, em suas diversas manifestações (NOVO, 1989). Jensen (2009) afirma que o sensoriamento remoto é uma ciência que possibilita a aquisição de informações da superfície terrestre sem a necessidade de contato físico com os objetos e materiais que a compõe, propiciando o monitoramento, a medição e a análise de importantes características biofísicas e atividades humanas na terra. Associada ao uso de ferramentas de processamento digital de imagens e sistemas de informações geográficas, essa ciência permite, por exemplo, que seja estudada a relação entre a precipitação pluvial e a presença de vegetação em qualquer lugar da terra, desde que haja disponibilidade de imageamento multiespectral em bandas específicas para tal finalidade.

Nesse sentido, este capítulo objetiva realizar uma revisão bibliográfica para contextualizar a contribuição do sensoriamento remoto relacionada aos resultados da correlação de sensores orbitais, para análises sobre o comportamento temporal da vegetação.

Para alcançar o objetivo proposto, realizou-se uma revisão bibliográfica capaz de reunir os elementos pertinentes ao conteúdo de interesse. Todas as informações apresentadas foram resultado de uma busca criteriosa em livros, periódicos nacionais e internacionais indexados em base de dados no portal de periódicos CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) a partir do Google acadêmicos, SCIELO (*Scientific Electronic Library Online*) e revistas científicas.

1.1 PADRÃO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO

As informações das imagens de satélites são obtidas por meio do comportamento espectral dos alvos imageados. A utilização de dados espectrais, na estimativa de parâmetros estruturais da vegetação, constitui-se em um dos mais importantes potenciais do sensoriamento remoto dos ecossistemas naturais (ACCIOLY et al., 2011).

De acordo com Moreira (2000), ao incidir sobre um alvo, a radiação proveniente do Sol interage com o seu material podendo responder de três formas: reflexão, transmissão e absorção. Os espectros de reflectância de maior interesse para estudos ambientais estão

compreendidos entre 0,4 e 2,6 μ m. Esse espectro pode ser subdividido em três regiões espectrais, sendo: região do visível (0,4 a 0,7 μ m), faixa espectral correspondente ao azul (0,45 μ m), ao verde (0,54 μ m) e ao vermelho (0,65 μ m), região do infravermelho próximo (0,7 a 1,3 μ m) e região do infravermelho médio (1,3 a 2,6 μ m) (MOREIRA, 2011).

A determinação do estado da vegetação local, utilizando medições eco fisiológicas, necessita de métodos onerosos obtendo resultados demorados quando submetidos a grandes áreas e longos períodos de tempo, restringindo seu manuseio para modelagem do ambiente (MASELLI, 2004).

O padrão espectral da vegetação é considerado único e dinâmico quando comparado aos demais alvos naturais, pois apresenta tanto o seu padrão de resposta espectral quanto a característica temporal desses alvos, associada à fenologia das culturas ao longo do seu ciclo (Figura 1.1). Assim, o sensoriamento remoto permite a análise da vegetação em diferentes escalas temporais e espaciais devido à natureza contínua das informações espectrais no tempo, desenvolvendo estudos sobre o comportamento sazonal e mudanças da composição biofísica e bioquímica de dosséis (STONE et al., 1994; MORA e IVERSON, 1997; JIN e SADER, 2005).

Os principais elementos que influenciam a quantidade de energia eletromagnética refletida pelas folhas são os pigmentos, a quantidade de água e a estrutura celular (MOREIRA, 2007). A Figura 1.1 apresenta as diferenças de reflectância no comportamento de alvos distintos, especialmente quando se compara a vegetação verde com os demais alvos.

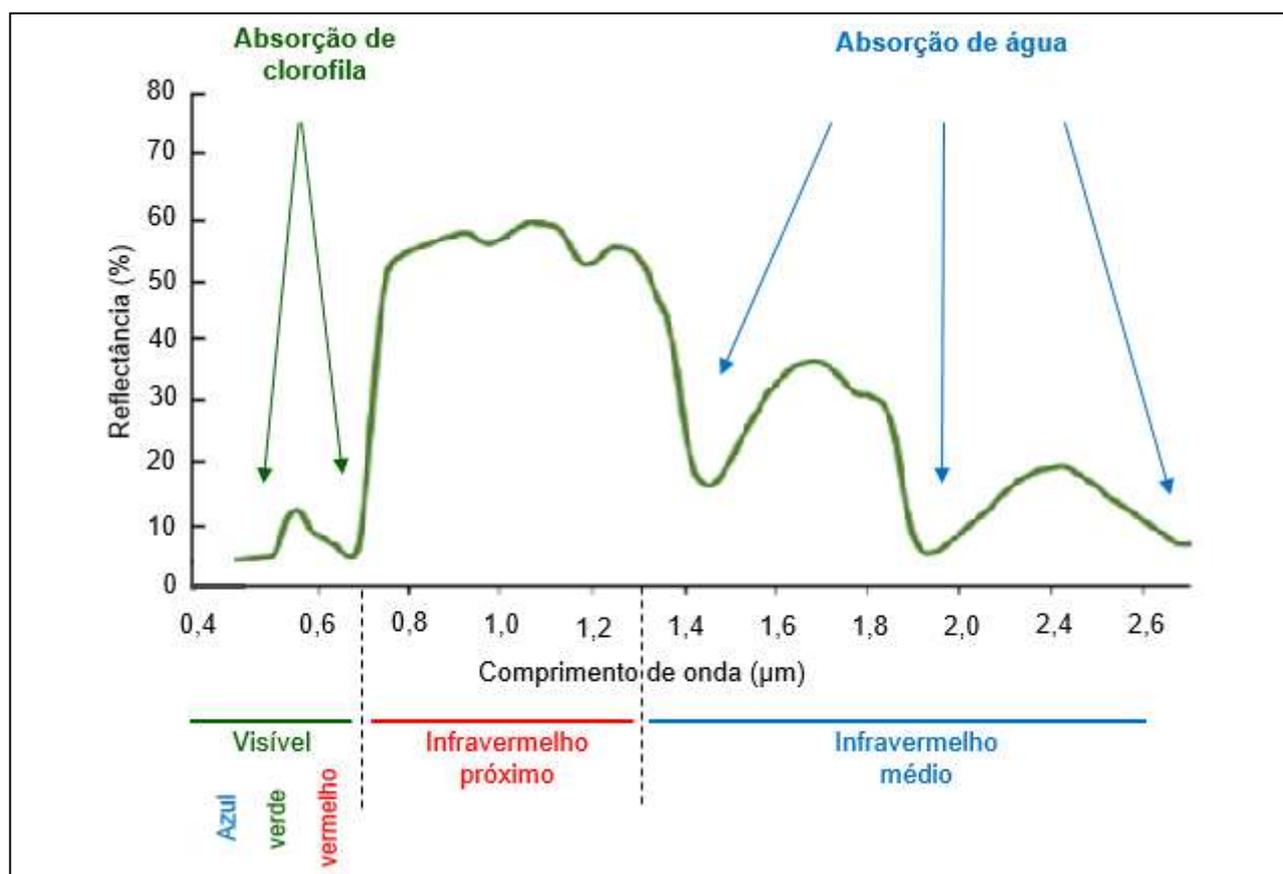


Figura 1.1 – Comportamento espectral de uma folha verde saudável.
Fonte: Adaptada de SWAIN e DAVIS (1978).

Na faixa espectral compreendida entre 0,7 a 1,3 µm (infravermelho próximo), os valores de reflectância atingem o máximo para a vegetação verde. Nessa região, o comportamento da radiação eletromagnética relacionado à reflectância, transmitância e absorvância é caracterizado pelas propriedades ópticas da folha e é dependente das estruturas celulares internas, em que a absorção é muito baixa e a reflectância elevada (MOREIRA, 2011).

O monitoramento da vegetação utilizando técnicas de sensoriamento remoto é realizado através dos Índices de Vegetação (IVs), que são formas de processamento digital de imagens utilizadas para análise e monitoramento da cobertura vegetal. Sobre IVs, Jensen (2009) afirma que são medidas radiométricas micro-ondas, as quais indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo índice de área foliar, porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde, e radiação fotossintética ativa absorvida.

De modo geral, os IVs são usados para indicar a presença e o estado da vegetação, uma vez que a produção primária de uma comunidade vegetal mostra estreita relação com

a energia solar (BARET e GUYOT, 1991; PONZONI, 2001). Os índices trabalham com a reflectância dos alvos terrestres, isto é, com a relação entre energia refletida pelo alvo terrestre e a energia incidente, inferindo assim sobre a quantidade de energia absorvida pelo alvo.

O índice de vegetação denominado NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foi proposto por Rouse et al. (1974) (equação 1), com o objetivo de eliminar diferenças sazonais do ângulo de elevação solar e minimizar os efeitos de atenuação atmosférica observados para dados multitemporais. Os valores obtidos com o NDVI são contidos em uma mesma escala entre -1 e 1.

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VER}}{\rho_{IVP} + \rho_{VER}} \quad (1)$$

em que, ρ_{IVP} representa a reflectância na região do infravermelho próximo e ρ_{VER} representa a reflectância na região do vermelho.

Uma característica atribuída ao NDVI é a rápida saturação, o que o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal a partir de determinado estágio de desenvolvimento (MOREIRA, 2011).

Alguns estudos tem utilizado o NDVI com o objetivo de avaliar variáveis biofísicas (CUNHA et al., 2012; BEZERRA et al., 2014), análises dos níveis de degradação em fragmentos de áreas florestadas (AGAREZ et al., 2001; AZEREDO et al., 2016), e análise espaço-temporal no desenvolvimento de culturas agrícolas (LUCAS e SCHULER, 2007; FUNK e BUDDE, 2009; VICENTE et al., 2012).

Com o aprimoramento do sensoriamento remoto, surgiu um novo índice de vegetação, o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), proposto por Huete, et al. (1997), para aperfeiçoar o sinal da vegetação verde, minimizando os efeitos do solo e da atmosfera e é calculado pela equação 2:

$$EVI = G \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VER}}{\rho_{IVP} + (C_1 * \rho_{VER} - C_2 * \rho_{AZL}) + L} \quad (2)$$

em que, G é o fator de ganho (2,5); ρ_{IVP} representa a reflectância no infravermelho próximo; ρ_{VER} é a reflectância no vermelho; ρ_{AZL} é a reflectância no azul; C_1 (6) é o coeficiente de

correção dos efeitos atmosféricos para o vermelho; $C_2(7,5)$ é o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o azul; e $L(1)$ é o fator de correção para a interferência do solo.

O EVI tem se mostrado mais sensível às alterações na biomassa vegetal, sobretudo em regiões de maior densidade de vegetação, como áreas de florestas (GOLTZ et al., 2007; MORAES et al., 2009), assim como para o monitoramento agrícola, sendo menos suscetível à rápida saturação (GOLTZ, et al., 2007; JOHANN, et al., 2012).

2 SENSOR MODIS E SUAS APLICAÇÕES

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um dos principais sensores a bordo do satélite Terra, projeto “*Earth Observing System*” (EOS), lançado em dezembro de 1999, e do satélite Aqua, lançado em 2002. O EOS faz parte de um programa de longo prazo da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), formado por diversos países que constituem uma série de plataformas para o monitoramento terrestre em várias áreas de conhecimento, em diferentes escalas, visando investigações e análises da terra, dos oceanos e da atmosfera por meio da interação de seus objetos com instrumentos dos sensores (NASA, 2016).

De acordo com as características apresentadas pela NASA, o sensor MODIS possui uma faixa de visualização de 2.330 km de largura, imageando a superfície terrestre em sua totalidade a cada um ou dois dias, de acordo com a posição geográfica, permitindo a geração de imagens livres de cobertura de nuvens, por meio da composição de várias imagens obtidas no período de 16 dias. Está localizado a uma altitude de 705 km, com uma resolução radiométrica de 12 bits. Possui 36 bandas, localizadas em função dos comprimentos de onda específicos e adquire dados em três resoluções espaciais diferentes, sendo: 250 m, nas bandas 1 e 2; 500 m, nas bandas 3 a 7 e, 1.000 m, nas bandas de 8 a 36 (NASA, 2016).

Os dados do sensor MODIS são disponibilizados por meio de 44 produtos gerados a partir da combinação entre as bandas, destinados a diversos estudos e em diferentes níveis de processamento. Os produtos gerados são direcionados para a quantificação e a detecção de mudanças da cobertura da terra, assim como para os processos naturais e antrópicos (JUSTICE et al., 2002). A Tabela 1.1 apresenta os produtos voltados para os estudos da superfície terrestre.

Tabela 1.1 – Produtos do sensor MODIS voltados para estudos da superfície terrestre.

PRODUTOS RELACIONADOS AO BALANÇO ENERGÉTICO	
Nomenclatura	Aplicação
MOD 09	Reflectância de superfície.
MOD 11	Temperatura da superfície da terra e emissividade
MOD 43	Albedo.
MOD 10, MOD 29	Cobertura de neve e extensão de gelo na superfície do mar.
PRODUTOS RELACIONADOS À VEGETAÇÃO	
Nomenclatura	Aplicação
MOD 13	Índices de vegetação (NDVI e EVI).
MOD 15	Índice de área foliar e radiação fotossinteticamente ativa.
MOD 17	Fotossíntese líquida e produtividade primária.
PRODUTOS VOLTADOS À COBERTURA TERRESTRE	
Nomenclatura	Aplicação
MOD 12	Cobertura da terra e mudança na cobertura da terra.
MOD 14	Anomalias termais, fogo e queima de biomassa.
MOD 44	Conversão da cobertura vegetal.

Fonte: Adaptada de JUSTICE et al. (2002).

O produto específico MOD13Q1 indica que os produtos possuem resolução espacial de 250 m, uma vez que o “Q” refere-se a “quarter km”, ou seja, quarta parte do quilômetro, portanto, é considerado um produto de alta resolução espacial (NASA, 2016).

Esse produto apresenta-se consistente para análises temporais das condições da vegetação, devido a sua resolução temporal, podendo ser utilizado para monitorar a atividade fotossintética da vegetação e interpretações da fenologia (ANDERSON, 2005). Os dois IVs do produto MOD13 se complementam em estudos da vegetação e fornecem informações consistentes sobre a detecção de mudanças vegetais e parâmetros biofísicos do dossel.

Pelo fato de refletirem o estado da vegetação, o EVI e o NDVI, obtidos por esse produto, podem ser utilizados para estudos que caracterizam a dinâmica da vegetação, auxiliando na identificação e classificação de coberturas vegetais (ANDERSON et al., 2005; MARTINUZZI et al., 2008), na detecção de mudanças da cobertura vegetal (CARVALHO JUNIOR et al., 2009), no mapeamento e estudo da expansão de áreas agrícolas (LUNETTA

et al., 2010; VICTORIA et al., 2012) e no mapeamento de áreas suscetíveis a alagamentos (SHIMABUKURO e FORMAGGIO, 2007).

O NDVI é utilizado para a identificação e o monitoramento de regiões afetadas pela seca tanto em escala regional, nacional ou global com resultados satisfatórios, sendo, muito utilizado para identificar e quantificar os efeitos desse fenômeno (SOUSA JÚNIOR, 2010). Rosembach et al. (2010) observaram a variação sazonal dos diferentes tipos de coberturas vegetais presentes na região Sul do Brasil, assim como anomalias na resposta da vegetação, a partir de imagens NDVI do produto MOD13 no período de 2000 e 2006.

Os índices espectrais de vegetação têm demonstrado grande potencial no monitoramento do ciclo de produção de alimentos (KOGAN et al., 2003). Esses dados têm sido especialmente utilizados para compor estudos de séries históricas (KARNIELI et al., 2010).

3 ESTIMATIVAS DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL POR SENSORIAMENTO REMOTO

A precipitação pluvial é amplamente reconhecida por muitos pesquisadores como a variável climatológica mais importante na região tropical. Por sua tamanha importância, diversos estudos foram desenvolvidos para a sua caracterização (LYRA et al., 2006; ANDRÉ et al., 2008; DEREZYNSKI et al., 2009; REBOITA et al., 2010; WANDERLEY et al., 2013), na busca do entendimento dos seus impactos e da sua evolução temporal, sua intensidade, assim como análise de tendências e a sua frequência em determinada área de estudo.

A estimativa dos índices de precipitação pluvial pode ser obtida tanto por meio de medidas diretas, utilizando pluviômetros e pluviógrafos, quanto de medidas indiretas, utilizando dados de sensores remotos meteorológicos e de observação da terra. Ambas as formas de estimar a precipitação apresentam vantagens e desvantagens, de acordo com a atividade que será realizada.

Kummerow et al. (2000) observam que a precipitação é um dos parâmetros atmosféricos mais difíceis de mensurar devido a sua alta variabilidade no espaço e no tempo. Dessa forma, as estimativas dessa variável através de sensores orbitais cobrem amplas áreas e longos períodos de tempo, tornando-se eficazes se comparadas às estimativas obtidas em pequenas áreas por meio dos pluviômetros.

O levantamento de dados e avaliações referentes à área de hidrologia ocorrem, usualmente, no âmbito de bacias hidrográficas, apresentando-se na maioria das vezes

como áreas de grandes extensões territoriais, no entanto, a principal barreira encontrada é de como extrapolar e/ou interpolar, satisfatoriamente, a precipitação a partir dos dados pontuais dos pluviômetros, gerando informações consideradas restritas, refletindo a precipitação ocorrida em um dado ponto que a partir daí é estendida para toda a bacia. Para se ter um monitoramento detalhado sobre uma bacia, é necessária a existência de uma densa rede de instrumentos, que esbarra em problemas técnicos e de investimentos (NOBREGA et al. 2008).

As imagens de satélites orbitais meteorológicos são ferramentas úteis no monitoramento de variáveis climatológicas e na obtenção de informações para a realização de tarefas de proteção do ambiente natural, fornecendo estruturas básicas para a observação do meio, pois permitem obter dados não alcançados através da rede convencional de pluviometria. De acordo com Liu e Kogan (2002), sensores remotos proporcionam informações sistemáticas e de alta qualidade espacial e temporal sobre a superfície terrestre. Collischonn (2006) afirma que a utilização de sensores remotos na estimativa de precipitação mostra-se como uma alternativa para contrapor problemas relacionados à obtenção de dados escassos.

Collischonn et al. (2007), afirmam que uma vantagem adicional das estimativas de precipitação por satélite é o número insignificante de falhas nas séries temporais. Nesse caso, os autores ressaltam que as falhas ocorrem em grandes áreas simultaneamente, porém apenas por um ou dois intervalos de tempo, diferentemente das séries de pluviômetros, em que as falhas ocorrem às vezes por longos períodos. Massagli et al. (2011) afirmam que a utilização de dados de precipitação obtidos por satélites meteorológicos é uma alternativa em regiões com escassez de dados observacionais, que muitas vezes são de difícil acesso ou têm uma cobertura espacial inadequada.

A obtenção de informações com boa cobertura espacial e temporal faz do sensoriamento remoto uma alternativa viável e muito interessante para estimativas de precipitação, adequada à realidade de regiões extensas e de difícil acesso.

3.1 SATÉLITE TRMM

Existem diversas metodologias propostas para estimativa de previsão do tempo e do clima utilizando imagens de satélite, dentre os satélites meteorológicos de destaque estão os pertencentes à série GOES (*Geostationary Operational Environmental System*) (COLLISCHONN et al., 2007). No ano de 1997, a NASA e a *National Space Development*

Agency of Japan (JAXA) lançaram um satélite desenvolvido para monitorar a precipitação sobre os trópicos. Denominado de TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), o satélite possibilitou a oportunidade de monitorar a precipitação em regiões onde os dados convencionais são escassos (KUMMEROW et al., 2000).

A órbita do TRMM é oblíqua, geossíncrona, localizado a 403 km da superfície terrestre. O período de translação é bastante curto, sendo de 91 minutos, permitindo resoluções espacial e temporal comparativamente altas (COLLISCHONN et al., 2007).

O satélite TRMM possui cinco instrumentos a bordo, a saber: um imageador de micro-ondas, um radar de precipitação, um radiômetro no visível e no infravermelho, um sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens, e um sensor para imageamento de relâmpagos (TRMM, 2015) (Tabela 1.2).

Tabela 1.2 – Instrumentos do satélite TRMM.

INSTRUMENTOS	DENOMINAÇÃO	CARACTERÍSTICAS
Microwave Imager (TMI)	Imageador de micro-ondas	Principal sensor do satélite. Passivo, com função de prover informação quantitativa de precipitação. Mede a intensidade da radiação em cinco frequências, com resolução espacial de 45 km (10,7 GHz) e 5 km (19,4; 21,3; 37; 85,5 GHz). Quantifica o vapor de água, a água precipitável e a intensidade da precipitação na atmosfera.
Precipitation Radar (PR)	Radar de precipitação	Sensor ativo, desenvolvido para prover mapas de estrutura de tempestade em três dimensões, sobre o continente e o oceano. Define a profundidade da camada de precipitação e fornece informação sobre a precipitação que está realmente atingindo a superfície. O radar de varredura opera em 13,8 GHz, com resolução espacial de 4,3 km no nadir.
Visible and Infrared Scanner (VIRS)	Sensores no visível e infravermelho	Instrumento primário do satélite. Indicador indireto de precipitação. Sensores capturam a radiação advinda da terra em cinco regiões espectrais, do visível ao infravermelho próximo. Resolução espacial de 2,1 km no nadir. Utiliza dados de outras fontes de estimativas em conjunto.
Lightning Imaging Sensor (LIS)	Sensor para o imageamento de relâmpagos	Mede a incidência global, usando um sistema de sensoriamento remoto óptico. Opera em 0,777 μm com resolução espacial de 5 km no nadir.
Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES)	Sensor de energia radiante e de nuvens	Instrumento operou até março de 2000 e atuou no visível e infravermelho. Foi projetado, especialmente, para medir energia radiativa refletida e emitida pela superfície da terra e pela atmosfera.

Fonte: Adaptada de TRMM (2015).

O sensor de micro-ondas (TMI) é o principal instrumento do satélite TRMM, com função de medição da precipitação obtida a partir da Lei inversa de Planck, relativa à repartição de energia para a radiação do corpo negro (CARUSO e OGURI, 2005), e correlação com temperatura de topo de nuvem. As propriedades medidas pelos instrumentos TMI, PR e VIRS são, respectivamente, temperatura, potência e radiância (RAMAGE et al., 2003; COLLISCHONN, 2006).

Dados fornecidos pelo satélite TRMM têm sido amplamente utilizados para estudos relacionados à precipitação, sobretudo devido à sua boa cobertura horizontal, resolução espacial e frequência temporal. De acordo com Nicholson (2005), o projeto TRMM resultou em medidas consideravelmente mais confiáveis do que as estimativas feitas por outros instrumentos com a mesma função.

Vários trabalhos vêm aplicando dados do TRMM em diversas áreas como no monitoramento de seca (LI et al., 2013; LEIVAS, 2014) e produtividade (SILVA, 2011; MOTA, 2015; SANTOS, 2015). Esses estudos possibilitam aprimorar o planejamento e gerenciamento da produção, reduzindo os prejuízos.

Recentemente, Collischonn (2006) mostrou que a estimativa de precipitação obtida pelo satélite TRMM é bastante precisa quando comparada com os dados adquiridos pelos instrumentos em estações pluviométricas na bacia do alto São Francisco.

Barrera (2005) considera o satélite TRMM o mais bem equipado em termos de instrumentos para estimativas de precipitação, pois fornece dados mais precisos do que as técnicas de coleta dos demais satélites meteorológicos.

Para Nobrega et al. (2008) o satélite é hábil na análise da variabilidade sazonal de precipitação sobre a sub bacia da Amazônia ocidental, representando de forma satisfatória os períodos secos e chuvosos. Louzada et al. (2016), concluíram que o satélite TRMM demonstra bom desempenho para estimar índices de precipitação pluvial, podendo ser utilizado para caracterizar a precipitação média anual e totais anuais para a bacia hidrográfica do rio Doce.

Os produtos (Tabela 1.3), gerados a partir dos instrumentos do satélite TRMM (Tabela 1.2), conseguem melhorar a acurácia, a cobertura e a resolução das imagens, permitindo que os usuários obtenham produtos derivados de diferentes combinações (MELO et al., 2015).

Tabela 1.3 – Características dos produtos derivados do satélite TRMM.

DENOMINAÇÃO DO PRODUTO	CARACTERÍSTICAS
3B42	Produto de precipitação com resolução temporal de 3 horas e combinação de múltiplos sensores e de diferentes satélites. Combina a precipitação estimada pelo TMI corrigidas por meio de informações sobre a estrutura vertical das nuvens pelo PR.
3B42 derived	Produto com dados de precipitação diária acumulada 0 UTC a 24 UTC.
3B43	Produto de precipitação mensal com combinação de múltiplos sensores de satélite.
3B42 real time	Encontra-se em caráter experimental com combinação de múltiplos sensores sem correção de pluviômetros.
3B42 real time derived	Produto experimental de precipitação acumulada 0 UTC a 24 UTC.
3B40 real time	Produto experimental com base em micro-onda intermédia com resolução temporal de 3 horas.
3B41 real time	Produto experimental com base em infravermelho com resolução temporal de 3 horas.

Fonte: Adaptada de TRMM (2015).

Trabalhos que analisaram os produtos 3B42 e 3B43 na versão 6 (V6) e versão 7 (V7), e compararam a eficiência dos mesmos com dados de superfície, constataram a melhoria na estimativa da precipitação utilizando dados da V7 (XUE et al. 2013; CHEN et al., 2013; FLEMING e AWANGE, 2013).

O produto 3B43-V7 é o resultado de uma combinação bem-sucedida, a saber: a estimativa a cada três horas do algoritmo 3B42-V7 e a precipitação observada por pluviômetros do projeto *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) e *Climate Assessment and Monitoring System* (CAMS) em escala mensal (TRMM, 2015).

Apesar da eficiência da estimativa de precipitação apresentada pelos instrumentos do TRMM, considerando os instrumentos TMI e PR, o satélite também está sujeito a erros de instrumentação. Em estudo realizado na África, Adeyewa e Nakamura (2003) verificaram que a precipitação do algoritmo 3B43-V6 apresenta ciclo sazonal muito semelhante, porém com ligeira superestimativa da precipitação observada. Além disso, os autores verificaram que os produtos baseados exclusivamente no PR tendem a superestimar a precipitação

durante o ano todo, o que garante vantagens na confiança dos dados gerados pelo instrumento TMI.

4 CORRELAÇÃO DOS DADOS TRMM E MODIS

A disponibilidade das informações sobre a superfície terrestre oriundas dos satélites orbitais possibilita correlacionar dados dos índices de vegetação aos dados de precipitação pluvial mensal. Em regiões onde a precipitação é limitada ou com alta sazonalidade, os dados dos índices de vegetação mostram-se fortemente correlacionados com a quantidade de precipitação mensal (FULLER e PRINCE, 1996; SCHMIDT e KARNIELI, 2000), facilitando, portanto, a possibilidade de obter correlação positiva entre essas variáveis.

Estudos têm demonstrado que a utilização de técnicas agrupadas por meio da integração de dados de diferentes sensores orbitais é utilizada para diferentes fins, havendo destaque para estimativas de produção vegetal, monitoramento de estiagens prolongadas e análises e soluções de diferentes problemas ambientais. Zhang et al. (2005) analisaram a resposta da fenologia da vegetação correlacionada aos índices de precipitação em toda a África no período de 2000 a 2003, usando dados do índice de vegetação MODIS e dados do TRMM e concluíram que a ocorrência de chuvas cumulativas estimulam o desenvolvimento da vegetação verde em regiões áridas e semiáridas da África.

Gobo (2010) realizou o levantamento do acumulado de precipitação da região Sul do Brasil para posterior análise correlacionada com os dados de índice de vegetação do sensor MODIS, em que os resultados mostraram que a metodologia foi útil para o monitoramento das anomalias de precipitação e anomalias de IVs.

Arvor et al. (2009) analisaram a intensificação da agricultura no Mato Grosso utilizando dados TRMM e de séries temporais do sensor MODIS, nos períodos de 2000-2001 e 2006-2007, em que observaram a expansão de 70% da área cultivada nesses períodos, identificando também uma mudança radical de práticas culturais.

Leivas et al. (2014), avaliando o NDVI no monitoramento indicativo de estiagens nos períodos críticos da soja, em municípios da região Sul do Brasil, obtiveram resultados que comprovam o potencial desses índices, para o setor agrícola na tomada de decisão em termos de políticas públicas. Concluíram que a implementação dessa metodologia contribui para a análise da cobertura vegetal e obtenção de indicadores da ocorrência de fenômenos climáticos de larga escala.

Yaduvanshi et al. (2015) realizaram o monitoramento da seca sobre uma região tropical da Índia, à partir da integração de dados TRMM e MODIS, e obtiveram resultados significativos indicando que o TRMM e o MODIS são promissores, concluindo que a correlação dos dados provenientes desses sensores pode ser utilizada para identificar áreas agrícolas e intercorrências meteorológicas.

4.1 SÉRIES TEMPORAIS

Série temporal, também denominada de série histórica, é uma sequência de dados obtidos em intervalos regulares de tempo durante um período específico (MORETTIN e TOLOI, 1985; EVERITT, 2005), tais como precipitação pluvial, monitoramento da vegetação utilizando índices de vegetação, valores mensais de temperatura, entre outros. Em função disso, sua utilização é possível em diferentes campos de aplicação (WAGNER et al., 2013).

Diversas observações e análises de processos e regimes lineares e não lineares na natureza são registradas a partir de uma série temporal (ATKINSON et al., 2012; KUPLICH et al., 2013; BAYMA e SANO, 2015).

Há, basicamente, dois enfoques utilizados na análise de séries temporais, ambos com a mesma função de construir modelos para as séries, de acordo com os objetivos determinados. De maneira que no primeiro enfoque, a análise é realizada no domínio temporal e os modelos propostos são “paramétricos”, enquanto que, no segundo enfoque a análise é conduzida no domínio das frequências e os modelos são “não paramétricos” (MORETTIN e TOLOI, 2006).

Outra consideração relevante sobre uma série temporal é o fato de que ela é estacionária, ou seja, desenvolve-se no tempo de maneira aleatória em torno de uma média constante, refletindo alguma forma de equilíbrio estável (MORETTIN e TOLOI, 2006). Entretanto, a maior parte das séries que encontramos na prática apresenta alguma forma de não estacionariedade, em geral tendências, sendo o caso mais simples aquele em que a série flutua ao redor de uma reta, com inclinação positiva ou negativa, conhecida como tendência linear.

Na análise de uma série temporal, deseja-se, sobretudo, modelar o fenômeno estudado para daí então descrever o comportamento da série, fazer estimativas e, por fim, avaliar quais os fatores que influenciaram o comportamento da série, definindo relações de causa e efeito entre duas ou mais variáveis. Para tanto, há um conjunto de técnicas

estatísticas disponíveis que dependem do modelo definido para a série, bem como do tipo de série analisada e do objetivo do trabalho (MORETTIN e TOLOI, 2006).

Nos últimos anos verifica-se um crescente aumento nos estudos sobre tendências de séries temporais. Trabalhos como Paiva e Clarke (1995), Alexander et al. (2006), Folhes e Fisch (2006), Sillmann e Roeckner (2008), Blain (2010), Alves et al. (2011) e Lima et al. (2011), têm procurado analisar o comportamento de variáveis meteorológicas ao longo do tempo.

4.1.1 Modelo de tendência linear

Os modelos de regressão são largamente utilizados em diversas áreas do conhecimento para análises dos efeitos da relação entre uma variável resposta dependente e uma ou mais variáveis independente. No modelo de tendência linear (equação 3), a análise é realizada no domínio do tempo. Esse modelo é caracterizado como paramétrico, dentre outros mais usuais, a saber: modelos não lineares; modelos auto-regressivos e de médias móveis; modelos auto-regressivos integrados e de médias móveis; modelos de memória longa e modelos estruturais (MORETTIN e TOLOI, 2006).

Modelo de tendência linear

$$z_t = \alpha + \beta t + a_t \quad (3)$$

em que, z_t corresponde à função linear dos parâmetros, completamente determinada no tempo; α é o parâmetro de coeficiente de intercepto da reta ajustada; β é o parâmetro de coeficiente de declividade da reta ajustada; e a_t corresponde à sequência aleatória independente de z_t . Supõe-se que as variáveis a_t aleatórias não sejam correlacionadas, tenham média zero e variância constante (equação 4) (MORETTIN e TOLOI, 2006).

$$z_t = \alpha + \beta x_t + a_t \quad (4)$$

em que, z_t corresponde à função linear dos parâmetros, sendo os parâmetros do coeficiente de inclinação da reta, estimado usando-se o método de mínimos quadrados; e x_t corresponde à quantidade fixa observável.

4.1.2 Modelo de Mann-Kendall

Em aplicações que envolvem dados meteorológicos, dados de oceanografia ou física, existe a necessidade da busca de periodicidades nos dados observados. Há duas situações em que frequentemente ocorrem essas periodicidades, a saber: estimar amplitudes e fases, utilizando dados conhecidos das frequências ou estima amplitudes, frequências e fases (MORETTIN e TOLOI, 2006).

Um dos problemas mais comuns na estimativa de séries temporais é a presença de ruídos ou contaminantes. Tratando de séries temporais de imagens, é possível citar como exemplo a presença de nuvens. Existem diversas técnicas para determinar a qualidade e capacidade das tendências estimadas, utilizando técnicas de avaliação de significância de tendências. O teste de significância não paramétrico, de tendência monotônica de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) e sua variante, apresenta-se a fim de medir o grau com que uma tendência está aumentando ou diminuindo consistentemente no tempo, determinada pelo Tau de Mann-Kendall, isto é, a frequência relativa de concordâncias menos a frequência relativa das discordâncias (CHAKRABORTY et al., 2013).

Atualmente, as análises de tendência de séries temporais têm sido realizadas utilizando o teste de Mann-Kendall. Para Modares e Silva (2007), o teste de Mann-Kendall avalia com bastante eficiência a tendência de séries temporais de dados ambientais.

Esse teste não paramétrico é sugerido pela organização meteorológica mundial para avaliação da tendência em séries temporais de dados ambientais (YUE et al., 2002). Para o modelo de tendência monotônica de Mann-Kendall, foi estimado o coeficiente tau (τ), dado pela equação 5 (MANN, 1945; KENDALL, 1975):

$$\tau = 2s / [n(n - 1)] \quad (5)$$

em que, τ corresponde ao tau de Mann-Kendall; s é o sinal; e n é o número de elementos da série temporal.

$$s(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & \text{se } (x_i - x_j) < 0 \\ 0, & \text{se } (x_i - x_j) = 0 \\ -1, & \text{se } (x_i - x_j) > 0 \end{cases}$$

sendo x_i e x_j os dados estimados da sequência de valores.

Os valores de τ variam de -1 a 1, e expressam se a tendência está aumentando ou diminuindo, sendo o valor máximo a resposta obtida com vegetação mais densa. O teste de significância de Mann-Kendall foi considerado como avaliador da significância. Os valores positivos e negativos de tau de Mann-Kendall, com significância $\alpha < 0,05$, representam, respectivamente, aumento e diminuição significativos, e $\alpha > 0,05$ representam tendência não significativa.

5 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), objeto de estudo desse trabalho, localiza-se no sudeste do Brasil, nos estados de Minas Gerais (MG) e Espírito Santo (ES), mais precisamente nos paralelos 17°45' e 21°15' de latitude sul e os meridianos 39°55' e 43°45' de longitude oeste. Possui uma área de drenagem de 86.744 km², desde a nascente até o oceano Atlântico, (Regência, ES), caracterizando-se como a maior bacia em volume de vazão no ES (IGAM, 2010).

Do total da BHRD (Figura 1.2), 82% está inserida no estado de MG distribuída em seis macrorregiões, em que a maior área nesse estado encontra-se na região denominada Vale do rio Doce, representada por 45%, seguida da região metropolitana de Belo Horizonte com 18%, Zona da Mata com 17%, e outras três regiões com menor representação, sendo Vale do Mucuri, Campo das Vertentes e Jequitinhonha somando 2%. No estado do ES a BHRD está inserida nas quatro macrorregiões, totalizando 18%, abrangendo grande área das regiões Noroeste e litoral Norte Espírito-Santense, com 7% de representatividade da bacia em cada uma, e parte das regiões Central (3,8%), e Sul (0,2%) do estado (IBIO, 2016).

Limita-se ao sul com a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a oeste com a bacia do rio São Francisco e, em pequena extensão, com a bacia do rio Grande. Ao norte, limita-se com a bacia dos rios Jequitinhonha e Mucuri, e a noroeste, com a bacia do rio São Mateus. O rio Doce tem extensão de 850 km e suas nascentes estão, predominantemente, em MG, nas serras da Mantiqueira e Espinhaço (IBIO, 2016).

O sistema de drenagem da BHRD tem grande importância para a economia da região, fornecendo água para diferentes usos, havendo destaque para uso doméstico, agropecuário, industrial e geração de energia elétrica. Os rios da região ainda funcionam como canais receptores e transportadores de rejeitos e efluentes (IBIO, 2016).

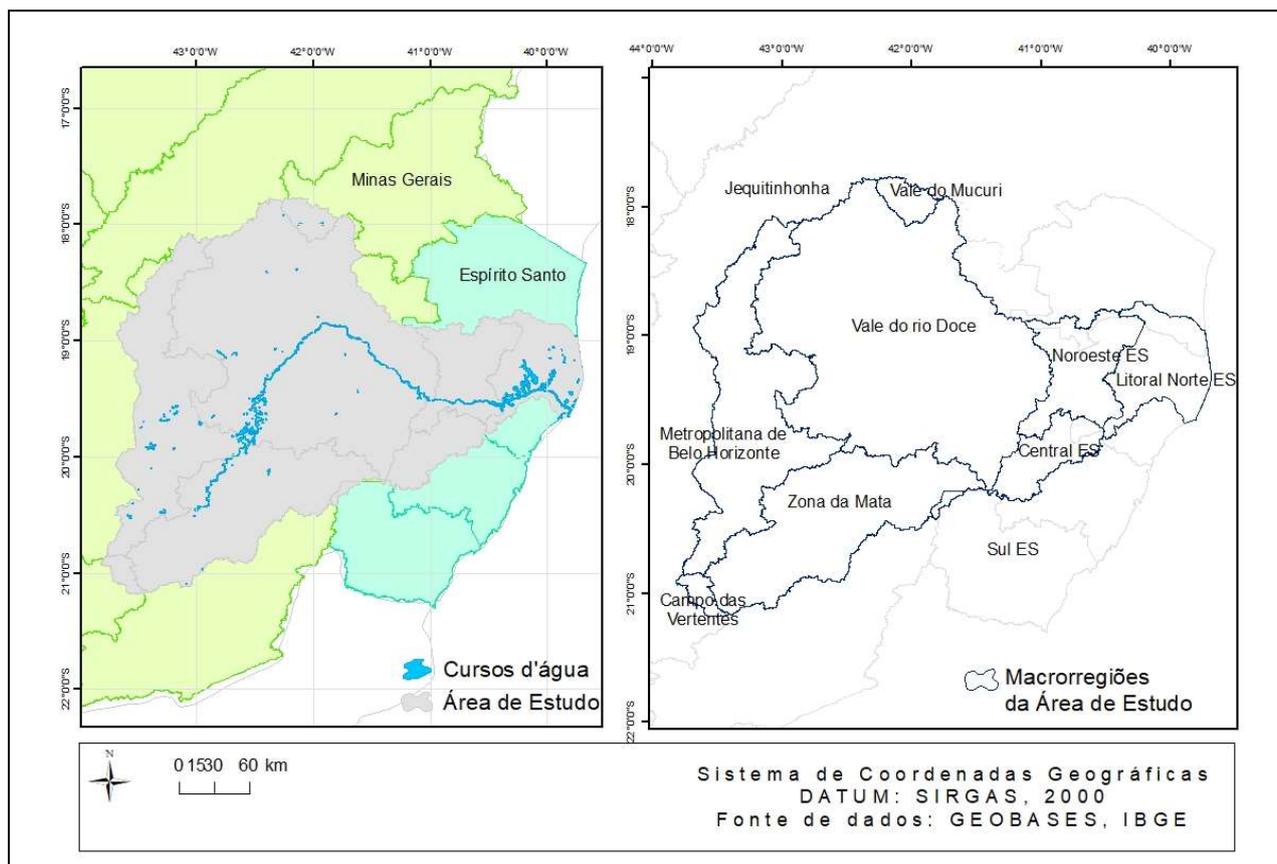


Figura 1.2 – Localização da área de estudo, com destaque das macrorregiões dos estados de MG e ES inseridas na BHRD.

Fonte: A autora.

Devido às suas características físicas, a BHRD, foi dividida em três regiões (IGAM, 2010):

Alto Doce – região que corresponde às nascentes até a confluência com o rio Piracicaba, afluente do rio Doce pela margem esquerda, nas proximidades da cidade de Ipatinga, em MG;

Médio Doce – vai da confluência com o rio Piracicaba até a divisa entre MG e ES, nas proximidades da confluência com o rio Guandu no ES e;

Baixo Doce – abrange uma área que vai da divisa entre MG e ES até a foz no Oceano Atlântico.

A população residente na BHRD, estimada em aproximadamente 3,5 milhões de habitantes, está distribuída em 267 municípios, sendo 34 no estado do ES. Mais de 85% desses municípios têm até 20 mil habitantes, e cerca de 73% da população total concentra-se na área urbana (IGAM, 2010).

Nos municípios com até 10 mil habitantes, 47% da população vive em zona rural. As sub-bacias dos rios Piranga e Piracicaba apresentam o maior Produto Interno Bruto (PIB)

industrial e concentram aproximadamente 48% da população total (IBIO, 2016). As bacias menos industrializadas, por sua vez, e com uma dinâmica econômica menos ativa, como as sub-bacias do Santo Antônio e Guandu tiveram diminuição ou manutenção do contingente populacional ao longo dos últimos anos (IGAM, 2010).

No passado, uma das principais atividades econômicas na bacia foi a extração de ouro, o que determinou a ocupação da região. Atualmente, existe uma grande diversidade econômica na bacia, havendo destaque para agropecuária, agricultura e silvicultura (lavouras tradicionais, cultura de café, cana-de-açúcar, criação de gado de corte e leiteiro, suinocultura, dentre outras) (IBIO, 2016).

Na agroindústria, ocorre principalmente a produção de açúcar e álcool. A BHRD é detentora do maior complexo siderúrgico da América Latina, ao qual estão associadas empresas de mineração e reflorestadoras. Destacam-se ainda indústrias de celulose e laticínios, comércio e serviços voltados aos complexos industriais, assim como geração de energia elétrica, com grande potencial de exploração (IBIO, 2016).

O relevo da BHRD é caracterizado como ondulado, montanhoso e acidentado. Apesar de ser considerada privilegiada pela grande disponibilidade de recursos hídricos, há uma má distribuição desses recursos ao longo da bacia (COELHO, 2007). Outros problemas relacionados aos recursos hídricos na bacia envolvem a erosão e o assoreamento dos rios, oriundos de desmatamentos generalizados e mau uso dos solos, havendo também uma contribuição por parte da urbanização na BHRD, gerando impactos nos cursos d'água, envolvendo, entre outros problemas, a ausência de sistema de tratamento de esgotos (IGAM, 2010).

A BHRD apresenta grande biodiversidade, sendo que 98% dela está inserida no bioma Mata Atlântica (IBIO, 2016), um dos mais importantes e ameaçados do mundo. Os 2% restantes são representados por formações de vegetação campestre (IBGE, 2014), descrita no Anexo A. Essa diversidade é explicada por um conjunto de fatores, sobretudo, pela posição geográfica, pelas características de relevo e do encontro de massas de ar que atuam no interior da bacia, como é o caso do Sistema Tropical Atlântico, predominante em grande parte do ano (COELHO, 2007).

De acordo com a classificação de Köppen (KÖPPEN e GEIGER, 1939), que considera os aspectos gerais dos regimes de precipitação e das temperaturas, o clima é caracterizado como tropical úmido, identificando-se, basicamente, três tipos climáticos na bacia:

- Cwb – Tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos: presente nas vertentes da Serra da Mantiqueira e do Espinhaço.

- Cwa – Tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos: presente nas nascentes de seus afluentes (cabeceiras dos rios Santo Antônio e Suaçuí Grande).

- Aw – Quente com chuvas de verão / tropical chuvoso com estação seca no inverno (sub-úmido): presentes nos trechos médio e baixo do rio Doce (próximo ao litoral) e afluentes das sub-bacias dos rios Guandu e Santa Joana.

A estação chuvosa na bacia inicia-se, normalmente, em novembro e se prolonga até março com uma distribuição heterogênea e um total médio anual variando entre 1.500 mm, nas nascentes, a 900 mm na região da cidade de Aimorés, MG, voltando a aumentar em direção ao litoral. As temperaturas médias anuais na bacia oscilam de 18°C em Barbacena, a 24,6°C em Aimorés, com períodos mais quentes nos meses de janeiro e fevereiro, enquanto que as temperaturas mínimas ocorrem nos meses de junho e julho (SOUZA et al., 2010).

A BHRD passou por uma grande tragédia no dia cinco de novembro de 2015, quando ocorreu o rompimento de um dos diques da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, no subdistrito de Bento Rodrigues, localizado em Mariana, MG. A barragem é de responsabilidade da mineradora Samarco, controlada pela Vale e pela companhia anglo-australiana BHP Billiton, que atua desde 1977 na produção de minério de ferro para produção de aço, com empreendimentos nos estados de MG e ES.

O rompimento da barragem de Fundão foi considerado, por diversas agências de risco, o maior desastre ambiental da história do país. Estima-se que foram escoados cerca de 60 bilhões de litros de rejeitos liquefeitos, com impactos ainda mal avaliados e graves consequências, incluindo uma série de danos ambientais e prejuízos incalculáveis para o meio físico, biótico e socioeconômico da área atingida e conseqüentemente de toda a BHRD (FELIPPE et al., 2016).

Esse fato evidencia a necessidade de estudos relacionados aos impactos diretos e indiretos causados pelas atividades econômicas e antrópicas, assim como a permanência de constante supervisão de como essas atividades estão sendo controladas sob o olhar da conservação e recuperação dos recursos naturais na bacia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inúmeros estudos científicos relacionados aos ambientes naturais têm utilizado os instrumentos do sensoriamento remoto, que vêm mostrando-se cada vez mais eficazes no atendimento aos anseios e necessidades, tanto para análises sobre conservação e recuperação de áreas florestais (CARVALHO JR., et al., 2008; BRANDO, et al., 2010; WAGNER, et al., 20013; PAIVA, et al., 2016) e avaliação e identificação de fitofisionomias em áreas agrícolas (JHANN, et al., 2012; TRENTIN et al., 2013; LEIVAS, et al., 2014), quanto para correlação de índices de vegetação com dados climáticos (ADAMI, et al., 2008; LADÁNYI, et al., 2011; HERDIANTO, et al., 2013).

A utilização das técnicas de sensoriamento remoto em séries temporais utilizando dados do sensor MODIS é uma alternativa importante que vem se destacando na comunidade científica por permitir uma avaliação de baixo custo em áreas consideravelmente extensas (ROSENDO e ROSA, 2005; GAIDA, et al., 2012; WAGNER, et al., 20013; SOUZA, et al., 2016).

A obtenção das imagens oriundas do sensor MODIS permite a cobertura de grandes áreas da superfície terrestre, como é o caso da BHRD, possibilitando a construção e a análise de séries temporais de dados de vegetação de diferentes fisionomias, auxiliando no estudo da dinâmica da vegetação e de seus ecossistemas.

As metodologias empregadas nesse trabalho, desenvolvidas nos capítulos II e III, mostraram-se eficientes para a análise das tendências do comportamento da vegetação, utilizando índices de vegetação obtidos por meio do sensor MODIS e dados da precipitação pluvial oriundos do satélite TRMM, bem como para avaliar o processo de mudanças do Uso e Cobertura da Terra (UCT) na BHRD e sua relação com os padrões observados sobre a cobertura florestal.

7 REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, L. J. O.; PACHÊCO, A.; COSTA, T. C. C.; LOPES, O. F.; OLIVEIRA, M. A. J. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/LANDSAT. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 492-498, 2002.
- ADAMI, M., FREITAS, R. M. de; PADOVANI, C. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; MOREIRA, M. A. Estudo da dinâmica espaço-temporal do bioma Pantanal por meio de imagens MODIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 10, p.1 371-1378, 2008.
- ADEYEWA, Z.D.; NAKAMURA, K. Validation of TRMM radar rainfall data over major climatic regions in Africa, **Journal of Applied Meteorology**, v. 42, n.2, p. 331-347, 2003.
- AGAREZ, F. V.; VICENS, R. S.; CRUZ, C. B. M.; NOGUEIRA, C. R.; GARAY, I. Utilização de índice de vegetação na classificação integrada de fragmentos florestais em mata atlântica de tabuleiros no município de Sooretama, ES, In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2001, Foz do Iguaçu, **Anais...** São José dos Campos, INPE, p. 1-9, 2001.
- ALEXANDER, L. V; ZHANG, X.; PETERSON, T. C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A. M. G. et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, 2006. Disponível em: <<http://onlinelibrary-wiley.ez43.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1029/2005JD006290/epdf>>. Acesso em: Outubro de 2017.
- ALVES, E. D. L; PRADO, M. F.; SPECIAN, V. Análise da variabilidade climática da precipitação pluvial em Barra do Garças, Mato Grosso. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, v. 2, n. 2, p. 512-523, jul./dec. 2011.
- ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 35(4), p. 445-456, 2005.
- ANDERSON, L. O. **Classificação e monitoramento da cobertura vegetal do estado do Mato Grosso utilizando dados multitemporais do sensor MODIS**. 2005. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). INPE, São José dos Campos. 2005.
- ANDRÉ, R. G. B; MARQUES V. S; PINHEIRO F. M. A; FERRAUDO A. S. Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no estado do Rio de Janeiro, utilizando-se valores mensais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 23(4): 501-509. 2008.
- ARVOR, D.; DUBREUIL, V.; MEIRELLES, M. S. P. Análise da intensificação da agricultura no Mato Grosso à partir de dados TRMM 3B42 e de séries temporais MODIS/EVI. **Anais...** XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, p. 91-98. 25-30 abril de 2009.
- ATKINSON, P. M.; JEGANATHAN C.; DASH J.; ATZBERGER, C. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time series data to estimate vegetation phenology. **Remote Sensing of Environment** 123, p. 400-417. 2012.

AZEREDO, M.; MONTEIRO, A. M. V.; ESCADA, M. I. S.; FERREIRA, K. R.; VINHAS, L.; PINHEIRO, T. F. Mineração de trajetórias de mudança de cobertura da terra em estudos de degradação florestal. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 68/4, p. 717-731, 2016.

BARET, F.; GUYOT, G. Potential and Limits of Vegetation Índices for LAI e APAR Assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.3, p. 161-173, 1991.

BARRERA, D. F. Precipitation estimation with the hydro-estimator technique: its validation against raingage observations. In: Congresso da IAHS, 7, 2005. Foz do Iguaçu. **Anais...Foz do Iguaçu**: IAHS, 2005.

BAYMA, A. P.; SANO, E. E. Séries temporais de índices de vegetação (NDVI E EVI) do sensor MODIS para detecção de desmatamentos no bioma cerrado. **Boletim de Ciências Geodésicas**, sec. Artigos, Curitiba, v. 21, n 4, p.797-813, 2015. Disponível em: file:///D:/Usuario/Downloads/44398-167675-1-PB.pdf. Acesso em: Agosto de 2017.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. de A.; SILVA, B. B. da S.; LOPES, P. M. O.; SILVA, E. F. de f. e. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V. 18, n. 1, p. 73-84, 2014.

BLAIN, G. C. Detecção de tendências monótonas em séries mensais de precipitação pluvial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 1027-1033, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/brag/v69n4/v69n4a31>>. Acesso em: Novembro de 2017.

BRANDOA, P. M.; GOETZC, S. J., BACCINIC, A., NEPSTADC, D. C., BECKC, P. S. A., CHRISTMAND, M. C. Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon. **PNAS**. v. 107 | n. 33, 2010.

CARUSO, F.; OGURI, V. A Lei de Planck e a hipótese dos quanta de luz. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 3, p. 463 - 465, 2005. Traduzido de: BOSE, S. Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese. **Zeitschrift für Physik**, 26, 178, 1924. (Springer Verlag).

CARVALHO JUNIOR, O. A. de; COUTO JUNIOR, A. F.; SILVA, N. C. da; MARTINS, E. de S.; CARVALHO, A. P. F.; GOMES, R. A. T. Avaliação dos classificadores espectrais de mínima distância euclidiana e spectral correlation mapper em séries temporais NDVI-MODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 61, v. 04, p. 399-412, 2009.

CARVALHO JÚNIOR, O. A. de; SAMPAIO, C. da S.; SILVA, N. C. da; COUTO JÚNIOR, A. F.; GOMES, R. A. T. CARVALHO, A. P. F.; SHIMABUURO, Y. E. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, p. 505-517, 2008.

CHAKRABORTY, S.; PANDEY, R. P.; CHAUBE, U. C.; MISHRA, S. K. Trend and variability analysis of rainfall series at Seonath River Basin, Chhattisgarh (India). **International journal of Applied Sciences and Engineering Research**, v. 2, nº 4, p. 425-434, 2013.

CHEN, S., et al. Similarity and difference of the two successive V6 and V7 TRMM multisatellite precipitation analysis performance over China. **Journal Geophysical Research Atmospheres**, v. 118, n. 13, p. 60-74. 2013.

CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A.; LIVO, K. E.; KOKALY, R. F.; SUTLEY, S. J.; DALTON, J. B.; McDOUGAL, R. R.; GENT, C. A. Imaging Spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems. **Journal of Geophysical Research**. p. 1-44, 2003.

COELHO, A. L. N. **Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-Baixo Rio Doce/ES** 2007. 227 p. Tese de Doutorado (Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia), Niterói, 2007.

COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai Superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, n. 59, p. 93-99, 2007.

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satellite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. 2006. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2006.

CUNHA, J. E. DE B. L.; RUFINO, I. A. A.; SILVA, B. B. DA; CHAVES, I. DE B. Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.539-548, 2012.

DERECZYNSKI, C. P; OLIVEIRA J. S; MACHADO C. O. Climatologia da Precipitação no Município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**. 24 (1): 24-38. 2009. Disponível em: <[http:// dx.doi.org/10.1590/S0102-77862009000100003](http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862009000100003)> Acesso em: Março de 2017.

EVERITT B. S. The Cambridge dictionary of statistics in the medical the medical sciences. **Sciences Cambridge**: Cambridge University Press; 1995.

FELIPPE, M. F.; COSTA, A.; FRANCO, R.; MATOS, R. E. S. A Tragédia Do Rio Doce: A Lama, O Povo e a Água. Relatório de Campo e Interpretações Preliminares Sobre as Consequências do Rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão (Samarco/Vale/Bhp). **Revista GEOgrafias**, v. 1, p. 63-94, 2016.

FLEMING, K.; AWANGE, J. L. Comparing the version 7 TRMM 3B43 monthly precipitation product with the TRMM 3B43 version 6/6A and Bureau of Meteorology datasets for Australia. **Australian Meteorological and Oceanographic Journal**, 63, 421–426, 2013

FOLHES, M. T.; FISCH, G. Caracterização climática e estudo de tendência nas séries temporais de temperatura do ar e precipitação em Taubaté (SP). **Ambiente e Água**, v. 1, n. 1, p. 61-71, 2006. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/928/92810108.pdf>>. Acesso em: Janeiro de 2018.

FULLER, D. O.; PRINCE, S. D. Rainfall and foliar dynamics in tropical southern Africa: Potential impacts of global climatic change on savanna vegetation, **Climate Change**, v. 33, p. 69-96, 1996.

FUNK, C.; BUDDE, M. E. Phenologically-tuned MODIS NDVI-based production anomaly estimates for Zimbabwe. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 1, 15, p. 115-125. 2009.

GAIDA, W.; PEREIRA FILHO, W.; WACHHOLZ, F.; KONRAD, C. G. Dinâmica da vegetação e uso da terra com uso do NDVI na bacia hidrográfica do Alto Jacuí. **Geo UERJ**, v. 2, nº. 23, p. 684-698, 2012.

GOBO, J. P. A. **Integração de dados de precipitação TRMM com índices de vegetação do MODIS para o monitoramento de estiagem na região Sul do Brasil**. Relatório final de projeto de iniciação científica (PIBIC/CNPq/INPE). 2010.

GOLTZ, E.; BRANDÃO, D.; TOMÁS, L.; MANTELLI, R.; YOSIO, M. A.; SHIMABUKURO, E.; FORMAGGIO, A. R. Utilização de índices espectrais de vegetação do sensor MODIS na determinação de áreas suscetíveis a alagamento no Pantanal Sulmatogrossense. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 59/01, 2007.

HERDIANTO, R.; PAIK, K.; COLES, N. A.; Smettem, K. Transitional responses of vegetation activities to temperature variations: Insights obtained from a forested catchment in Korea. **Journal of Hydrology**, v. 484, p. 86-95, 2013.

HUETE, A.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEWEEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p.440–451, 1997.

Instituto Bio Atlântica (IBIO). **Entidade delegatária e equiparada às funções de Agência de Água**. Disponível em: <<http://www.ibioagbdoce.org.br/a-bacia>>. Acesso em: Outubro de 2016.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE). **Mapas temáticos**. 2014. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/tematicos>>. Acesso em: Julho de 2017.

Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do rio Doce**: Volume I, relatório final. 2010. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2014/10/PIRH_Doce_Volume_I.pdf>. Acesso em: Novembro de 2015.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. In: Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução: José Carlos Neves Epiphânio (coord.) et al. São José dos Campos: Parêntese, p. 357-410, 2009.

JIN, S.; SADER, S. A. MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n. 4, p. 462-470, 2005.

JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; DUFT, D. G.; LAMPARELLI, R. A. C. Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1295-1306, 2012.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 3-15, 2002.

KARNIELI, A., NURIT, A., PINKER, T. R., ANDERSON, M., IMHOFF, M. L., GUTMAN, G., PANOV, N.; GOLDBERG, A. Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations. **Journal of Climate**, 23:618-633. 2010.

KENDALL, M.G. **Rank correlation measures**. London: Charles Griffin, 220p. 1975

KIDDER, S. Q.; HAAR, V. **Satellite Meteorology: an introduction**. Academic Press, 1995.

KOGAN, F. N., GITELSON, A., ZAKARIN, E., SPIVAK, L.; LEBED, L. AVHRR-Based Spectral Vegetation Index for Quantitative Assessment of Vegetation State and Productivity: Calibration and Validation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 69:899-906. 2003.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Handbuch der Klimatologie. Berlin: **G. Borntraeger**, 6 v. 1939.

KUMMEROW, C. et al. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. **Journal of Applied Meteorology**, 39, p. 1965-1982, 2000.

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.17, n.10, p.1116–1123, 2013.

LADÁNYI, Z.; RAKONCZAI, J.; LEEUWEN, B. V. Evaluation of precipitation-vegetation interaction on a climate-sensitive landscape using vegetation indices. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 5, p. 1-19, 2011.

LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. de C.; TORRESAN, F. E.; VICENTE, L. E.; TEIXEIRA, A. H. C.; BOLFE, E. L.; BARROS, T. R. de. Avaliação do índice de vegetação padronizado no monitoramento indicativo de estiagens em períodos críticos da soja no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 5, n. 66, p. 1145-1155. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. 2014.

LIMA, J. R. A.; NEVES, D. J. D.; ARAÚJO, L. E.; AZEVEDO, P. V. Identificação de tendências climáticas no Estado da Bahia. **Revista de Geografia**, v. 28, n. 3, 2011. Disponível em: <file:///D:/Usuario/Downloads/228962-64886-1-PB.pdf>. Acesso em: Janeiro 2017.

LIU, W. T.; KOGAN, F. Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR based vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, p. 1161-1180. 2002.

LI, X.; ZHANG, Q.; YE, X. Dry/Wet Conditions Monitoring Based on TRMM Rainfall Data and Its Reliability Validation over Poyang Lake Basin, China. **Water**, n. 5, p. 1848-1864, 2013.

LOUZADA, F. L. R. de O. **Balando hídrico climatológico com dados estimados pelo satélite Tropical Rainfall Measuring Mission para a bacia hidrográfica do rio Doce.** 107 p. Tese de Doutorado (Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias), Alegre, ES, 2016.

LUCAS, A. de A.; SCHULER, C. A. B. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no litoral norte de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental** vol. 11 nº.6 Campina Grande. 2007.

LUNETTA, R. S. et al. Monitoring agricultural cropping patterns across the Laurentian Great Lakes Basin using MODIS-NDVI data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12, n. 2, p. 81–88. 2010.

LYRA, G. B, GARCIA, B. I. L., PIEDADE, S. M. S, SEDIYAMA, G. C., SENTELHAS, P. C. Regiões homogêneas e funções de distribuição de probabilidade da precipitação pluvial no Estado de Táchira, Venezuela. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 205-215, 2006, Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2006000200004>>. Acesso em: Setembro de 2016.

MANN, H.B. Nonparametric test against trend. **Econometrica**, v.13, p.245-259, 1945.

MARTINUZZI, S. et al. Mapping tropical dry forest habitats integrating Landsat NDVI, Ikonos imagery, and topographic information in the Caribbean Island of Mona. **Revista de Biologia Tropical**, v. 56, n. 2, p. 625–639, 2008.

MASELLI, F. Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data. **Remote Sensing of Environment**. v. 89, n. 4, p. 423-433, 2004.

MASSAGLI, G. O.; VICTORIA, D. de C.; ANDRADE, R. G. **Comparação entre precipitação medida em estações pluviométricas e estimadas pelo satélite TRMM.** 5º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – Campinas, SP, 2011.

MELO, D. de C. D.; XAVIER, A. C.; BIANCHI, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; SCANLON, B. R.; LUCAS, M. C.; WENDLAND, E. Performance evaluation of rainfall estimates by TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis 3B42V6 and V7 over Brazil, **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 120, 9426–9436. 2015.

MODARES, R.; SILVA, V. de P. R. de. Trends analysis of rainfall record in arid and semi arid regions of Iran. **Journal of Arid Environments**, v.70, n. 1, p.344-355, 2007.

MORA, F.; IVERSON, L. R. Dynamic stratification of the landscape of Mexico: analysis of vegetation patterns observed with multitemporal remotely sensed images. **Geocarto International**, v. 12, p. 73-87, 1997.

MORAES, E. C.; PEREIRA, G.; ARAI, E. Uso dos produtos EVI do sensor MODIS para a estimativa de áreas de alta variabilidade intra e interanual no bioma pantanal. **GEOGRAFIA**, Rio Claro, v. 34, Número Especial, p. 757-767, 2009.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação.** 3ª ed. Viçosa/MG: UFV, 320 p, 2007.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4 ed. Viçosa, MG, 422 p, 2011.

MOREIRA, R. da C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 2000. Dissertação (mestrado em sensoriamento remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2000.

MORETTIN, P.A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. 2ª ed. São Paulo, 2006.

MORETTIN, P. A., TOLOI, C. M. C. **Previsão de séries temporais**. 2a. ed. São Paulo: Atual Editora; 1985.

MOTA, M. C. **Comparação entre dados meteorológicos estimados e observados para utilização em modelos de estimativa da produtividade agrícola**. 2015. 100 p. Dissertação (mestrado em manejo e conservação do solo e da água), Universidade Federal de Pelotas, RS, 2015.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, NASA. **Moderate Resolution Imagers Spectroradiometer**. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>. Acesso em: Novembro de 2016.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, NASA. **Precipitation Measurement Missions**. Disponível em: <<https://pmm.nasa.gov/TRMM/mission-overview>>. Acesso em: Setembro de 2017.

NICHOLSON, S. On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel. **Journal of Arid Environments** 63, p. 615-641, 2005.

NOBREGA, R. S.; SOUZA, E. P.; GALVÍNCIO, J. D. Análise da estimativa de precipitação do TRMM em uma sub-bacia da Amazônia ocidental. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 25, n. 1, 2008.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e aplicações**. São Paulo. Ed. Edgard Blucher, 308 p, 1989.

PAIVA, C. M.; JESUS, A. da S. G. de; FRANÇA, G. B.; OLIVEIRA, L. M. T. Análise dos Efeitos do Déficit Hídrico na Resposta Temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no Estado do Amazonas. **Ciência e Natura**, v. 38 n. 2, p. 1064-1076, 2016.

PAIVA, E. M. C. D.; CLARKE, R. T. Análise de tendência de precipitação na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 10, n. 1/2, p. 37-41, 1995.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: Menezes, P. R.; Madeira Neto, J. S. **Sensoriamento Remoto: reflectância de alvos naturais**. Brasília: UnB/Embrapa. p. 157-199. 2001.

RAMAGE, K.; JOBARDI, I.; LEBEL, T.; DESBOIS, M. **Satellite estimation of 1-day to 10-day cumulated precipitation: comparison and validation over tropical Africa of TRMM**,

METEOSAT and GPCP products. The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 29 de setembro a 03 de outubro de 2003, Weimar, Alemanha. 2003.

REBOITA, M. S., GAN, M. A., ROCHA, R. P., AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>>. Acesso em: Setembro de 2016.

ROSEMBACK, R.; FERREIRA, N. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; CONFORTE, J. C. Análise da dinâmica da cobertura vegetal na região sul do Brasil a partir de dados do MODIS/ Terra. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 62, edição especial 2, p. 401-416, 2010.

ROSENDO, J. dos S.; ROSA, R. A utilização de sensores com resolução moderada (MODIS) no estudo da vegetação na bacia do rio Araguari – MG. **Sociedade & Natureza**, v. 17, n. 33, p. 91-104, 2005.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; DEERING, D. W.; SCHELL, J. A. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. **CollegeStation: Texas A&M University**, 87 p, 1974.

SANTOS, W. B. dos. **Análise espectro-temporal de produtos do sensor MODIS como diagnóstico para a cafeicultura de precisão.** 2015. 71 p. Dissertação (mestrado em engenharia agrícola), Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2015.

SCHMIDT, H.; KARNIELI, A. Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in a semi-arid environment, **Journal Arid Environment**, v. 45, n. 1, p. 43-59, 2000.

SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R. Utilização de índices espectrais de vegetação do sensor MODIS na determinação de áreas suscetíveis a alagamento no pantanal sulmatogrossense. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 1, p. 35-44, 2007.

SILLMANN, J.; ROECKNER, E. Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. **Climatic Change**, v. 86, p. 83-104, 2008. Disponível em: <[https://link-springer-com.ez43.periodicos.capes.gov.br/content/pdf/10.1007%2Fs10584-007-9308-6.pdf](https://link.springer-com.ez43.periodicos.capes.gov.br/content/pdf/10.1007%2Fs10584-007-9308-6.pdf)>. Acesso em: Janeiro de 2018.

SILVA, D. F. **Uso de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade e de risco climático para a soja no Vale do Médio Paranapanema**, SP. 2011. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Programa de Pós-Graduação do Instituto Agrônomo, Campinas-SP, 2011.

SOUSA JUNIOR, M. A. et al. **Monitoramento de estiagem na região sul do Brasil utilizando dados EVI/MODIS no período de dezembro de 2000 a junho de 2009.** São José dos Campos: INPE, 134 p, 2010.

SOUZA, G. M. de; GURGEL, H. da C.; CIAMP, P. M. Análise sazonal da vegetação do cerrado por meio de dados do sensor MODIS no Distrito Federal (Brasil). **Boletim Goiano de Geografia**, v. 36, n. 3, p. 502-520, 2016.

SOUZA, P. I. de, et al. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce**, vol.3. Consorcio Ecoplan – LUME, 2010.

STONE, T. A.; SCHLESINGER, P.; HOUGHTON, R. A.; WOODWELL, G. M. A map of the vegetation of South America based on satellite imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 60: 541– 551. 1994.

SWAIN, P. H., DAVIS, S. M. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York: McGrawHill, 396 p. 1978.

TRENTIN A. B.; SALDANHA, D. L.; KUPLICH, T. M. Análise comparativa do NDVI em fitofisionomias na bacia hidrográfica do rio São Marcos. **Revista Geografia Acadêmica**, v. 7, n. 1, 2013.

TROPICAL RAINFALL MEASUREMENT MISSION (TRMM). Home Page. **Greenbelt: GSFC**. Disponível em: <<http://trmm.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: Abril de 2015.

VICENTE, L. E.; GOMES, D.; VICTORIA, D. de C.; GARÇOM, E. A. M.; BOLFE, É. L.; ANDRADE, R. G.; SILVA, G. B. S. da. Séries temporais de NDVI do sensor SPOT Vegetation e algoritmo SAM aplicados ao mapeamento de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n. 9, p.1337-1345, 2012.

VICTORIA, D. de C. et al. Cropland area estimates using Modis-NDVI times series in the state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1270– 1278, 2012.

WAGNER, A. P. L.; FONTANA, D. C.; FRAISSE, C.; WEBER, E. J.; HASENACK, H. Tendências temporais de índices de vegetação nos campos do Pampa do Brasil e do Uruguai. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 9, p.1192-1200, 2013.

WAGNER, Q. P. L.; FONTANA, D. C.; FRAISSE, C.; WEIBER, E. J.; HASENACK, H. Tendências temporais de índices de vegetação nos campos do Pampa do Brasil e do Uruguai. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 9, p. 1192-1200, 2013.

WANDERLEY, H. S., SEDIYAMA, G. C., JUSTINO, F. B., ALENCAR, L. P., DELGADO R. C. Variabilidade da precipitação no Sertão do São Francisco, estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 790-795. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000700014>>. Acesso em: Março de 2017.

XUE, X.; HONG, Y.; LIMAYE, A. S.; GOURLEY, J. J.; HUFFMAN, G. J. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins? **Journal of Hydrology**, p. 91-99, 2013.

YADUVANSHI, A.; SRIVASTAVA, P. K.; PANDEY A. C. Integrating TRMM and MODIS satellite with socio-economic vulnerability for monitoring drought risk over a tropical region of India. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**. 2015. Disponível em:<<http://www.sciencedirect-com.ez43.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1474706515000078>>. Acesso em: Novembro de 2015.

Yue, P. S.; Yang, T. C.; Wu, C. K. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. **Journal of Hydrology**, v. 260, p. 161-175, 2002.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H. Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, p. 1-14, 2005.

CAPÍTULO II: ANÁLISE TEMPORAL DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DO SENSOR MODIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

FORMIGONI, Mileide de Holanda, Universidade Federal do Espírito Santo, março de 2018. **Análise temporal dos índices de vegetação do sensor MODIS na bacia hidrográfica do rio Doce.** Orientador: Alexandre Cândido Xavier. Coorientador: Alexandre Rosa dos Santos.

RESUMO

A busca pelo conhecimento da dinâmica temporal da vegetação revela padrões, processos e mecanismos usados para obter orientações e estratégias de proteção e conservação dos recursos florestais, bem como aquelas associadas à produção vegetal. Os principais componentes de uma bacia hidrográfica coexistem em permanente interação e respondem tanto às interferências naturais quanto àquelas de natureza antrópica, afetando os ecossistemas como um todo e tornando-se indicadores das condições dos referidos ecossistemas. Realizou-se a análise das tendências de comportamento da vegetação na bacia hidrográfica do rio Doce, a partir dos dados dos índices de vegetação EVI e NDVI do produto MOD13Q1, durante o período de 2001 a 2016, com o objetivo de identificar e discutir o perfil do desenvolvimento da vegetação no âmbito da bacia. Foram realizadas análises das tendências interanuais das séries temporais de índices de vegetação, utilizando os perfis temporais e as metodologias de tendência linear e tendência monotônica de Mann-Kendall. Com a geração dos perfis temporais dos índices de vegetação, observou-se que o EVI apresentou maior variação de valores quando comparado ao NDVI, que por sua vez apresentou maior amplitude. As tendências interanuais analisadas mostraram-se positivas em sua maioria e, conseqüentemente, menor variação da vegetação verde, representada pelas unidades de conservação encontradas na área de estudo. Tendências estatisticamente significativas, segundo o teste de significância de Mann-Kendall, são mais evidenciadas na série temporal do NDVI, ocupando 51% da extensão dos pixels em relação ao EVI representados por 49% dos pixels, sendo que esse último, por sua vez, apresentou padrão mais homogêneo na distribuição dos pixels significativos, ficando nítida a concentração dos mesmos nas áreas com presença de florestas. Observou-se que as tendências significativas compreendem as áreas com presença de agropecuária, pastagem e agricultura, e as tendências não significativas compreendem as áreas com maior quantidade de biomassa verde representadas pelas unidades de conservação, concluindo que não houve diminuição significativa dessas áreas.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Unidade de conservação. Tendências.

FORMIGONI, Mileide de Holanda, Federal University of Espírito Santo, march, 2018. **Temporal analysis of vegetation indices of the MODIS sensor in the hydrographic basin of the river Doce**. Advisor: Alexandre Cândido Xavier. Coadvisor: Alexandre Rosa dos Santos.

ABSTRACT

The search for knowledge of the temporal dynamics of vegetation reveals patterns, processes and mechanisms used to obtain guidelines and strategies for the protection and conservation of forest resources, as well as those associated with plant production. The main components of a river basin coexist in permanent interaction and respond to both natural and anthropogenic interference, affecting ecosystems as a whole and becoming indicators of the conditions of these ecosystems. The vegetation behavior trends were analyzed in the hydrographic basin of the river Doce, based on data from the vegetation indices EVI and NDVI of the product MOD13Q1, during the period from 2001 to 2016, in order to identify and discuss the profile of vegetation development within the basin. Analyses of the interannual trends of the time series of vegetation indices were carried out, using the time profiles and the methodologies of linear tendency and monotonic tendency of Mann-Kendall. With the generation of temporal profiles of the vegetation indexes, it was observed that the EVI showed a greater variation of values when compared to the NDVI, which in turn presented greater amplitude. The interannual trends analyzed were mostly positive and, consequently, less variation of green vegetation, represented by the conservation units found in the study area. Statistically significant trends, according to the Mann-Kendall significance test, are more evidenced in the NDVI time series, occupying 51% of the extent of the pixels in relation to the EVI represented by 49% of the pixels, the latter, in turn, presented a more homogeneous pattern in the distribution of the significant pixels, being clear the concentration of the same ones in the areas with presence of forests. It was observed that the significant trends comprise the areas with presence of agriculture, pasture and agriculture and the non-significant tendencies comprise the areas with the greatest amount of green biomass represented by the conservation units, concluding that there was no significant decrease of these areas.

Keywords: Remote sensing. Conservation unit. Tendencies.

1 INTRODUÇÃO

A busca pelo conhecimento da dinâmica temporal da vegetação revela padrões, processos e mecanismos que podem ser usados para obter orientações e estratégias de proteção e conservação dos recursos florestais (PILLAR, 1994). Existem atualmente diferentes técnicas que se diversificam de acordo com os procedimentos metodológicos e da área utilizada como referência espacial.

A bacia hidrográfica é considerada uma referência espacial para pesquisas e projetos, relacionados à diversidade de suas características naturais, bem como pela grande importância em grande parte da legislação relacionada ao meio ambiente, fazendo parte, portanto, do planejamento territorial e ambiental brasileiro (COELHO, 2007).

Guerra e Cunha (1996) afirmam que as bacias hidrográficas são excelentes unidades de gestão dos elementos naturais e sociais, por permite acompanhar as mudanças introduzidas pelo homem e as consequentes respostas da natureza. Quando utilizadas como unidade de planejamento e gerenciamento, tornam-se referências para os diversos usos e interesses dos recursos nela existentes, contribuindo com a garantia da qualidade e quantidade da água e dos demais recursos naturais envolvidos.

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD) destaca-se pela importante contribuição na geração das atividades econômicas em toda a sua extensão, incluindo principalmente agricultura, pecuária, silvicultura e indústrias (COELHO, 2007). Essas atividades utilizam, direta ou indiretamente, os recursos bióticos e abióticos para obter boa produção e, quando conduzidas de forma não planejada, podem levar a consequências irreversíveis para os recursos naturais, sobretudo no que diz respeito à conservação das florestas nativas e suas correlações bióticas dentro da bacia.

A velocidade de supressão dos remanescentes florestais, em decorrência do desenvolvimento econômico desordenado, exige que as pesquisas voltadas à manutenção do estado de conservação do ambiente natural utilizem métodos capazes de apresentar diagnósticos confiáveis que sejam úteis no sentido de subsidiar planos imediatos de conservação e recuperação das florestas.

As técnicas de sensoriamento remoto apresentam grande potencial para o mapeamento e a avaliação das condições estruturais dos recursos florestais, além do monitoramento dos ciclos anuais da vegetação (SHIMABUKURO, 2007).

Compreende-se, portanto, que a análise da densidade e da espacialidade da cobertura vegetal torna-se um importante mecanismo nos estudos voltados para análises

da degradação ambiental, gestão e planejamento dos recursos naturais, entendimento sobre os processos hidrológicos, diagnóstico do dinamismo no espaço agrário, entre outras finalidades, principalmente quando a bacia hidrográfica é tomada como unidade espacial de análise (MELO, 2008).

Dentro desse contexto, o objetivo deste estudo foi analisar as tendências de comportamento da vegetação na BHRD, a partir dos dados de EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), do sensor MODIS, durante o período de 2001 a 2016.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As etapas metodológicas deste capítulo estão apresentadas, de forma resumida, na Figura 2.1 e descritas, detalhadamente, no decorrer desta sessão.

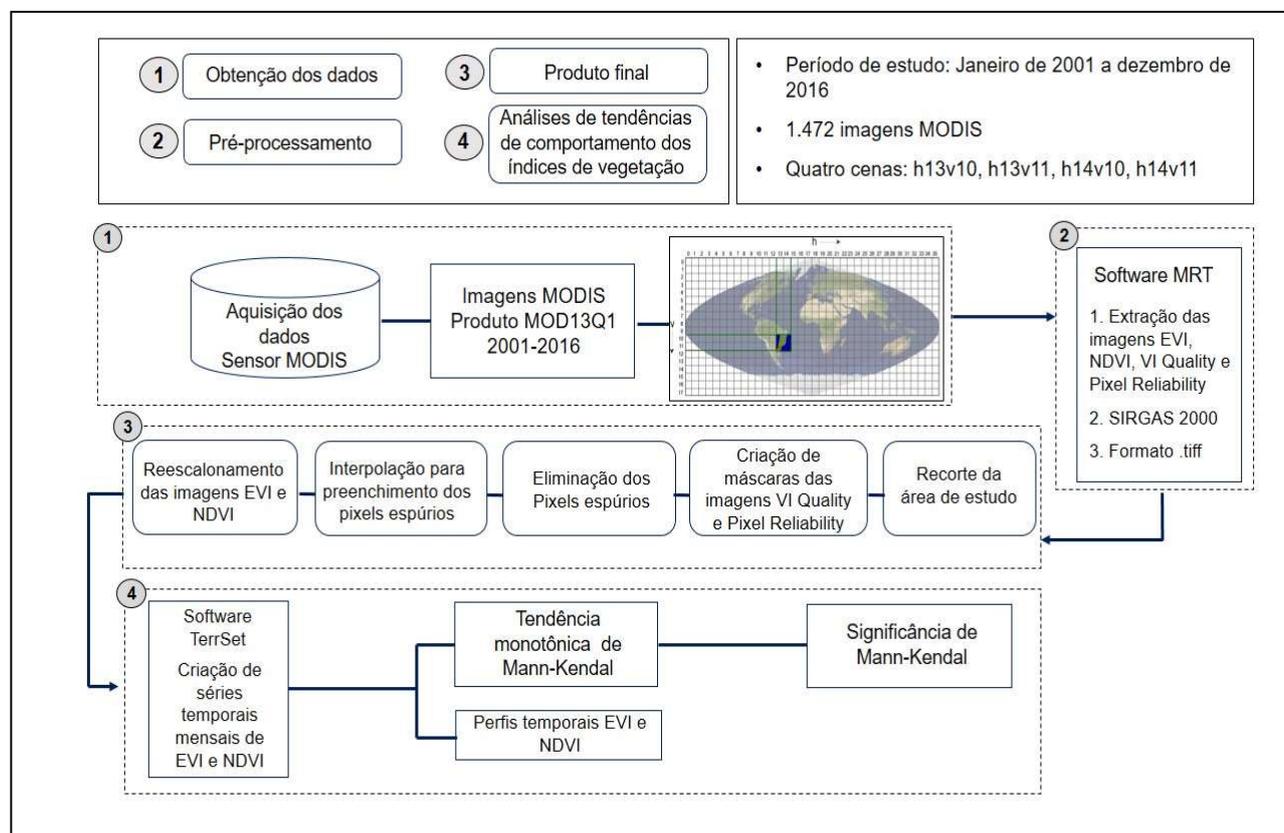


Figura 2.1 – Fluxograma contendo as etapas da pesquisa.
Fonte: A autora.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A partir do banco de dados do IBGE, com informações geradas no ano de 2014 (IBGE, 2014), foi possível elaborar a Tabela 2.1 com informações sobre a quantificação de Uso e Cobertura da Terra (UCT) na BHRD, com detalhamento e interpretação das classes de UCT apresentados no anexo A, assim como o mapa com a distribuição dessas áreas, apresentado na Figura 2.2, onde é possível observar grande extensão de área representada por mosaico de vegetação florestal com atividades de agropecuária, 66% e, mosaico de vegetação florestal com agricultura 0,93%, contra apenas 2,62% de vegetação florestal inseridas em 23 Unidades de Conservação (UCs).

Tabela 2.1 – Descrição e quantificação das classes de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Doce para o ano de 2014.

Classes	Área (km²)	%
Mosaico de veg. florestal e agropecuária	57.553	66,35
Mosaico de veg. florestal e agricultura	12.194	14,06
Pastagem plantada	5.810	6,70
Silvicultura	4.053	4,67
Vegetação florestal	2.269	2,62
Pastagem natural	1.901	2,19
Corpo d'água continental	1.155	1,33
Área agrícola	803	0,93
Área artificial	771	0,89
Vegetação campestre	220	0,25
Mosaico de vegetação campestre e agricultura	15	0,02
Área total da bacia hidrográfica do rio Doce	86.744,22	100

Fonte: Adaptado de IBGE, 2014.

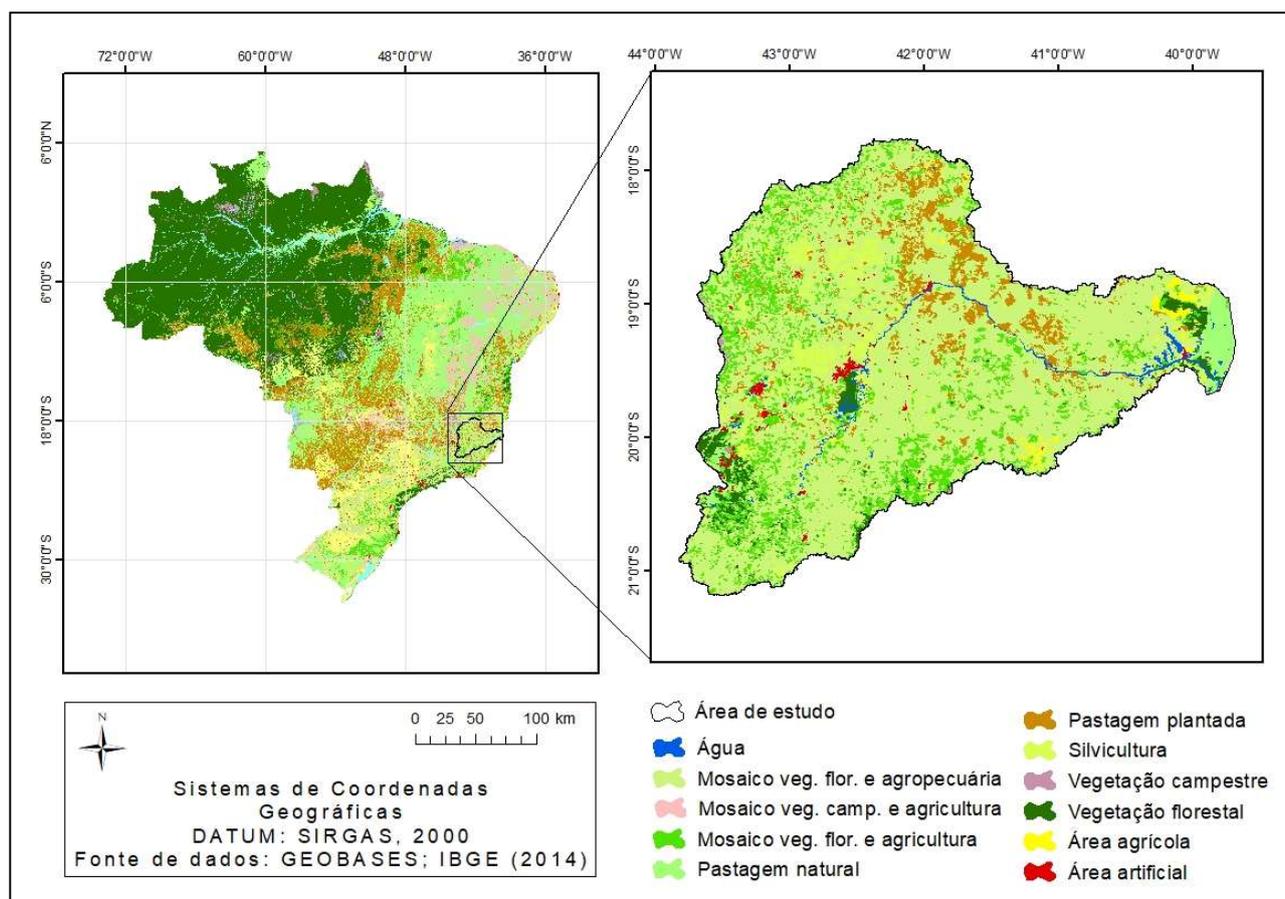


Figura 2.2 – Uso e cobertura da terra para a bacia hidrográfica do rio Doce.
Fonte: A autora. Dados obtidos de IBGE, 2014.

As principais UCs da bacia (Figura 2.3) envolvem as esferas federal, estadual e municipal, sendo que 19 delas estão inseridas no estado de MG, enquanto que o estado do ES possui quatro UCs, todas representadas pelo bioma mata atlântica, com presença de remanescentes florestais primários e mata secundária em diferentes estágios de regeneração (MELO e SALINO, 2012), inclusive estágio médio e avançado/clímax (LANA et al., 2010).

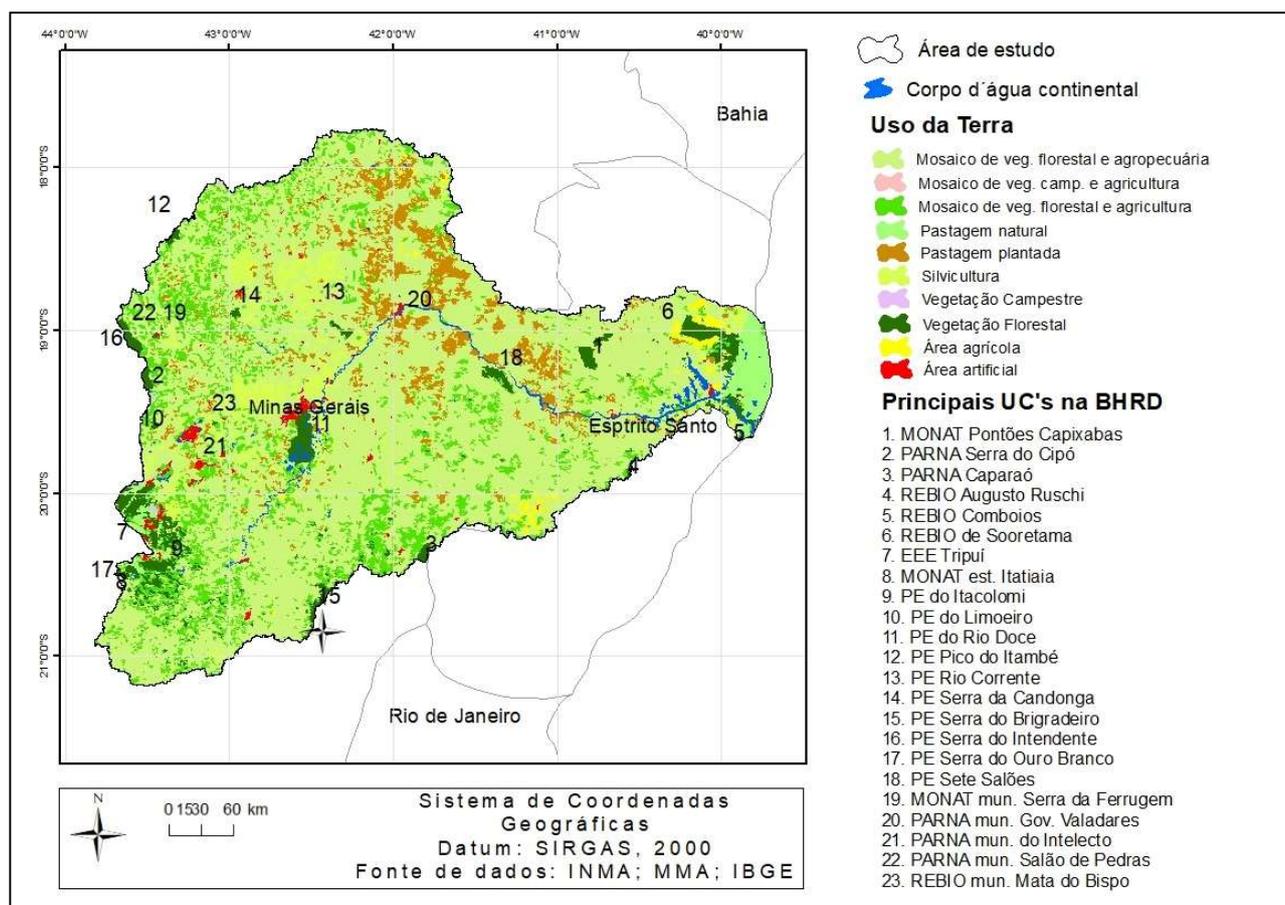


Figura 2.3 – Unidades de Conservação inseridas na bacia hidrográfica do rio Doce. Fonte: A autora.

2.2 BASE DE DADOS

A base de dados foi elaborada e desenvolvida em diferentes etapas para posterior análise de acordo com o objetivo deste trabalho.

Os dados correspondentes aos índices de vegetação NDVI e EVI, provenientes do satélite Terra, sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), produto MOD13Q1, foram adquiridos através do banco de dados da EOSDIS (*NASA's Earth Observing System Data and Information System*) de forma gratuita. Esse conjunto de dados é obtido no formato HDF (*Hierarchy Data Format*), no qual cada imagem cobre uma área de 10 x 10 graus, que corresponde a 1.200 x 1.200 km (HUETE et al., 2002).

Para a obtenção das imagens no banco de dados, a área de estudo foi previamente identificada em uma grade horizontal e vertical com a formação de células chamadas *tiles* (cenas). Essas imagens são denominadas de *ready-to-use* (prontas para serem utilizadas), já que são obtidas georreferenciadas e com correção atmosférica (LPDAAC, 2014).

Para cobrir a área da BHRD, foi estipulado um limite que extrapolou a área de estudo para que não houvesse ausência de dados na área representativa da bacia, sendo assim, foram utilizadas 4 cenas, sendo elas h13v10, h13v11, h14v10, 14v11 (Figura 2.4), totalizando em 1.472 imagens.

As imagens adquiridas correspondem ao período de 01 de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2016 e foram manipuladas de acordo com as características de cada ano, sendo organizados em “anos comuns”, em que o mês de fevereiro corresponde a 28 dias e “anos bissextos”, em que o mês de fevereiro corresponde a 29 dias. Posteriormente, as datas foram pré-definidas de acordo com o total de dias de cada mês, para determinação do dia em que cada imagem foi gerada pelo sensor, uma vez que as imagens são obtidas em um intervalo de 16/16 dias, conforme Tabela 2.2.

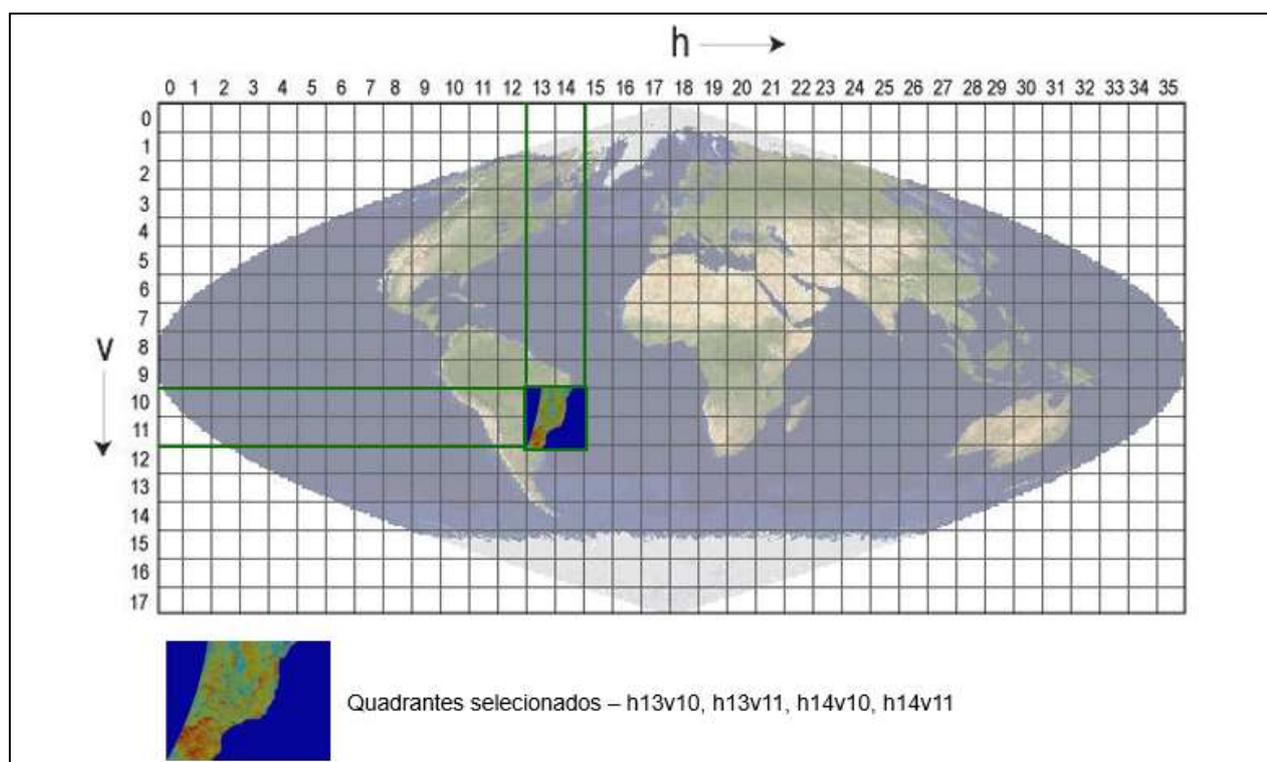


Figura 2.4 – Cenas h13v10, h13v11, h14v10 e h14v11 da área imageada pelo sensor MODIS. Fonte: Adaptada de LPDAAC, 2015.

Tabela 2.2 – Datas utilizadas pelo sensor MODIS das imagens adquiridas para a área de estudo.

Característica do Ano	Ano das imagens adquiridas	Datas específicas das imagens do sensor MODIS (16/16 dias)					
Comuns	2001, 2002, 2003	01/01	17/01	02/02	18/02	06/03	22/03
	2005, 2006, 2007	07/04	23/04	09/05	25/05	10/06	26/06
	2009, 2010, 2011	12/07	28/07	13/08	29/08	14/09	30/09
	2013, 2014, 2015	16/10	01/11	17/11	03/12	19/12	-
Bissextos	2004	01/01	17/01	02/02	18/02	05/03	21/03
	2008	06/04	22/04	08/05	24/05	09/06	25/06
	2012	11/07	27/07	12/08	28/08	13/09	29/09
	2016	15/10	31/10	16/11	02/12	18/12	-

Fonte: A autora.

Esse produto é composto pelas seguintes imagens: imagem NDVI, imagem EVI, imagem de qualidade VI Quality, imagem de confiabilidade Pixel Reliability e as imagens da reflectância que correspondem às bandas necessárias para a geração do NDVI e EVI. O processamento das imagens NDVI e EVI ocorre a partir da composição do máximo valor de pixel no período de 16 dias, ou seja, para a geração dos pixels, são considerados os valores máximos de cada pixel nesse período. A geração das imagens NDVI ocorre a partir das bandas 1 e 2, e das imagens EVI a partir das bandas 1, 2 e 3, referentes à reflectância nas faixas do vermelho, infravermelho próximo e azul, respectivamente (NASA, 2017).

A reprojeção dos dados MODIS foi realizada no software *Modis Reprojection Tools* (MRT), versão 4.1 (NASA, 2011), que é de acesso livre com download disponível no site da NASA. Sendo assim, as imagens foram convertidas para o sistema de coordenadas geográficas, *datum* SIRGAS, 2000, e posteriormente, foram gravadas em formato TIFF (*Tagged Image File Format*).

As imagens correspondentes aos índices de vegetação, de composição máxima dos pixels, possuem quantidade reduzida de nuvens e ruídos atmosféricos, mantendo informações da dinâmica da vegetação. Contudo, foi importante nas etapas de pré-processamento dos dados, eliminar pixels afetados por nuvens (YU et al., 2003).

Nesse sentido, a existência dos pixels espúrios, nas imagens NDVI e EVI, é resultado de ruídos e/ou presença de nuvens e pode induzir a erro ou à má interpretação dos dados gerados, portanto, as imagens de qualidade VI Quality e de confiabilidade Pixel Reliability

são utilizadas para a extração desses pixels. Os valores e significados das imagens de confiabilidade Pixel Reliability variam, e podem ser observados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Valores de confiabilidade para os índices EVI e NDVI obtidos das imagens Pixel Reliability.

Valor do Pixel	Qualidade	Descrição
-1	Ausência de dados	Dados não processados.
0	Dados confiantes	Pode ser usado.
1	Dados marginais	Pode ser usado, mas com verificação de outra informação de qualidade.
2	Neve ou gelo	Alvo coberto de neve ou gelo. Dados substituídos por “0”.
3	Nuvem	Ausência de visibilidade, dados não usados, substituídos por “0”.

Fonte: Adaptado de DIDAN et al., 2015.

Com relação aos valores de qualidade das imagens VI Quality, foram criadas máscaras a partir das combinações dos valores em bits disponibilizados pela NASA, para que assim, os produtos de VI Quality e Pixel Reliability assegurem a qualidade e a consistência dos dados, pois, apesar de os dados NDVI e EVI possuírem o mínimo de nuvens, essas imagens são importantes no sentido de eliminarem os pixels problemáticos, tornando a utilização dos produtos MOD13Q1 confiável.

As imagens NDVI, EVI, Pixel Reliability e VI Quality foram importadas para o software ArcGis 10.2.2, onde inicialmente foi realizado o recorte da área de estudo e extração dos pixels indesejados das imagens de índices de vegetação (Figura 2.5). O recorte das imagens foi realizado tendo como referência o arquivo vetorial em formato *shapefile* da área da BHRD. Esse arquivo foi gerado a partir de um arquivo representativo do limite da bacia obtido do banco de dados do Geobases.

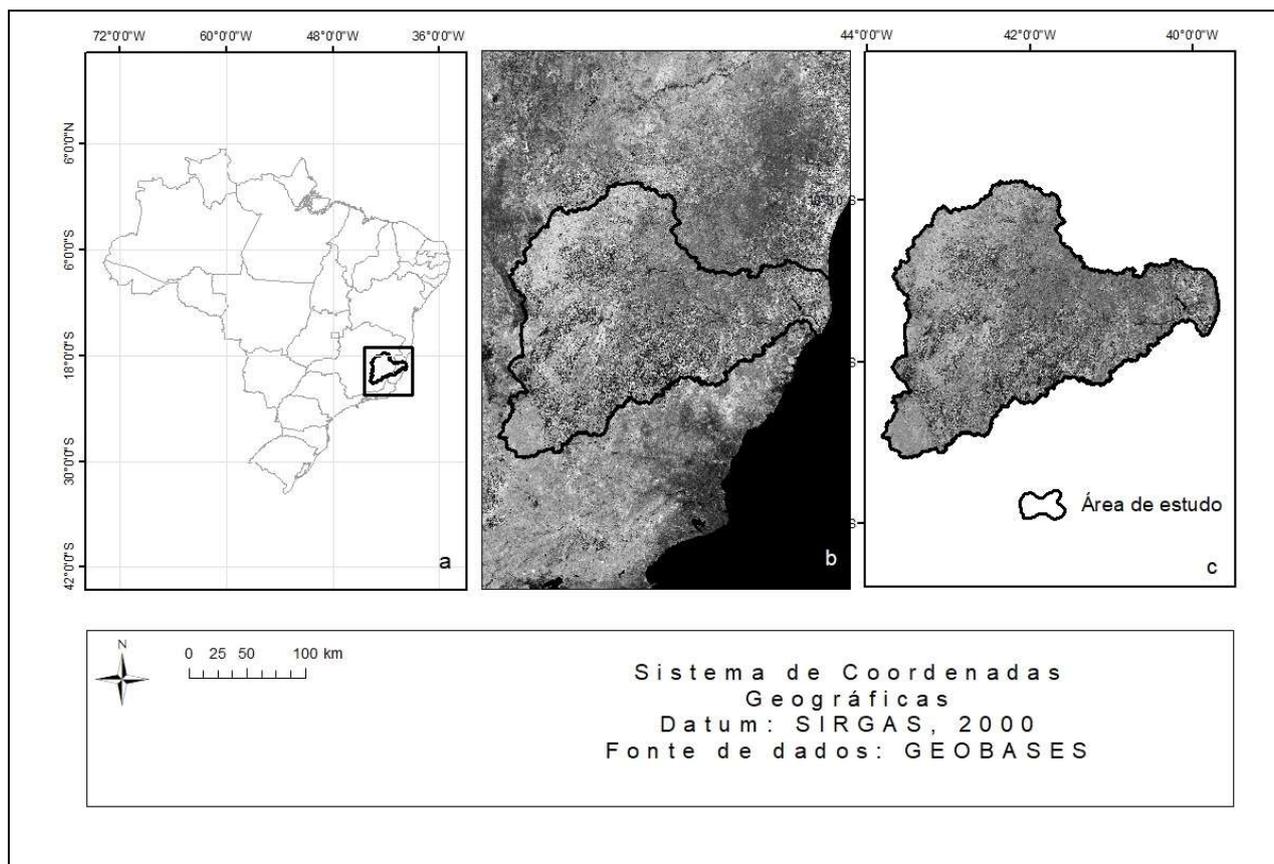


Figura 2.5 – Representação do recorte da área de estudo correspondente à bacia hidrográfica do rio Doce. a. limite da área de estudo a nível de Brasil; b. dados brutos de índice de vegetação com destaque para a BHRD; c. dados de índices de vegetação após extração dos pixels indesejados e recorte da área de estudo.

Fonte: A autora.

As máscaras das imagens de confiabilidade (Pixel Reliability) foram criadas adotando o valor “NoData” para os valores a serem excluídos (-1, 2 e 3) e o valor “0” para os valores confiáveis (0 e 1). Para as imagens de qualidade (VI Quality), foi adotado o valor “0” para os pixels cujos valores estavam dentro do intervalo desejável e o valor “NoData” para os valores a serem excluídos (fora do intervalo desejável). As máscaras resultantes foram somadas às imagens NDVI e EVI para cada data correspondente, e assim houve a extração dos pixels espúrios, que receberam valor “NoData”.

As imagens geradas foram convertidas para o formato *Integrated Multimedia Gateway* (.img) e foram exportadas para o software *TerrSet* (CLARK LABS, 2015), onde foi criado um arquivo de série temporal para cada grupo de imagens NDVI e EVI. Nesse caso, uma série temporal consiste em um par de arquivos, sendo, um arquivo de varredura contendo as imagens da série de tempo e um arquivo de documentação com a descrição das características temporais da série.

O preenchimento dos dados inexistentes, referentes aos pixels espúrios, nas imagens representativas das séries temporais (valores “NoData”), ocorreu utilizando a técnica da interpolação espacial.

Posteriormente, utilizou-se o método de interpolação linear em duas etapas (ZHAO et al., 2005), sendo que na primeira etapa, os pixels ausentes são substituídos por pixels de confiança mais próximos e, na segunda etapa, os pixels de baixa qualidade são substituídos por interpolação linear dos pixels de qualidade mais próximos, antes e depois do pixel a ser substituído. Por fim, utilizou-se o método de interpolação por média temporal ou climatologia, em que os valores faltantes são preenchidos tendo como referência a mediana em longo prazo dos valores das imagens da série temporal.

2.3 TENDÊNCIAS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

A tendência pode ser entendida como aumento ou diminuição gradual nos valores de uma determinada série ao longo do período (ALMEIDA et al., 2008). Nesse contexto, as etapas necessárias ao processamento e à análise das tendências de comportamento dos IVs foram realizadas no módulo *Earth Trends Modeler* (ETM), do software TerrSet. A elaboração do ETM deu-se, especialmente, para a realização das análises de tendências interanuais e características dinâmicas dos fenômenos ambientais a partir de séries temporais determinadas.

Para a análise do comportamento dos índices de vegetação NDVI e EVI durante o período de 2001 a 2016, foram gerados os seus respectivos perfis temporais, sendo comparados para verificação das diferenças existentes entre os dois IVs na observação da dinâmica da vegetação. Para tanto, foi traçada uma linha de tendência linear, para tornar possível a identificação da variação dos valores durante o período estudado.

As análises das tendências de comportamento surgem como alternativa confiável para compreender como ocorrem as mudanças de comportamento interanual da vegetação, a partir dos métodos relacionados.

Foram aplicadas técnicas de tendência linear (JONG e BRUIN, 2012) e tendência monotônica de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), em que cada pixel no espaço é tratado como uma série temporal unidimensional de ciclos de 16 dias. Foram usados modelos paramétricos (regressão linear) e não paramétricos (Mann-Kendall), na investigação de tendências negativas dos índices de vegetação, sendo que este último é

sugerido pela Organização Meteorológica Mundial para avaliação da tendência em séries temporais de dados ambientais (YUE et al., 2002).

Uma série temporal é frequentemente considerada estacionária, ou seja, se desenvolve no tempo aleatoriamente ao redor de uma média constante, refletindo uma realidade de equilíbrio estável (MORETTIN e TOLOI, 2006). Entretanto, a maior parte das séries que encontramos na prática é de alguma forma não estacionária, conhecida como tendência linear, que, na prática, expressa a taxa de variação dos dados para o período entre cada imagem da série.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PERFIS TEMPORAIS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

As médias dos perfis temporais dos índices de vegetação são apresentadas na Figura 2.6 e referem-se aos pixels com valores médios nas imagens, onde é possível observar que a sazonalidade do NDVI e a do EVI mantiveram-se semelhantes durante o período estudado, contudo, observou-se que o NDVI foi superior ao EVI durante todo o período estudado.

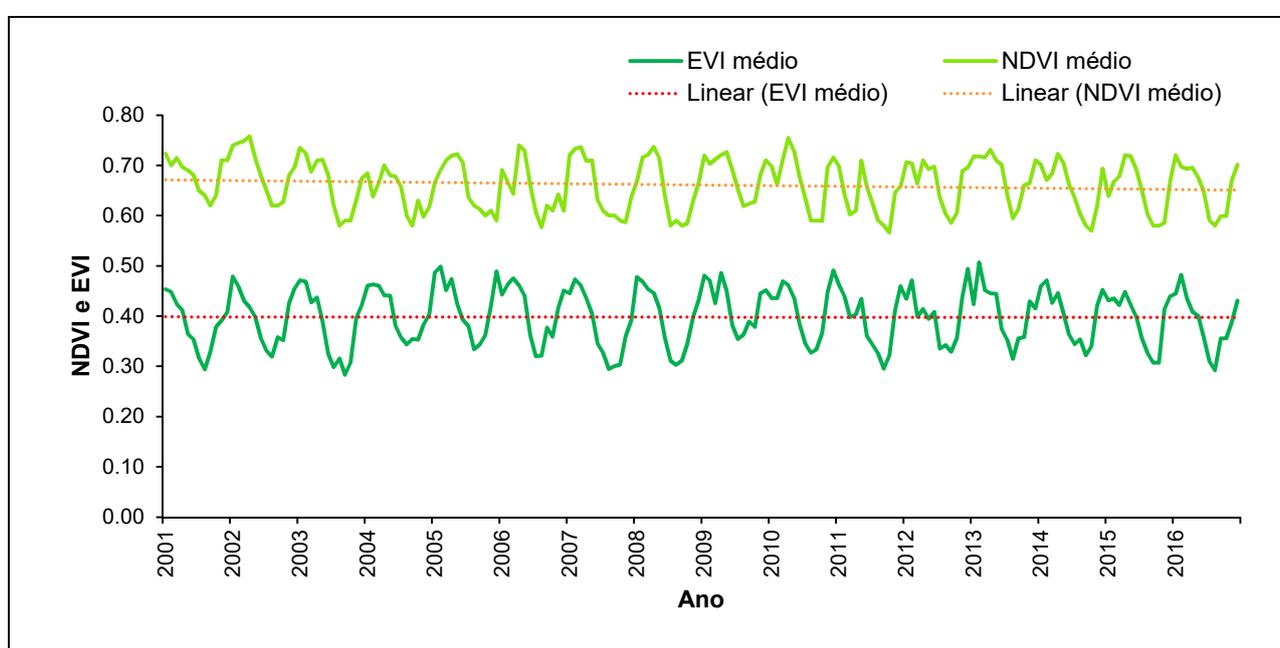


Figura 2.6 – Média dos perfis temporais dos índices de vegetação NDVI e EVI para o período de 2001 a 2016 na bacia hidrográfica do rio Doce.

Fonte: A autora.

Para o EVI, a linha de tendência manteve-se muito próxima à média durante toda a série temporal, já o NDVI apresentou um decréscimo observado pela linha de tendência que apresenta uma pequena diminuição do vigor vegetativo ao longo do tempo. Esse fato explica a diminuição gradual dos valores desse índice.

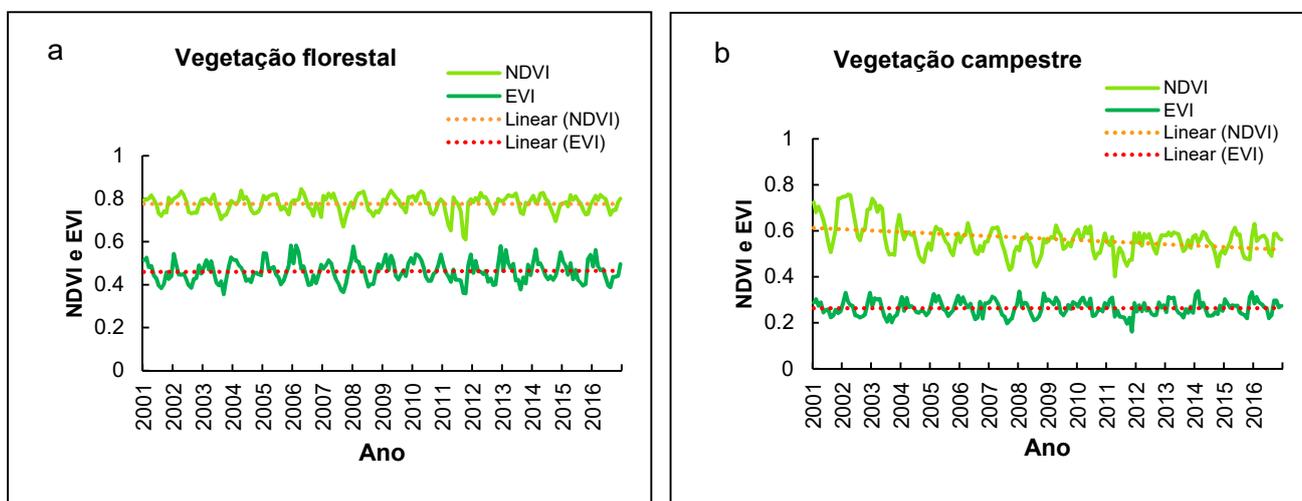
De acordo com os resultados, há existência de um período de aumento e outro de decréscimo nos valores dos índices de vegetação, apresentando uma semelhança de comportamento em todos os anos da série de acordo com as características climáticas da área de estudo, observando, portanto, uma regularidade na série temporal analisada. Contudo, pelo fato do EVI apresentar resposta mais efetiva com relação à estrutura do

dossel como um todo, observa-se uma maior variação dos valores quando comparados com os valores de NDVI.

É possível observar que apesar de os dois índices apresentarem sazonalidades muito semelhantes, o EVI apresenta substancial melhora em grandes áreas na sensibilidade às alterações do dossel em relação ao NDVI, que possui tendência de saturação mais rápida, sendo pouco sensível à detecção de variações no aumento da biomassa vegetal a partir de uma determinada fase de crescimento das plantas (ASRAR et al., 1984, FONSECA et al., 2002). Os dois índices apresentam condições de serem utilizados de forma complementar para estudos da vegetação (HUETE et al., 2002).

Resultados semelhantes foram encontrados por Nora e Martini (2010) ao analisarem a dinâmica espectral de duas fitofisionomias do bioma Mata Atlântica no estado do Rio Grande do Sul, onde observaram que o EVI mostrou-se mais sensível, portanto, mais eficiente na observação das variações anuais da vegetação em relação ao NDVI.

Analisando individualmente (Figura 2.7) o perfil temporal dos índices de vegetação das classes de UCT na BHRD determinadas pelo IBGE (2014) (anexo A), é possível observar que em todas as classes o NDVI permanece superior ao EVI.



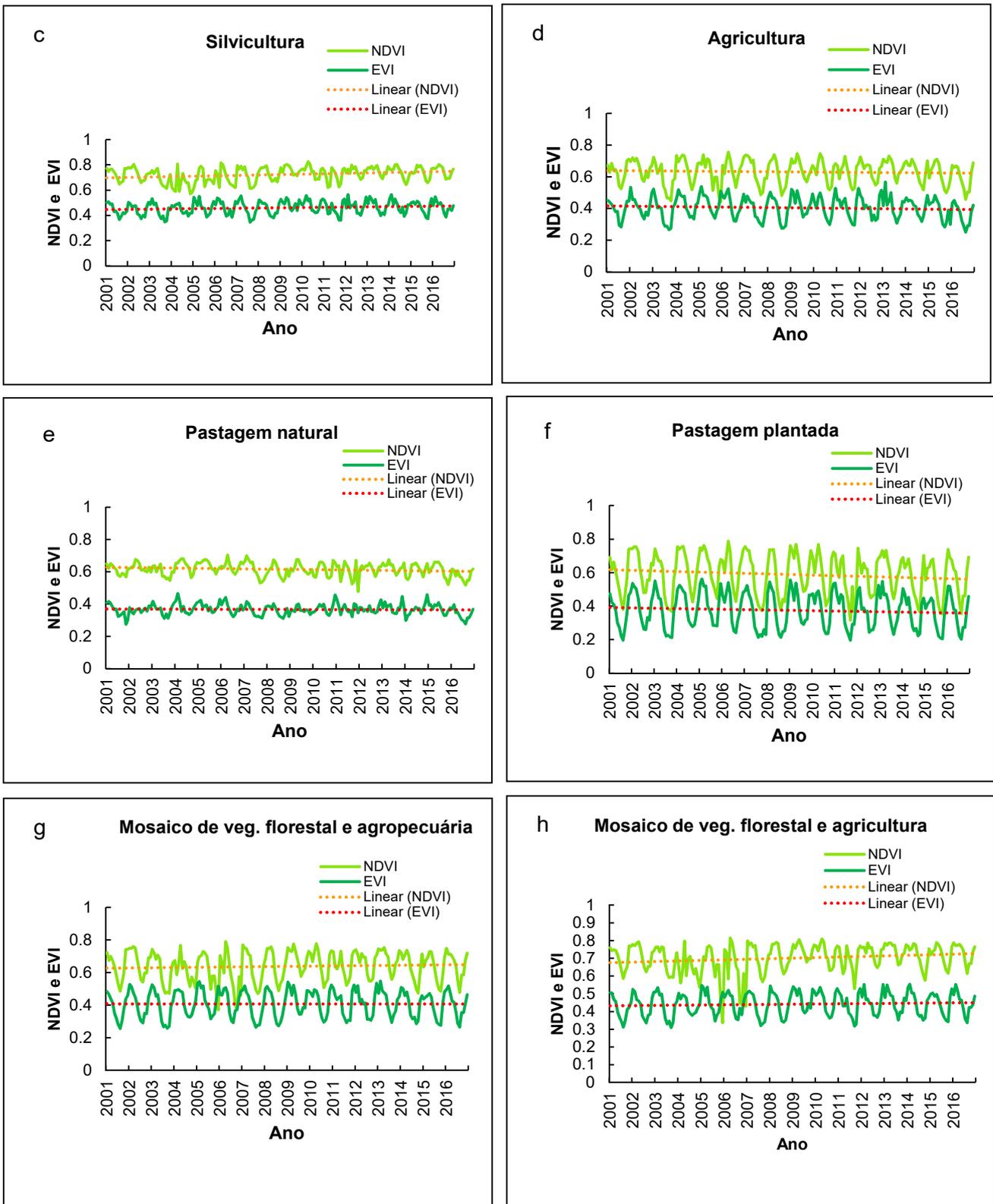


Figura 2.7 – Perfil temporal dos índices de vegetação NDVI e EVI para as classes de uso e cobertura da terra (IBGE, 2014), na bacia hidrográfica do rio Doce durante o período de 2001 a 2016. a. Vegetação florestal; b. Vegetação campestre; c. Silvicultura; d. Agricultura; e. Pastagem natural; f. Pastagem plantada; g. mosaico de vegetação florestal e agropecuária; h. mosaico de vegetação florestal e agricultura.

Os maiores valores dos índices de vegetação estão inseridos nas áreas com presença de florestas (Figura 2.2), atribuídos às classes de UCT; a Figura 2.7a mostra que tanto o NDVI quanto o EVI foram superiores às demais classes, devido à quantidade significativa de biomassa verde nessas áreas, representada pelas Unidades de Conservação na BHRD (Figura 2.3). Na classe “vegetação florestal”, o EVI mostra variações mais acentuadas e apresenta maior sensibilidade às oscilações sazonais da resposta espectral da vegetação em relação ao NDVI, fato justificado pelas alterações nas florestas cuja vegetação apresenta maior quantidade de biomassa verde e espécies com características peculiares e diferentes adaptações fisiológicas e/ou morfológicas em que algumas apresentam deciduidade pronunciada, com queda das folhas no período seco.

A dinâmica sazonal das formações de “vegetação campestre” (Figura 2.7b) é similar àquelas das áreas convertidas para outros usos. Analisando os índices de vegetação das Figuras 2.7c e 2.7d, observa-se que os maiores índices ocorreram para a classe de “silvicultura”, por apresentar maior quantidade de biomassa verde quando comparada à classe “agricultura”. Os valores para essa classe (Figura 2.7d) mostram maior variabilidade do que a classe “vegetação florestal”, em função do ciclo produtivo das culturas. Os índices apresentam altas nos meses de verão e baixas nos meses de inverno, quando a biomassa verde das culturas é reduzida ou ausente.

Os valores dos índices de vegetação apresentados nas Figuras 2.7e e 2.7f mostraram-se semelhantes, observa-se que a classe “pastagem natural” mostra variações menos acentuadas, podendo ser explicadas pela presença de vegetação herbácea, gramínea e pequenos arbustos, caracterizadas pela baixa atividade fotossintética e menor densidade de biomassa verde, portanto, sofrem menos variações em resposta aos diferentes fatores ambientais, especialmente à precipitação, enquanto a classe “pastagem plantada” são áreas cultivadas e monitoradas com sistema de irrigação, respondendo mais rapidamente ao regime de precipitação pluvial, o que reflete na rápida resposta e crescimento mais rápido do NDVI e EVI.

As classes apresentadas nas Figuras 2.7g e 2.7h mostraram comportamentos semelhantes, porém observa-se maior oscilação sazonal de resposta espectral da vegetação na classe “mosaico de vegetação florestal e agropecuária” para os dois IVs, uma vez que esse representa a maior parte da área de estudo.

3.2 TENDÊNCIAS INTERANUAIS

A análise das tendências interanuais para os índices de NDVI e EVI envolveu a observação das tendências linear e monotônica de Mann-Kendall, apresentadas nas Figuras 2.8 e 2.9, respectivamente.

A Figura 2.8 mostra que maiores valores nas tendências constitui menor variação temporal, e conseqüentemente, menores alterações, uma vez que, conforme observado na Figura 2.2, a representatividade da vegetação com o maior índice de biomassa verde dentro da BHRD está associada às classes de florestas da Mata Atlântica (3%) (Figura 2.3), protegidas em UCs, e mosaico de vegetação florestal com agropecuária (66%), ambas representadas pela cor verde no mapa.

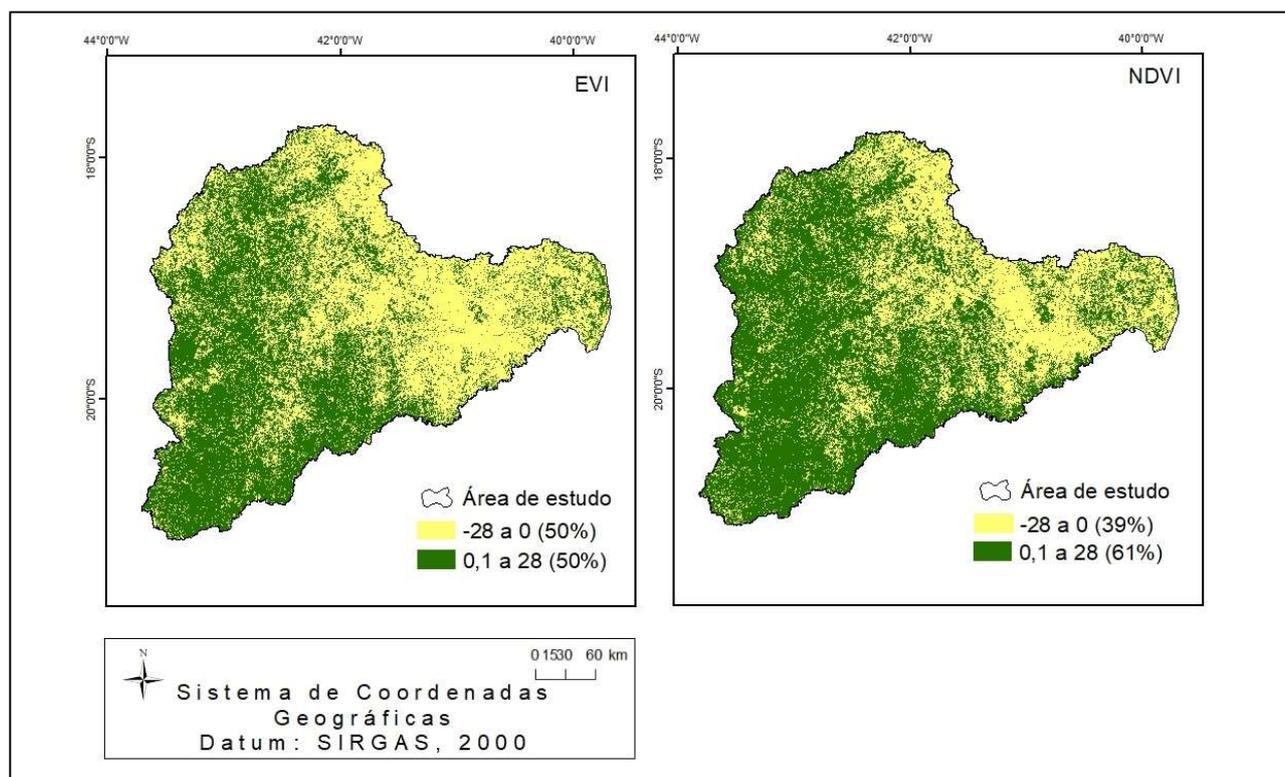


Figura 2.8 – Tendência linear dos índices de vegetação EVI e NDVI para o período de 2001 a 2016. Tendência de decréscimo da vegetação verde (intervalo de valores de - 28 a 0); tendência de aumento da vegetação verde (intervalo de 0,1 a 28).

Fonte: A autora.

Observando a figura que representa a análise da tendência linear, é possível identificar uma ligeira semelhança nos resultados de ambos os índices; contudo, os valores de NDVI foram maiores do que os valores de EVI, representando 61% e 50% da tendência linear positiva, respectivamente. Esse resultado pode ser explicado pela grande representatividade do “mosaico de vegetação florestal com agropecuária” (66%), na BHRD, não apresentando, portanto, característica de vegetação florestal com alto índice de biomassa verde. Isso indica que, nos estudos que analisam séries temporais com alterações em áreas que possuem baixo índice de biomassa verde, o NDVI apresenta melhor resposta quando comparado ao EVI.

Bayma e Sano (2015) analisaram os perfis temporais de NDVI e EVI do sensor MODIS objetivando a detecção de desmatamento do cerrado em três estados em que o bioma é representativo, e concluíram que o desempenho do NDVI foi superior ao EVI considerando o fato de que a redução nos valores de NDVI, durante o evento de desmatamento, foi mais acentuada do que nos valores de EVI.

Wagner et al. (2013) avaliaram a redução do vigor vegetativo da cobertura vegetal do Pampa do Brasil e do Uruguai utilizando dados de tendências em séries temporais de imagens NDVI e EVI e detectaram alterações no padrão da cobertura vegetal, em que o NDVI também apresentou melhor resposta relacionada à tendência positiva.

Para os dois índices, a tendência apresentou um comportamento linear, ou seja, apesar da ligeira diferença no comportamento dos IVs, as alterações ocorreram de forma semelhante em todo o período estudado, portanto esse resultado corrobora com aqueles encontrados a partir da análise dos perfis temporais (Figuras 2.6 e 2.7).

A Figura 2.9 mostra o coeficiente tau de Mann-Kendall (pixel a pixel), ao longo da série temporal para as imagens dos IVs. A tendência monotônica de Mann-Kendall fornece um indicador de tendência (tau) que mede o grau em que uma tendência está aumentando ou diminuindo, variando em um intervalo de -1 a 1, em que os valores positivos indicam tendência de aumento da biomassa verde e valores negativos indicam tendência de decréscimo. Para esse estudo, pode-se inferir que, apesar de possuir áreas em que a série tende a ser decrescente, na maior parte da bacia, a série apresenta um comportamento crescente, representado pela cor verde nos mapas.

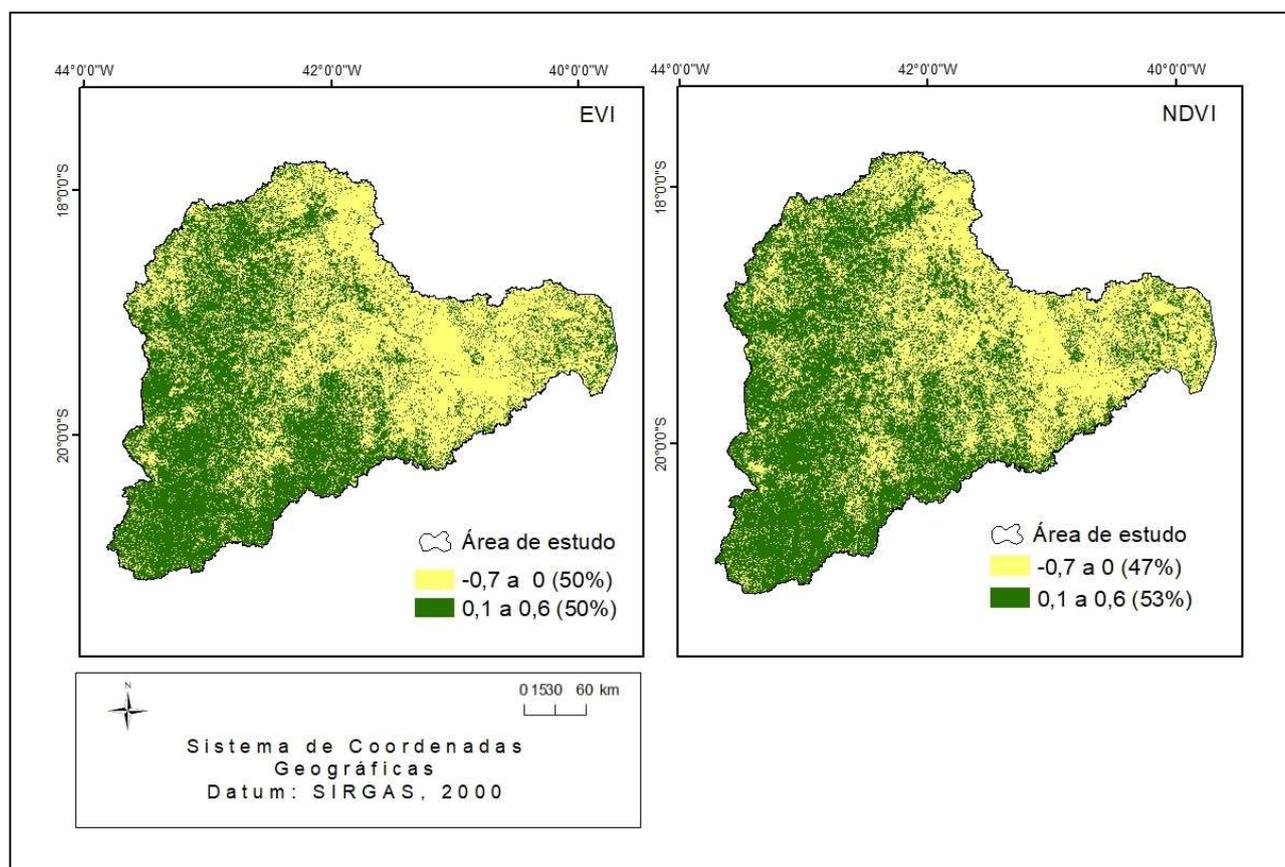


Figura 2.9 – Tendência monotônica de Mann-Kendall dos índices de vegetação EVI e NDVI para o período de 2001 a 2016. Tendência negativa (intervalo de valores de -0,7 a 0); tendência positiva (intervalo de 0,1 a 0,6).

Fonte: A autora.

Aproximadamente 50% da área de estudo apresentou valores positivos para os dois IVs, indicando tendência de aumento do vigor vegetativo, área que está representada pelas UCs na BHRD (3%) e pelo mosaico de vegetação florestal e agropecuária em maior escala. Por outro lado, observou-se que os valores negativos da tendência, tanto para o EVI quanto para o NDVI, foram evidenciados onde há menor quantidade de biomassa verde, abrangendo as áreas com presença de agropecuária, agricultura, pastagem natural e plantada, e aquelas classificadas como “área artificial” (Figura 2.3).

É possível observar que para o NDVI, a tendência positiva apresentou-se equivalente a 53% da área, enquanto o EVI apresentou tendência positiva em 50% da área da bacia. Para ambos os IVs, a tendência positiva ocorreu onde há maior concentração de UCs (cor verde no mapa), revelando um aumento do vigor vegetativo dessas áreas na BHRD.

A representatividade dos mosaicos de vegetação florestal com agropecuária e vegetação florestal com agricultura na BHRD somam 81% (Figura 2.2); esse fato explica a tendência negativa de Mann-Kendall ocorrida exatamente nessas áreas, sendo 50% para

o EVI e 47% para o NDVI, excluindo as áreas ocupadas com maior quantidade de florestas representadas pelas UCs.

A Figura 2.10 mostra as áreas com tendências estatisticamente significativas, de acordo com a significância de Mann-Kendall, apresentadas em duas classes de p -valor, menores do que 0,05 e maiores que 0,05.

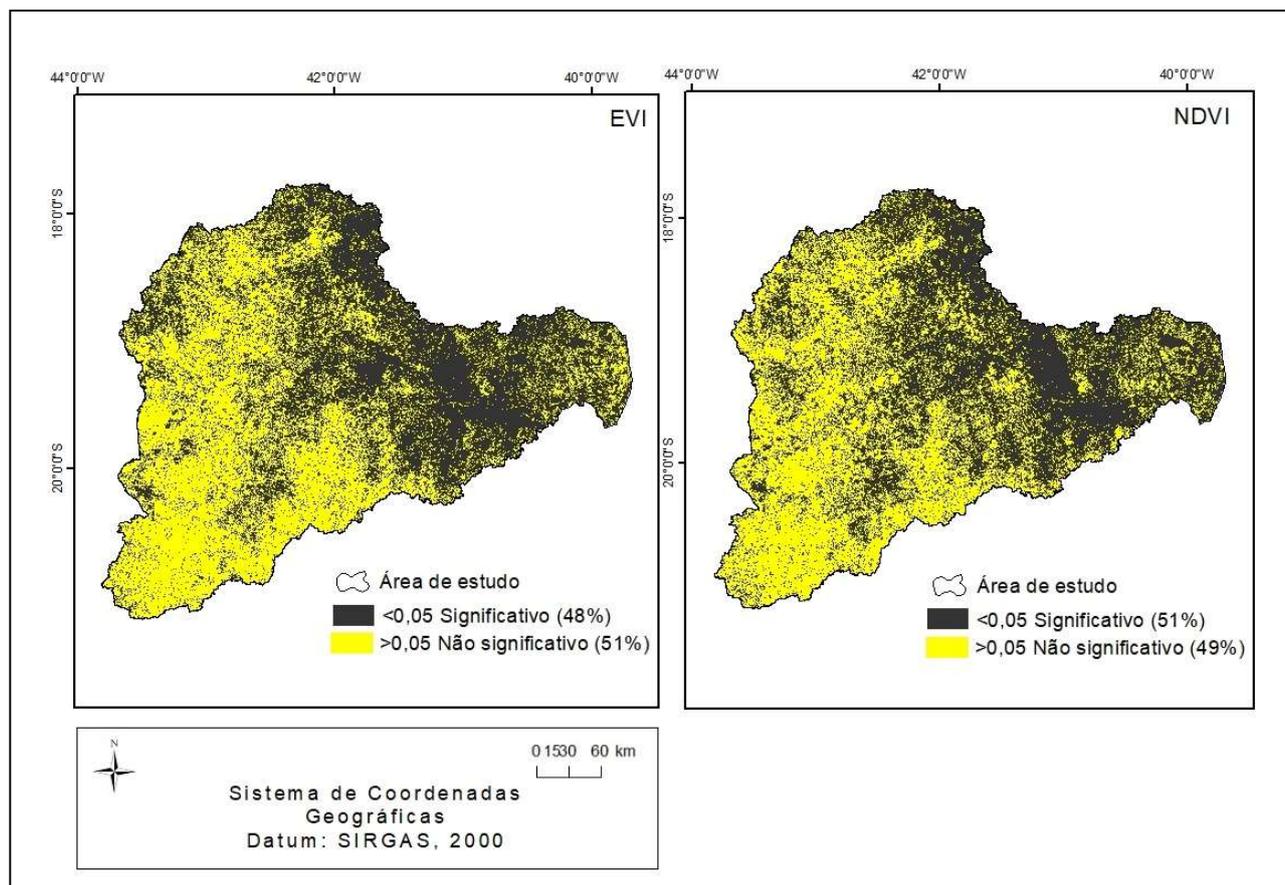


Figura 2.10 – Significância de Mann-Kendall dos perfis temporais dos índices de vegetação EVI e NDVI para o período de 2001 a 2016.
Fonte: A autora.

De acordo com as imagens de significância de Mann-Kendall, as regiões com tendências estatisticamente significativas são mais evidenciadas na série temporal do NDVI, ocupando 51% da extensão dos pixels, em relação ao EVI que representou 49% dos pixels, sendo que esse último, por sua vez, apresentou padrão mais homogêneo na distribuição dos pixels significativos, ficando nítida a concentração dos mesmos nas áreas com presença de florestas.

Analisando as regiões com tendências estatisticamente significativas das imagens de significância de Mann-Kendall (Figura 2.10), observa-se que essas representam as áreas com tendência decrescente de biomassa verde, mostrando-se, portanto, mais evidentes na série temporal do NDVI em relação ao EVI.

Dessa forma, observou-se que para ambos os IVs, as tendências significativas representam as áreas onde há pastagens (natural e plantada) e mosaicos de vegetação florestal com agropecuária e agricultura, em contrapartida, as tendências não significativas compreendem principalmente as áreas com presença dos mosaicos de vegetação florestal e agropecuária próximos às áreas com maior concentração das UCs na bacia.

O EVI apresentou maior tendência positiva e não significativa, revelando que apesar de a maior representação da área ter sido crescente nos valores de EVI, o que representaria um estado crescente na produção de biomassa, esse resultado não foi significativo, ou seja, não é possível afirmar se houve ou não tendência significativa de decréscimo da vegetação verde a partir da resposta do EVI. A não significância da tendência positiva do EVI na BHRD pode ser explicada pelo fato de que 66% da área de estudo é representada pelo “mosaico de vegetação florestal e agropecuária” contra apenas 3% de área com “vegetação florestal”, uma vez que esse índice de vegetação responde de forma mais eficiente em áreas com maior densidade de biomassa verde, representadas por florestas com altos níveis de atividade fotossintética, fato que revela a importância de inferir sobre as áreas que apresentaram tendências positiva e não significativas.

A análise das tendências para o NDVI mostra que a mesma foi positiva e significativa, fato que permite afirmar que não houve uma tendência significativa de decréscimo da vegetação florestal, corroborando os resultados apresentados nas Figuras 2.8, 2.9 e 2.10.

As tendências não significativas concentradas nas áreas de “mosaicos de vegetação florestal e agropecuária” e em menor escala, “vegetação florestal e agricultura”, podem ser explicadas pelo crescimento e perda da biomassa de pastagem e pelo ciclo anual das culturas agrícolas, assim como pela presença de água e/ou outros usos da terra.

Possivelmente, em função disso, essas classes não apresentaram padrão definido de tendência ao longo do período analisado dentro da BHRD.

4 CONCLUSÕES

Para a bacia hidrográfica do rio Doce, durante o período de 2001 a 2016, foi possível concluir que:

- Os índices de vegetação EVI e NDVI do sensor MODIS possibilitam analisar variações temporais da vegetação na BHRD;

- Para análises das tendências temporais da vegetação na bacia hidrográfica do rio Doce, o NDVI apresentou melhor resposta quando comparado ao EVI ao longo do período analisado;

- Entre os anos de 2001 e 2016 não houve tendência significativa de decréscimo da vegetação florestal na bacia hidrográfica do rio Doce;

- O perfil temporal do NDVI apresentou-se menos variável quando comparado com o perfil temporal do EVI;

- A área de estudo apresentou tendências de sazonalidade bem evidentes para as áreas de vegetação florestal e tendências médias anuais nas áreas com presença de mosaicos de vegetação florestal e agropecuária e vegetação florestal e agricultura.

5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. Q. de; SILVA, G. F. da; PEZZOPANE, J. E. M.; RIBEIRO, C. A. D. Enhanced vegetation index (EVI) na análise da dinâmica da vegetação da reserva biológica de Sooretama, ES. **Revista Árvore**, MG, v. 32, n. 6, p.1099-1107, 2008.

ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T; HATFIELD, J. L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, v. 76, n. 2, p. 00-306, 1984.

BAYMA, A. P.; SANO, E. E. Séries temporais de índices de vegetação (NDVI E EVI) do sensor MODIS para detecção de desmatamentos no bioma cerrado. **Boletim de Ciências Geodésicas**, sec. Artigos, Curitiba, v. 21, n. 4, p. 797-813, 2015. Disponível em: file:///D:/Usuario/Downloads/44398-167675-1-PB.pdf. Acesso em: Agosto de 2017.

CLARK LABS. TerrSet – **Geospatial Monitoring and Modeling System**. Clark University, 2015. Disponível em: <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/03/TerrSet18-2_Brochure_WEB.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

DIDAN, K.; MUNOZ, A. B.; SOLANO, R.; HUETE, A. **MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series) Version 3.00**, 2015.

FONSECA, E. L.; ROSA, L. M. G; FONTANA, D. C. Caracterização espectral de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.3, p.365-371, 2002.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Degradação ambiental. In: CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand, Brasil, p. 337-339. 1996.

HUETE, A.; 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**, n.83, p.195-213, 2002.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE). **Mapas temáticos**. 2014. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/tematicos>>. Acesso em: Julho de 2017.

Instituto Nacional da Mata Atlântica (INMA). **Mapa temático – Unidades de Conservação da BHRD**. Comunicação pessoal. 2017.

JONG, R. de; BRUIN, S. de. Linear trends in seasonal vegetation time series and the modifiable temporal unit problem. **Biogeosciences**, v. 9, p. 71-77, 2012.

KENDALL, M. G. **Rank correlation measures**. London: Charles Griffin, 220 p. 1975.

LANA, J. M. de; SOUZA, A. L. de; MEIRA NETO, J. A. A.; SOARES, V. P.; FERNANDES FILHO, E. I. Análise dos estágios de sucessão de áreas de mata atlântica sob a influência de plantações florestais, Vale do rio Doce, Minas Gerais, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 34, n. 4, p. 733-743, 2010.

LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER - LPDAAC. **MODIS**. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/modis_overview>. Acesso em: Abril de 2017.

LEEUWEN, W. J. D. van; HARTFIELD, K.; MIRANDA, M; MEZA, F. J. Trends and ENSO/AAO driven variability in NDVI derived productivity and phenology alongside the Andes Mountains. **Remote Sensing**, v. 5, p. 1177-1203, 2013.

MANN, H.B. Nonparametric test against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245-259, 1945.

MELO, E. T. **Diagnóstico Físico Conservacionista da Microbacia Hidrográfica do Riacho dos Cavalos – Crateús/CE**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Fortaleza, 2008.

MELO, L. C. N.; SALINO, A. Pteridófitas de duas áreas de floresta da Bacia do Rio Doce no Estado de Minas Gerais, Brasil. **Lundiana**, v. 3, n. 2, p. 129-139. Instituto de Ciências Biológicas – UFMG, 2002.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Unidades de Conservação**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/unidades-de-conservacao>>. Acesso em: Julho de 2017.

MORAES, R. A.; Identification and classification of the annual crop stages in the Parana state through the use of MODIS/NDVI temporal profiles. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 6 n. 2, p. 7-16, 2013.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. 2ª ed. São Paulo, 2006.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Land Processes Distributed Active Archive Center**, LP DAAC. 2011. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool>. Acesso em: Abril de 2015.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Sensor MODIS**. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>. Acesso em: Março de 2017.

NORA, E. L. D.; MARTINI, D. Z. Análise da dinâmica sazonal de fitofisionomias do bioma Mata Atlântica com base em índices de vegetação do sensor MODIS/TERRA. **Ambiência**. v. 6, n. 1, p. 97–108, 2010.

PILLAR, V. D. **Dinâmica temporal da vegetação. Relatórios e Manuscritos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Botânica. 1994.

SOUZA, C. G., et al. **Caracterização e manejo integrado de bacias hidrográficas**. Belo Horizonte: EMATER, 124 p. 2002.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

WAGNER, A. P. L.; FONTANA, D. C.; FRAISSE, C.; WEBER, E. J.; HASENACK, H. Tendências temporais de índices de vegetação nos campos do Pampa do Brasil e do Uruguai. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.48, n.9, p.1192-1200, 2013.

WARDLOW, B. D.; EGBERT, S. L. A comparison of MODIS 250-m EVI and NDVI data for crop mapping: a case study for southwest Kansas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 3, p. 805–830, 2010.

YUE, P. S.; Yang, T. C.; Wu, C. K. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. **Journal of Hydrology**, v. 260, p. 161-175, 2002.

YU, F.; PRICE, K. P.; ELLIS, J.; SHI, P. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. **Remote sensing of environment**, v. 87, n. 1, p. 42-54, 2003.

ZHAO, M.; HEINSCH, F. A.; NEMANI, R.; RUNNING, S. W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, p. 164–176. 2005.

CAPÍTULO III: CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E PRECIPITAÇÃO PLUVIAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

FORMIGONI, Mileide de Holanda, Universidade Federal do Espírito Santo, março de 2018. **Correlação entre índices de vegetação e precipitação pluvial na bacia hidrográfica do rio Doce**. Orientador: Alexandre Cândido Xavier. Coorientador: Alexandre Rosa dos Santos.

RESUMO

A análise e o conhecimento da dinâmica da vegetação e dos ecossistemas nos quais ela está inserida são de grande importância para a sua proteção e conservação diante de um cenário de desmatamento e avanços na produção de alimentos. A resposta fenológica da vegetação funciona como indicador das alterações relacionadas ao clima devido a sua sensibilidade às variáveis climáticas. O conhecimento da correlação entre o clima e a vegetação fornece condições de aplicação em diversas questões de interesse científico, envolvendo o monitoramento da vegetação por meio da análise espaço-temporal. A utilização de dados oriundos de sensores orbitais para análise da correlação entre os índices de vegetação dos diferentes tipos de vegetação e as variáveis climáticas contribui no avanço das pesquisas envolvendo as respostas dessa correlação. Objetivou-se analisar as tendências temporais de comportamento da vegetação, utilizando dados NDVI e EVI do sensor MODIS, e sua correlação com a variabilidade dos dados mensais de precipitação pluvial provenientes do satélite TRMM, na bacia hidrográfica do rio Doce para o período de 2001 a 2016. As análises das tendências interanuais das séries temporais de índices de vegetação foram realizadas utilizando as metodologias de correlação linear e análise dos perfis temporais. A tendência sazonal foi avaliada por meio da análise de tendência sazonal, assim como o estudo da correlação entre os dados de precipitação e índices de vegetação que se realizou através da correlação de Pearson e técnicas de modelagem linear, expressas pelo cálculo de "r". Com a geração dos perfis temporais do NDVI e EVI, observou-se correlação positiva entre as variáveis analisadas, evidenciada pela concordância no aumento dos valores dos índices de vegetação em resposta aos maiores incrementos nos índices de precipitação pluvial; porém, para o NDVI e a precipitação, essa resposta apresentou-se menos acentuada. A partir da análise de tendência sazonal foi possível identificar dois ciclos sazonais na área de estudo, sendo um ciclo anual e um ciclo semi-anual. Quanto à correlação dos índices de vegetação com a precipitação, foram encontrados valores significativos de correlação de 0,58 e 0,29 para o EVI e NDVI, respectivamente. No entanto, em algumas áreas da bacia, esses valores foram baixos, evidenciando a influência de outros fatores nas alterações de comportamento da dinâmica da vegetação no período analisado.

Palavras-chave: sensor MODIS. Satélite TRMM. Tendência sazonal. Perfil temporal.

FORMIGONI, Mileide de Holanda, Federal University of Espírito Santo, march de 2018. **Correlation between vegetation indices and rainfall in the hydrographic basin of the river Doce**. Advisor: Alexandre Cândido Xavier. Coadvisor: Alexandre Rosa dos Santos.

ABSTRACT

The analysis and knowledge of the dynamics of the vegetation and the ecosystems in which it is inserted is of great importance for its protection and conservation in the face of a scenario of deforestation and advances in food production. The phenological response of the vegetation acts as an indicator of climate-related changes due to its sensitivity to climatic variables. The knowledge of the correlation between climate and vegetation provides conditions of application in several issues of scientific interest, involving vegetation monitoring through spatio-temporal analysis. The use of data from orbital sensors to analyze the correlation between the vegetation indices of the different types of vegetation and the climatic variables contributes to the progress of the researches involving the answers of this correlation. The objective was to analyze the temporal trends of vegetation behavior, using MODIS NDVI and EVI data, and its correlation with the variability of the monthly rainfall data from the TRMM satellite, in the hydrographic basin of the river Doce for the period from 2001 to 2016. The analyzes of the interannual trends of the time series of vegetation indices were carried out using the methodologies of linear correlation and analysis of the temporal profiles. The seasonal trend was evaluated through the seasonal trend analysis, as well as the study of the correlation between precipitation data and vegetation indexes that were performed through Pearson's correlation and linear modeling techniques, expressed by the calculation of "r" . With the generation of the NDVI and EVI temporal profiles, a positive correlation was observed between the analyzed variables, evidenced by the agreement in the increase of the values of the vegetation indices in response to the greater increases in rainfall indices, but for NDVI and precipitation, this response was less pronounced. From the seasonal trend analysis it was possible to identify two seasonal cycles in the study area, being an annual cycle and a semi-annual cycle. Regarding the correlation of vegetation indexes with precipitation, significant correlation values of 0.58 and 0.29 were found for EVI and NDVI, respectively. However, in some areas of the basin, these values were low, evidencing the influence of other factors on the changes in vegetation dynamics behavior in the analyzed period.

Key Words: MODIS sensor. TRMM satellite. Seasonal trend. Temporal profile.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre a dinâmica da vegetação e dos ecossistemas nos quais ela está inserida assume grande importância para a sua proteção e conservação ante a um cenário de desmatamento e constantes avanços na produção de alimentos.

A vegetação assume um importante papel em resposta às condições ambientais em que está inserida, uma vez que o entendimento da dinâmica espaço-temporal dos seus padrões permite acompanhar a resposta das espécies durante eventos com intensas alterações no clima ou aqueles relacionados ao cotidiano das estações anuais (CALEGARI et al., 2010).

As variações climáticas, sobretudo as que estão relacionadas às alterações no balanço hídrico ou às variações de temperatura fora dos padrões normais, podem causar grandes modificações não apenas nos limites dos biomas, mas também na distribuição e sobrevivência das espécies neles inseridas (CORDEIRO et al., 2008). Portanto, é possível utilizar a resposta fenológica da vegetação como indicador das alterações relacionadas ao clima devido a sensibilidade da vegetação às variáveis climáticas (MENZEL e FABIAN, 1999; WHITE et al., 2009).

A análise espacial e temporal da cobertura vegetal de determinada região é diretamente influenciada pelos diversos fatores ambientais, incluindo informações sobre o solo e a topografia (JACÓBSEN et al., 2004). Assim, o conhecimento da correlação entre o clima e a vegetação fornece condições de aplicação em diversas questões de interesse prático e científico, envolvendo, principalmente, a identificação e a caracterização de sistemas vegetais, modelagem climática, aumento da produtividade agrícola, entre outras (GURGEL, 2003).

Turner et al. (2007) consideram adequado o monitoramento da vegetação através da análise espaço-temporal, sobretudo quando objetiva-se diferenciar entre as mudanças reais e variações interanuais da fenologia causadas por fatores externos como as mudanças nas condições climáticas, por exemplo.

O advento dos sensores orbitais permitiu obter dados de Índices de Vegetação (IVs) como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), relacionados aos parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa e índice de área foliar (WAGNER, 2013), assim como a obtenção de dados de precipitação, favorecendo o entendimento da dinâmica da vegetação associada aos fatores climáticos, principalmente em áreas extensas, como é o caso de grandes bacias hidrográficas, em que

o acesso a esses dados de forma considerada convencional, utilizando estações meteorológicas, torna-se oneroso, demorado e muitas vezes inviável.

O estudo e a análise da correlação entre os IVs e as variáveis climáticas, utilizando dados de sensores orbitais, contribuem no avanço das pesquisas envolvendo as relações estabelecidas entre a vegetação e a precipitação. Determinados trabalhos têm mostrado a existência dessa correlação (HELLDÉN e EKLUNDH, 1988; WANG et al., 2003; YUAN et al. 2007), favorecendo o entendimento da dinâmica sazonal da vegetação e sua relação com o clima.

A utilização dos dados com alta resolução temporal e espectral, e moderada resolução espacial do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para análises de médio prazo é especialmente adequada (HUETE et al., 2002; ZHANG et al., 2006). Diversos estudos têm analisado as tendências do NDVI e do EVI para diferentes objetivos, desde mudanças de Uso e Cobertura da Terra (UCT) a mudanças fenológicas (LEEUWEN et al., 2006). Uma abordagem frequente é estabelecer análises através do teste de tendência monotônica de Mann-Kendall e de tendência sazonal, calculadas em períodos anuais ou sazonais (EASTMAN et al., 2009; JONG e BRUIN, 2012; MISHRA e CHAUDHURI, 2015).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi analisar as tendências temporais de comportamento dos diferentes tipos de vegetação, utilizando dados dos IVs do sensor MODIS, e sua correlação com a variabilidade dos dados mensais de precipitação pluvial oriundos do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), para o período de 2001 a 2016.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As etapas metodológicas deste capítulo estão apresentadas, resumidamente, no fluxograma apresentado na Figura 3.1 e descritas detalhadamente, no decorrer desta sessão.

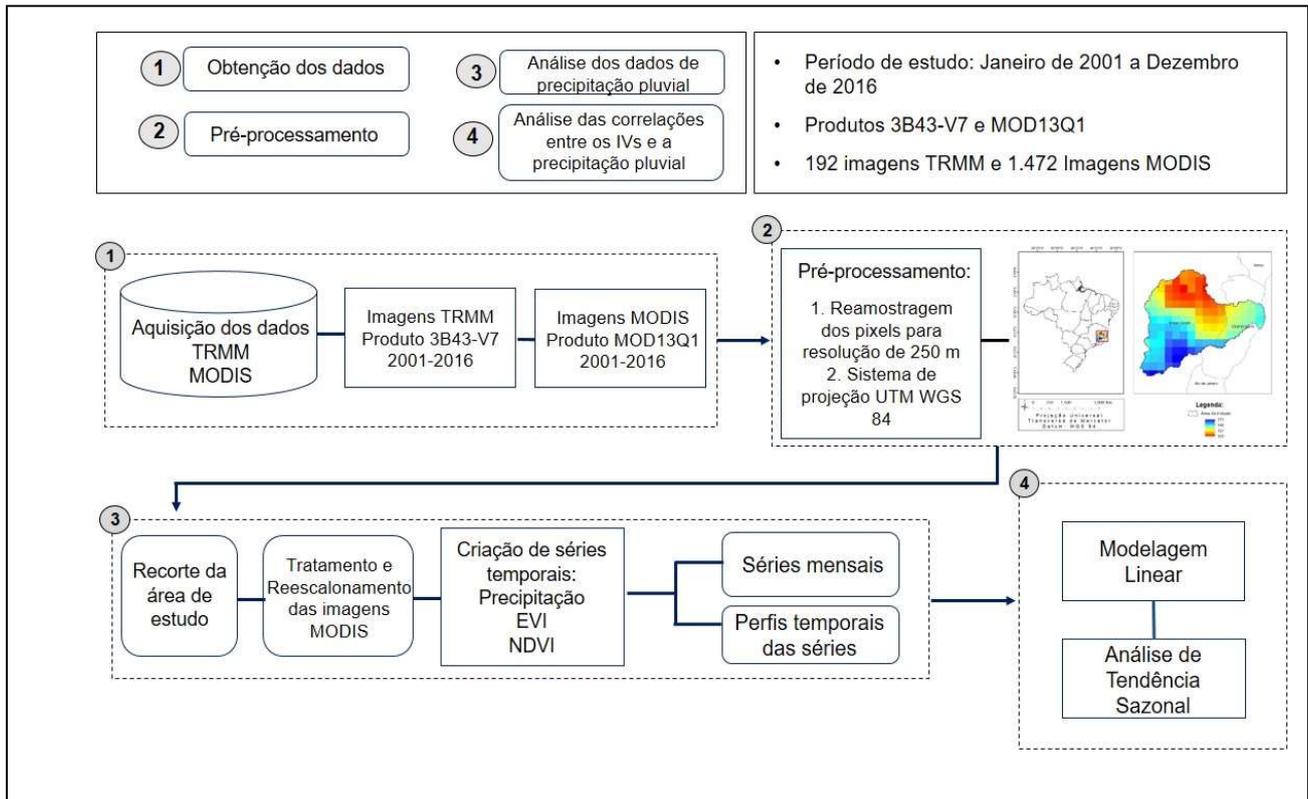


Figura 3.1 – Fluxograma contendo as etapas da pesquisa.
Fonte: A autora.

2.1 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

O desenvolvimento desse trabalho foi organizado em diferentes etapas no intuito de apresentar os resultados das análises em atendimento ao objetivo proposto.

2.1.1 Imagens MODIS

Para a utilização dos dados MODIS correspondentes aos índices de vegetação NDVI e EVI, tendo como área de estudo a BHRD, foram utilizadas quatro cenas (h13v10, h13v11, h14v10, h14v11) para todas as datas correspondentes ao período entre janeiro

de 2001 e dezembro de 2016, totalizando em 1.472 imagens (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Quantidade das imagens MODIS para cada *tile* representativo da área de estudo no período analisado.

	Anos das imagens adquiridas	Número de imagens para cada <i>Tile</i>				
		H13V10	H13V11	H14V10	H14V11	
Anos comuns	2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014, 2015.	276	276	276	276	
Anos bissextos	2004, 2008, 2012, 2016	92	92	92	92	
Total imagens	2001 a 2016	368	368	368	368	1.472 imagens

Fonte: A autora.

O produto MOD13Q1 é composto por imagens NDVI, EVI, qualidade VI Quality, confiabilidade Pixel Reliability e as imagens da reflectância que correspondem às bandas necessárias para a geração do NDVI e EVI. As imagens correspondentes aos índices de vegetação, de composição máxima dos pixels, possuem quantidade reduzida de nuvens e ruídos atmosféricos, mantendo informações da dinâmica da vegetação. Contudo, foi importante nas etapas de pré-processamento dos dados, eliminar os pixels afetados por nuvens (YU et al., 2003).

Todas as imagens do sensor MODIS foram convertidas para o sistema de coordenadas geográficas, *datum* SIRGAS, 2000 e gravadas em formato TIFF (*Tagged Image File Format*) por meio do uso do programa MRT (*MODIS Reprojection Tool*). Após a etapa de processamento no MRT, utilizou-se o software ArcGis 10.2.2, em que as imagens NDVI e EVI, originalmente com valores digitais no intervalo de -10.000 a 10.000, foram reescaladas para o intervalo de -1 a 1, por meio da divisão pelo seu fator de escala (10.000).

Após essa etapa, efetuou-se o recorte correspondente à área de estudo em todas as imagens das séries temporais, utilizando como referência o arquivo vetorial em formato

shapefile, representativo da área da BHRD, que foi gerado a partir de um arquivo do limite da BHRD obtido do banco de dados do Geobases.

As imagens foram importadas, em formato *Integrated Multimedia Gateway (.img)*, para o software TerrSet (CLARK LABS, 2015), onde foi criado um arquivo de série temporal para cada grupo das imagens, NDVI e EVI, em que cada série consiste em um par de arquivos, sendo um arquivo de varredura contendo as imagens da série de tempo (formato *.rgf*) e um arquivo de documentação que descreve as características temporais da série (formato *.tsf*).

Para o preenchimento dos dados faltantes, referentes aos pixels espúrios, nas imagens representativas das séries temporais (valores “NoData”), realizou-se a interpolação espacial, na qual os valores dos pixels são preenchidos de acordo com os valores médios dos pixels vizinhos, em janelas 3 x 3. Esse método preenche o valor do pixel quando a maioria dos seus vizinhos possui um valor válido (CLARK LABS, 2015).

Posteriormente, utilizou-se o método de interpolação linear em duas etapas (ZHAO et al., 2005), sendo que na primeira etapa, os pixels ausentes são substituídos por pixels de confiança mais próximos e, na segunda etapa, os pixels de baixa qualidade são substituídos por interpolação linear dos pixels de qualidade mais próximos, antes e depois do pixel a ser substituído. Por fim, utilizou-se o método de interpolação por média temporal ou climatologia (CLARK LABS, 2015), em que os valores faltantes são preenchidos tendo como referência a mediana em longo prazo dos valores das imagens da série temporal.

2.1.2 Imagens TRMM

A aquisição dos dados do acumulado da precipitação pluvial deu-se a partir do satélite TRMM, produto 3B43-V7, que consiste em dados de precipitação mensal, gerados por um algoritmo que estima a precipitação global combinando estimativas de múltiplos sensores orbitais passivos e ativos (HUFFMAN et al., 2007). As imagens disponibilizadas pelo TRMM compreendem faixas de intervalo de latitude 50° Norte e 50° Sul e longitude 180° Oeste e 180° Leste.

Os dados foram obtidos em formato *.NetCDF*, na plataforma mirador, no site da NASA, gratuitamente, através do endereço eletrônico: <<http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/>> tendo início em 1998.

A partir do objetivo de correlacionar esses dados aos índices de vegetação, foram realizados os downloads das imagens correspondentes à BHRD, entre as latitudes 17°45'S e 21°15'S e longitudes 39°55'W e 43°45'W, no período compreendido entre 2001 e 2016.

Os dados obtidos referem-se ao acumulado de precipitação pluvial (mm/h^{-1}), e foram adquiridos para uma frequência mensal, referentes aos índices máximos e mínimos. Para todos os valores de precipitação, houve a necessidade de calcular o índice precipitável mensal, de acordo com a quantidade de horas em cada mês de referência e posterior cálculo da média a partir dos valores máximos e mínimos, totalizando 192 imagens da precipitação pluvial na BHRD. A equação 1 foi formulada para facilitar o entendimento do método de cálculo dos índices mensais de precipitação oriundos do TRMM.

$$\bar{P} = \frac{(P_{Ma} \cdot DM \cdot 24h) + (P_{Mi} \cdot DM \cdot 24h)}{n}$$

em que \bar{P} designa a média aritmética comum da precipitação mensal; P_{Ma} e P_{Mi} referem-se, respectivamente, aos índices máximos e mínimos mensais da precipitação adquiridos em mm/h^{-1} ; DM é o total de dias de cada mês; n (2) número de variáveis.

A Figura 3.2 é apresentada para ilustração da distribuição dos dados de precipitação na BHRD durante os 12 meses do ano de 2004.

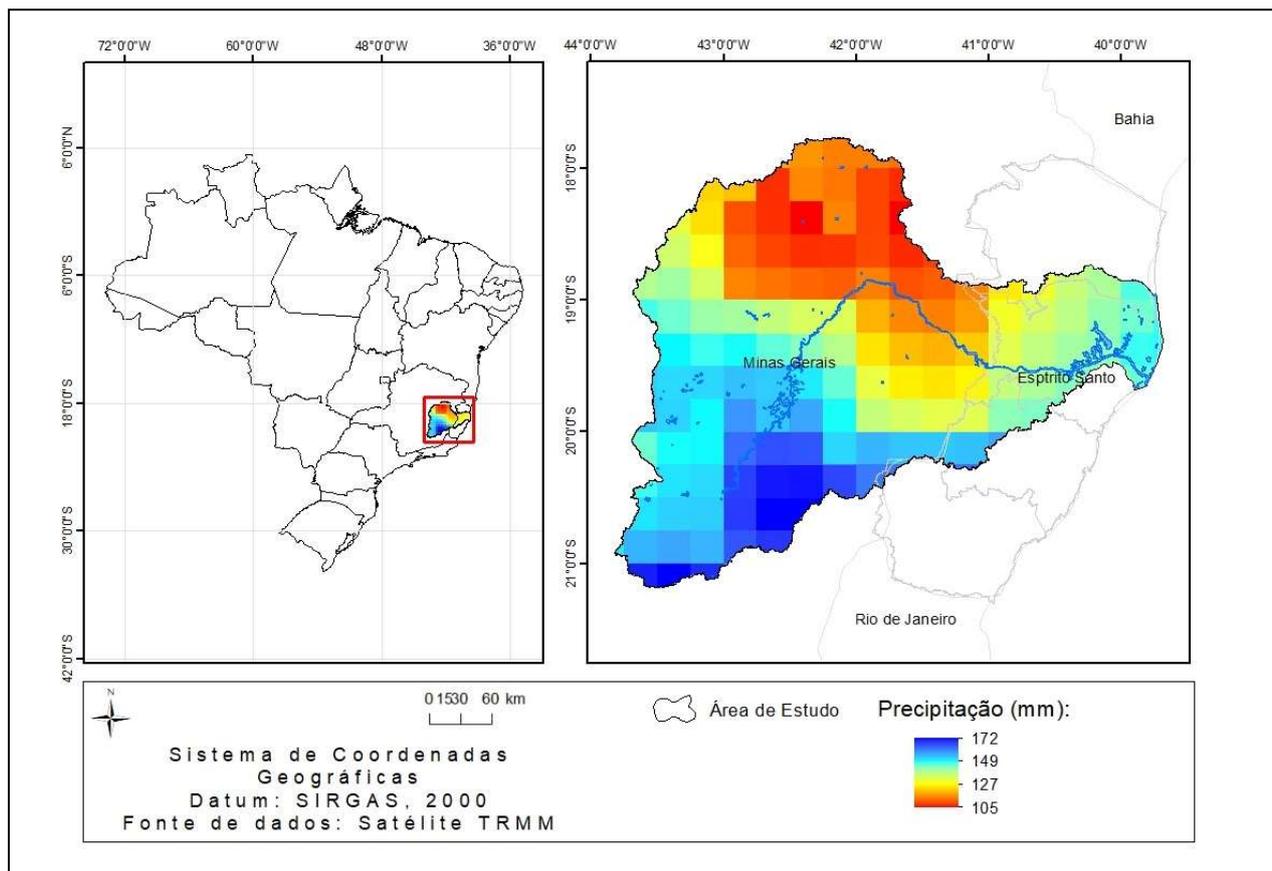


Figura 3.2 – Representação das imagens obtidas pelo satélite TRMM, produto 3B43-V7, com destaque para o índice médio de precipitação mensal (mm), para o ano de 2004 na bacia do rio Doce.

Fonte: A autora.

De acordo com a NASA (2015), o algoritmo 3B43 tem como objetivo estimar a melhor taxa de precipitação em um mês, em concordância com um erro quadrado médio. Essas estimativas possuem uma resolução espacial em grade de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, sendo resultado da combinação de dois produtos, a estimativa a cada três horas do algoritmo 3B42-V7 e a precipitação observada por pluviômetros do projeto GPCC (*Global Precipitation Climatology Centre*) e CAMS (*Climate Assessment and Monitoring System*) em escala mensal.

A taxa de precipitação média mensal é descrita em mm.h^{-1} e a obtenção da precipitação acumulada mensal é representada em mm, portanto, é necessário efetuar a multiplicação do valor disponibilizado para cada data cujos dados foram adquiridos, pelo número de horas mensais.

Após download e pré-processamento dos dados, os mesmos foram importados para o *software* ArcGis 10.2.2, onde foi realizada a reamostragem dos pixels, para converter a resolução espacial para 250×250 m (resolução do sensor MODIS). As imagens foram

reprojetadas para o sistema de referência SIRGAS, 2000 e recortadas a partir do arquivo vetorial em formato *shapefile* representativo da área de estudo (Figura 1.2).

As imagens foram então exportadas em formato *.img* para o software TerrSet, onde foi elaborado o arquivo de série temporal.

2.2 CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E PRECIPITAÇÃO PLUVIAL

A correlação dos IVs com os dados de precipitação pluvial foi analisada por meio da utilização das séries mensais do NDVI e EVI e a geração da série temporal dos dados de precipitação pluvial. Essa etapa foi realizada no painel de geração e edição de séries, dentro do módulo ETM do *software* TerrSet, que foi elaborado especialmente para análise de tendências e características das dinâmicas dos fenômenos ambientais, com base em séries temporais.

As imagens dos perfis temporais de NDVI e EVI foram correlacionadas com os dados de precipitação pluvial para analisar a relação existente entre eles. Esse resultado foi mostrado na forma de mapas e gráficos expressando o coeficiente de correlação linear de Pearson (r) (equação 2). A série correspondente a cada índice de vegetação foi considerada como a série dependente e a série temporal correspondente à precipitação foi considerada como série independente. Nesse sentido, a análise da correlação de Pearson entre os valores médios de NDVI e EVI de cada imagem da série temporal com dados de precipitação foi realizada a fim de estimar a intensidade da variação no desenvolvimento da vegetação a partir da variação da precipitação.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X, Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}} \quad (2)$$

em que, r designa a Correlação de Pearson; x_1, x_2, \dots, x_n e y_1, y_2, \dots, y_n são os valores medidos de ambas as variáveis; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ e $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ refere-se às médias aritméticas das variáveis.

De posse dos coeficientes de correlação de Pearson, os resultados foram validados para os níveis de significância a 1% de probabilidade para identificação do índice de vegetação que apresentou melhor relação com a precipitação.

2.2.1 Modelagem linear

As correlações entre os IVs NDVI e EVI e a precipitação pluvial foram processadas utilizando a ferramenta de modelagem linear, no módulo ETM no TerrSet. Essa metodologia utiliza uma regressão múltipla, sendo os resultados mostrados em forma de mapas que expressam os coeficientes de correlação (r).

Na determinação das séries dentro do ETM, a série correspondente aos IVs foi considerada como a série dependente, e a série temporal correspondente à precipitação pluvial foi considerada como série independente. Com o objetivo de avaliar qual período de tempo a vegetação responde aos efeitos da variação da precipitação, aplicou-se uma defasagem temporal, assim os dados de precipitação foram organizados em quatro níveis de defasagem, sendo 0, 30, 60, 90 dias (Tabela 3.2); na prática, isso indica qual é o melhor tempo de resposta da vegetação com relação à ocorrência da precipitação.

Tabela 3.2 – Resposta dos índices de vegetação aos índices de precipitação pluvial em diferentes níveis de defasagem.

Dias de defasagem	Resposta da vegetação
0	Valor de NDVI e EVI no dia de ocorrência da precipitação.
30	Valor de NDVI e EVI em resposta à precipitação ocorrida 30 dias antes.
60	Valor de NDVI e EVI em resposta à precipitação ocorrida 60 dias antes.
90	Valor de NDVI e EVI em resposta à precipitação ocorrida 90 dias antes.

Fonte: A autora.

2.2.2 Análise de Tendência Sazonal

A Análise de Tendência Sazonal (STA – *Seasonal Trend Analysis*) foi realizada a fim de compreender em que momento as mudanças nos valores dos índices de vegetação estão ocorrendo durante os anos, e assim obter a distribuição espacial dos ciclos da vegetação.

A técnica de STA, implementada no módulo ETM, considera a utilização de dois harmônicos no intuito de reduzir e evitar a influência de ruídos, normalmente associados aos harmônicos de ordem superior (EASTMAN et al., 2009).

A STA usa dois estágios no tempo e uma etapa final de visualização (Tabela 3.3), sendo que no primeiro estágio, foi aplicada uma regressão harmônica em cada pixel no tempo e em cada ano nas séries temporais, de forma a extrair a média anual (amplitude 0), o ciclo anual (amplitude 1 e fase 1) e o ciclo semi-anual (amplitude 2 e fase 2), conforme a equação 3.

$$y = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{n=2} \alpha_n \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + \varphi_n \quad (3)$$

em que, y é a variável resultante da soma dos harmônicos; α_0 é o termo constante de amplitude; α_n referem-se às amplitudes; n representam os ângulos de fase variando de 0 a 359°; φ_n é um harmônico (um multiplicador inteiro); t é o tempo; e T é o comprimento temporal das séries.

No segundo estágio, as tendências foram analisadas nos cinco parâmetros (Tabela 3.3) através de procedimentos não-paramétricos, utilizando o operador de declividade da mediana de Theil-Sen. A mediana de todas as declividades foi usada para caracterizar a tendência, resultando finalmente, em cinco mapas de tendência, em cada um dos parâmetros que foram elaborados em uma correlação de composições coloridas, RGB (*Red, Green, Blue*), para facilitar a interpretação interativa entre as fases e as amplitudes.

Tabela 3.3 – Representação das etapas envolvidas na análise de tendência sazonal (STA).

Primeiro Estágio – regressão harmônica em cada pixel		Mediana de Theil-Sen – caracterização da Tendência	Segundo Estágio – Composições coloridas (RGB)	
Amplitude 0 (A0)	Média anual		Primeira composição	
			A0	Vermelho
Amplitude 1 (A1)	Ciclo anual		A1	Verde
			A2	Azul
Amplitude 2 (A2)	Ciclo Semianual		Segunda composição	
		A0	Vermelho	
Fase 1 (F1)	Ciclo anual	F1	Verde	
Fase 2 (F2)	Ciclo Semianual	F2	Azul	

Fonte: A autora.

Como resultados desta análise foram geradas duas imagens, em que uma representa as fases e outra as amplitudes, sendo que o valor RGB é atribuído às amplitudes (0 à 2) e às fases (1 e 2) de acordo com as combinações das tendências. A cor predominante permaneceu associada ao(s) parâmetro(s) com maior intensidade positiva do seu coeficiente de declividade da tendência mediana, e assim as cores permitiram encontrar áreas com tendências similares com relação à sazonalidade.

A utilização da máscara da área de estudo permitiu extrair curvas sazonais derivadas das tendências, que representam o começo e o fim de cada série de índice de vegetação.

Após essa etapa, a variação da média anual dos valores de NDVI e EVI foi comparada e relacionada com os dados da precipitação pluvial no período de 2001 a 2016.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PERFIS TEMPORAIS

3.1.1 Índices de vegetação

Conforme apresentado no Capítulo II, o perfil temporal dos IVs analisados no período de 2001 a 2016 para a BHRD apresentou comportamentos característicos para cada índice de vegetação, sendo possível observar que os maiores valores, tanto para o NDVI quanto para o EVI, ocorreram nos meses de outubro a abril (Figura 3.3), apresentando perfil semelhante com o regime de precipitação na área de estudo.

Os menores valores médios de NDVI e EVI foram observados nos meses de maio a outubro, sendo que os menores valores para ambos os índices ocorreram no mês de agosto, sendo 0,58 para o NDVI e 0,32 para o EVI.

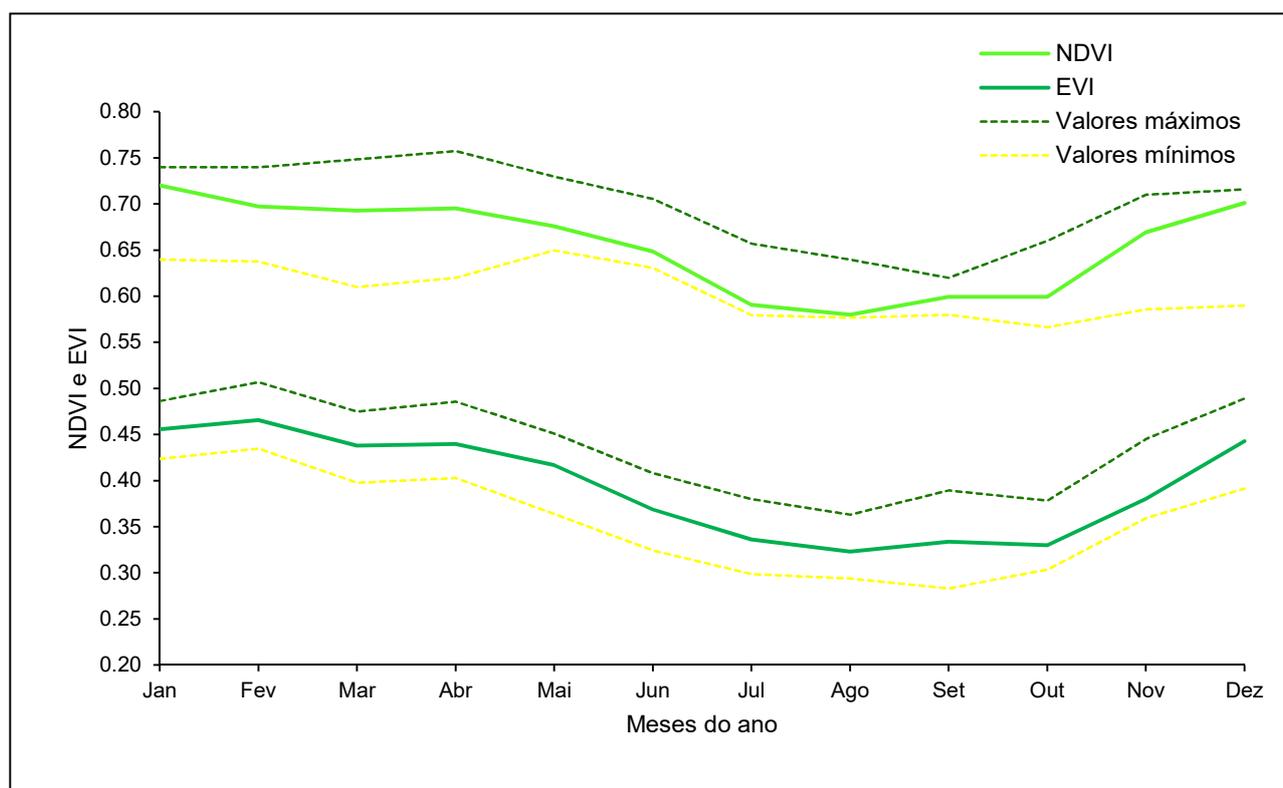


Figura 3.3 – Coeficiente médio mensal de NDVI e EVI no período de 2001 a 2016 na bacia hidrográfica do rio Doce.

Fonte: A autora.

3.1.2 Precipitação pluvial

A variabilidade anual da precipitação pluvial na BHRD estimada pelo TRMM é apresentada na Figura 3.4, em que é possível observar uma semelhança nos índices de precipitação para a maioria dos anos da série temporal. Os maiores acúmulos de precipitação foram observados em 2004, 2009 e 2013, totalizando 1.829 mm/ano, 2.134 mm/ano e 1.863 mm/ano, respectivamente. Em contrapartida, os menores índices de precipitação para a série temporal analisada ocorreram nos anos de 2003, 2015 e 2016, com acúmulos anuais de 1.304 mm, 1073 mm e 1.266 mm, respectivamente.

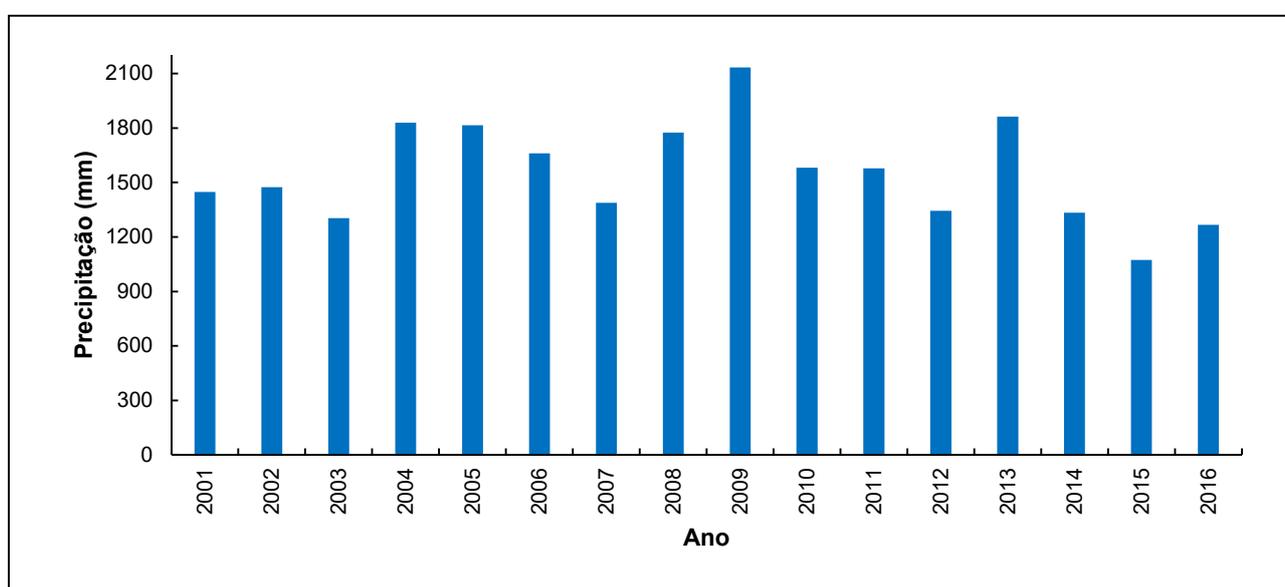


Figura 3.4 – Índices médios anuais de precipitação pluvial (mm), estimados a partir dos dados do TRMM para a bacia hidrográfica do rio Doce, entre 2001 a 2016.

Fonte: A autora.

A média acumulada anual de precipitação, considerando todos os meses da série temporal, foi de 1.554 mm (entre 627 mm e 2.481 mm), valor próximo ao encontrado por Louzada (2016) (1.328 mm), por meio da comparação e análise da precipitação estimada pelo TRMM e dados de postos meteorológicos, cujas médias de ambos foram semelhantes, apresentando correlação significativa de 0,96.

A Figura 3.5 apresenta a distribuição das médias mensais da precipitação pluvial para o período de 2001 a 2016, em que é possível observar um padrão característico da área de estudo, apresentando em sua sazonalidade, maiores regimes de precipitação nos meses de novembro a março, com um total de 81% da precipitação anual e menores regimes nos meses de abril a outubro, período em que ocorre apenas 19% da precipitação anual na BHRD. O somatório das médias mensais correspondentes ao período de maior regime de precipitação pluvial (novembro a março) foi de 2.101 mm, contra 473 mm de ocorrência nos meses equivalentes ao período de menor ocorrência de precipitação (abril a outubro), para toda a série temporal na BHRD (Figura 3.5).

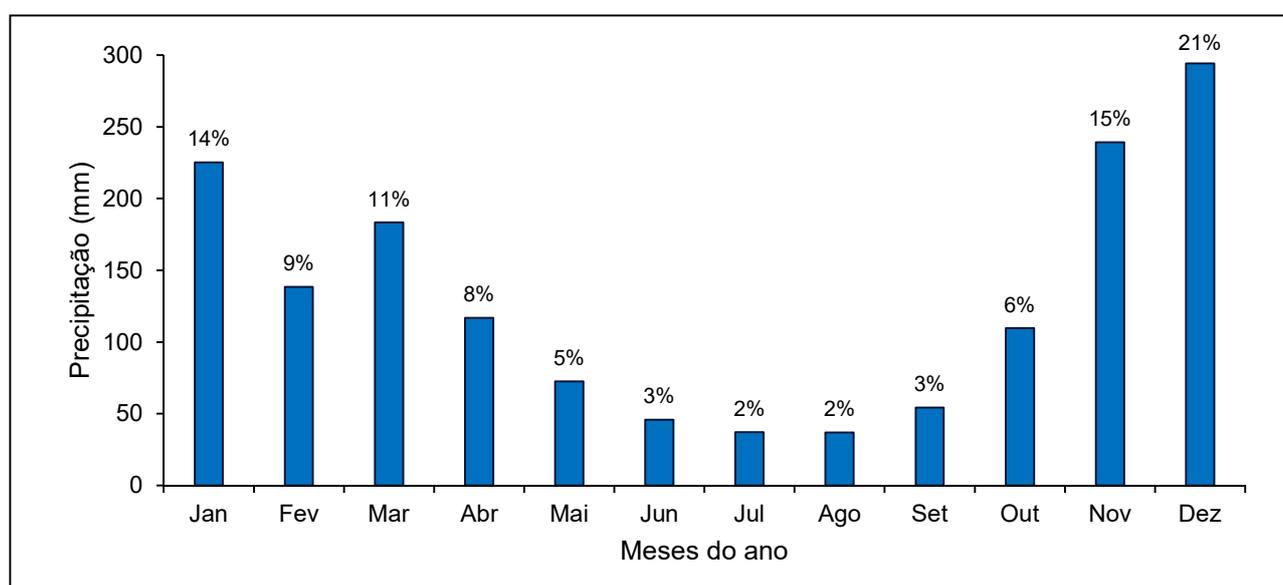


Figura 3.5 – Médias mensais dos índices de precipitação pluvial (mm), estimados a partir dos dados oriundos do TRMM, entre 2001 e 2016, na bacia hidrográfica do rio Doce e seus respectivos valores percentuais.

Fonte: A autora.

O perfil temporal dos valores mínimos, médios e máximos de precipitação pluvial na BHRD está apresentado e comparado na Figura 3.6, em que se observa a semelhança na sazonalidade dos valores máximos e mínimos, característica que está relacionada às condições climáticas da área de estudo e à fenologia da vegetação ali existente.

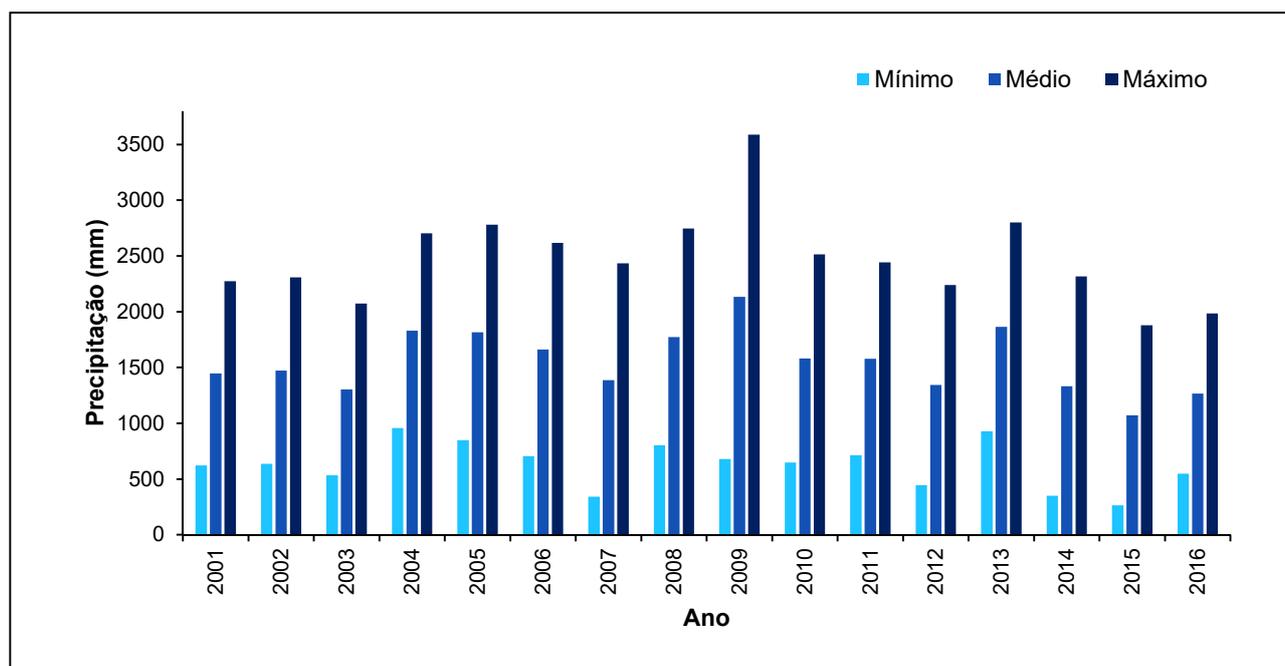


Figura 3.6 – Valores mínimos, médios e máximos da precipitação pluvial (mm), estimados a partir dos dados oriundos do TRMM, para o período de 2001 a 2016, na bacia hidrográfica do rio Doce.

Fonte: A autora.

3.2 CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E PRECIPITAÇÃO PLUVIAL

Os dois índices de vegetação apresentaram o mesmo padrão sazonal apresentado pelos índices da precipitação. Houve aumento dos índices de vegetação devido à alta atividade fotossintética e maior biomassa, reflexo do aumento da precipitação, assim como decréscimo dos índices devido à redução das taxas fotossintéticas e redução da fitomassa foliar devido à diminuição da precipitação pluvial.

O comportamento dos índices de vegetação e da precipitação pluvial na BHRD para o período de 2001 a 2016 é apresentado na Figura 3.7, em que se observa uma sequência contínua nos perfis analisados, sendo evidente a influência da precipitação sob as respostas dos IVs. Resultados semelhantes foram apresentados em diferentes áreas de estudo (ANTUNES e ESQUERDO, 2007; GOLTZ, et al, 2007; ADAMI, et al, 2008; BRANDO, et al, 2010; LADÁNYI, 2011; HERDIANTO, et al, 2013; WAGNER, et al, 2013).

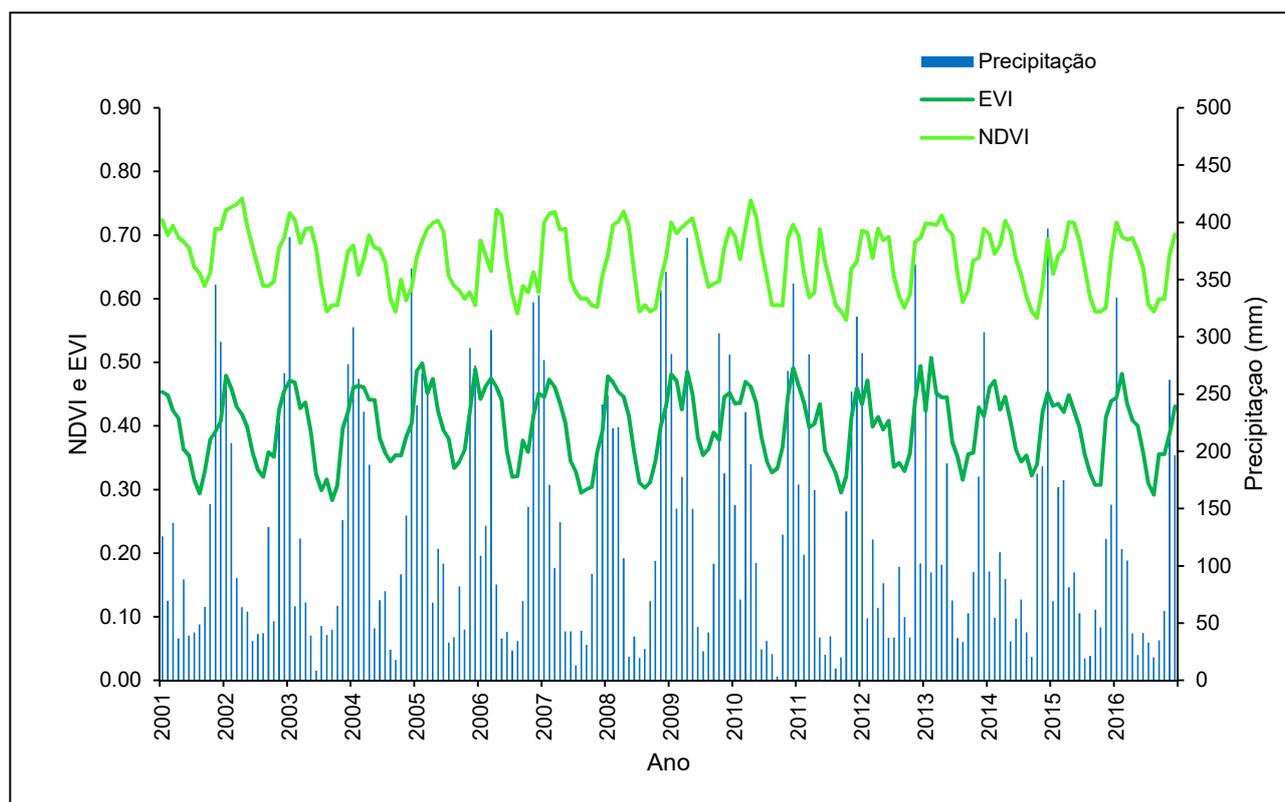


Figura 3.7 – Correlação entre os perfis temporais anuais dos índices NDVI e EVI e da precipitação pluvial na BHRD durante o período de 2001 a 2016.

Fonte: A autora.

A comprovação da correlação entre os IVs e a precipitação pluvial anual é apresentada na Figura 3.8, que mostra a direção da resposta da vegetação à precipitação, por meio da correlação de Pearson entre as variáveis de precipitação e os valores médios de NDVI e EVI para a série temporal analisada.

É possível observar que para o índice de vegetação EVI houve maior dispersão dos valores, o que revela uma maior sensibilidade desse índice em resposta ao desenvolvimento de todos os tipos de vegetação. Em contrapartida, os valores de NDVI apresentaram-se menos dispersos, esse resultado pode ser explicado pelo fato de esse índice responder de maneira menos evidente ao aumento ou diminuição da biomassa verde na área de estudo quando comparado ao EVI. Vibrans e Schramm (2009), analisando o perfil temporal da vegetação na bacia hidrográfica do rio Itajaí, Santa Catarina (SC), observaram que o EVI variou de forma mais acentuada, aparentando ser mais sensível às oscilações sazonais da resposta espectral da vegetação quando comparado ao NDVI.

Observa-se a existência da correlação positiva e significativa a 1% de probabilidade entre as variáveis, em especial o EVI com a precipitação, uma vez que apresentou $r=0,58$ enquanto o NDVI apresentou $r=0,29$.

Houve uma variação dos dados em função da diminuição ou aumento da precipitação, porém, o valor de “r” evidencia o fato de que a vegetação não responde somente à precipitação pluvial para o seu desenvolvimento e aumento da biomassa, ou seja, o aumento da biomassa verde está associada a outras variáveis, além das relacionadas ao clima, como o relevo, o solo, o bioma e variáveis antrópicas.

Fontana et al. (2007) analisaram uma série temporal de 19 anos de NDVI e observaram que a redução do crescimento vegetal, indicado pelos baixos valores de NDVI, foi associada à redução da temperatura do ar e insolação nos meses de inverno. A fenologia da vegetação e os ciclos de ganho e perda da massa foliar (representados pelos dados de IVs) são controlados pelo clima, sobretudo pela disponibilidade hídrica e temperatura do ar (ABER e MELILLO, 2001).

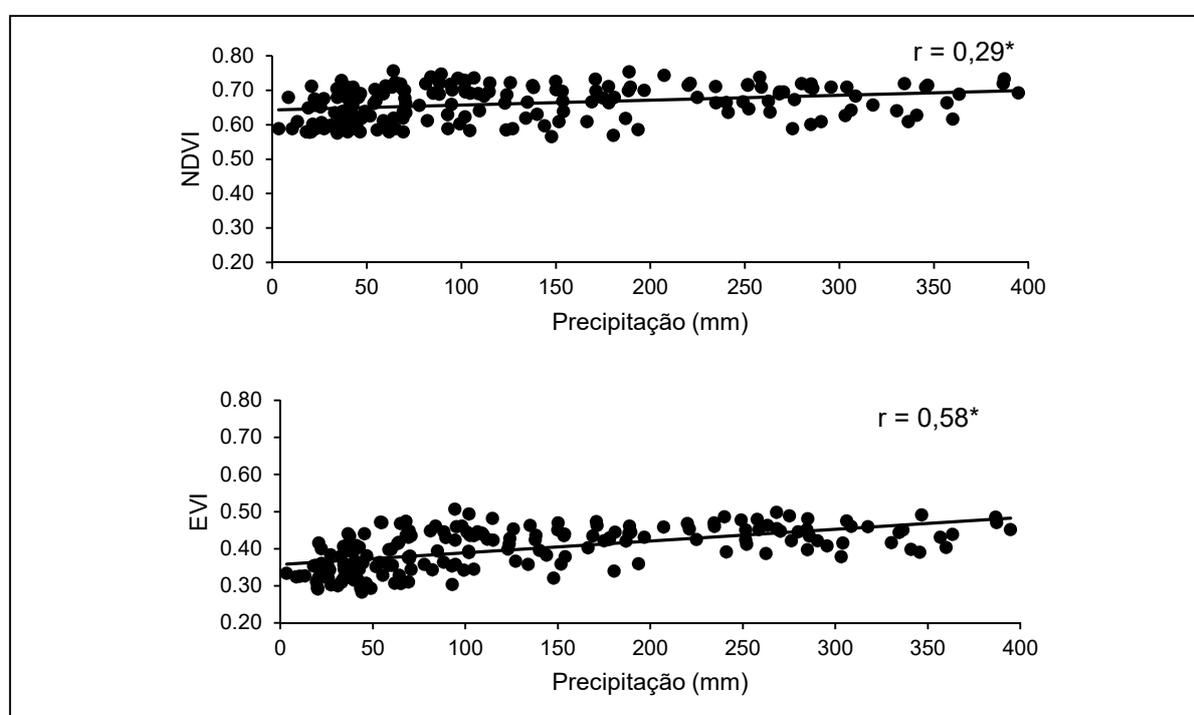


Figura 3.8 – Correlação linear de Pearson entre os valores dos índices de vegetação (EVI e NDVI) e a precipitação pluvial na BHRD. *Valores significativos a 1% de probabilidade. N=192.

Fonte: A autora.

Analisando a relação entre os valores médios dos índices de vegetação atribuídos às classes de UCT na BHRD e os índices de precipitação pluvial, observou-se, por meio da correlação de Pearson, que para todas as classes analisadas houve maior relação entre o EVI e a precipitação, quando comparado com os valores de NDVI também associados à

precipitação, conforme Tabela 3.4, que apresenta apenas as classes que obtiveram correlação significativa, corroborando com os resultados apresentados na Figura 3.8.

As classes denominadas “mosaico de vegetação florestal e agropecuária”, “pastagem plantada”, e “mosaico de vegetação florestal e agricultura” (descritas no Anexo A), são classes que, apesar de possuírem sistema de irrigação artificial, mostraram alta relação com o índice de precipitação pluvial, fato que pode ser explicado pela presença das florestas.

A classe “vegetação florestal” apresentou correlação significativa somente para o EVI, fato explicado pela melhor relação deste índice com a maior quantidade de biomassa verde.

Tabela 3.4 – Correlação entre os valores médios de EVI e NDVI atribuídos às classes de uso e cobertura da terra (descritas pelo IBGE, 2014) e os índices de precipitação pluvial na bacia hidrográfica do rio Doce para o período de 2001 a 2016 por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r).

Classes de uso da terra na BHRD	EVI X Precipitação	NDVI X Precipitação
	(r)	(r)
Mosaico de veg. florestal e agropecuária	0,78**	0,34**
Pastagem plantada	0,60**	0,53**
Mosaico de veg. florestal e agricultura	0,55**	0,10 ns
Vegetação florestal	0,50**	0,13 ns
Pastagem natural	0,41**	0,20**
Agricultura	0,60**	0,42**
Vegetação campestre	0,37**	0,25**
Silvicultura	0,36**	0,10 ns

N=192. Valores significativos a 1% (**) de probabilidade; ns – não significativo.

Fonte: A autora.

A correlação espaço-temporal entre as séries dos IVs e ocorrências de precipitação pluvial é apresentada na Figura 3.9, em que é possível observar os valores de “r” e inferir sobre o grau de resposta do desenvolvimento da vegetação de acordo com as alterações nos regimes da precipitação. O resultado da correlação mostra que o EVI obteve melhor resposta do que o NDVI, havendo predominância dos maiores valores de “r”. Esses resultados evidenciam que, para os dois índices, a diminuição temporal de seus valores possui relação positiva com a alteração do regime de precipitação. Porém, os baixos

valores mostram que outros fatores podem ter influenciado nessa dinâmica de comportamento, podendo estar associados às diferenças de temperatura, deficiência hídrica, umidade relativa do ar, entre outros.

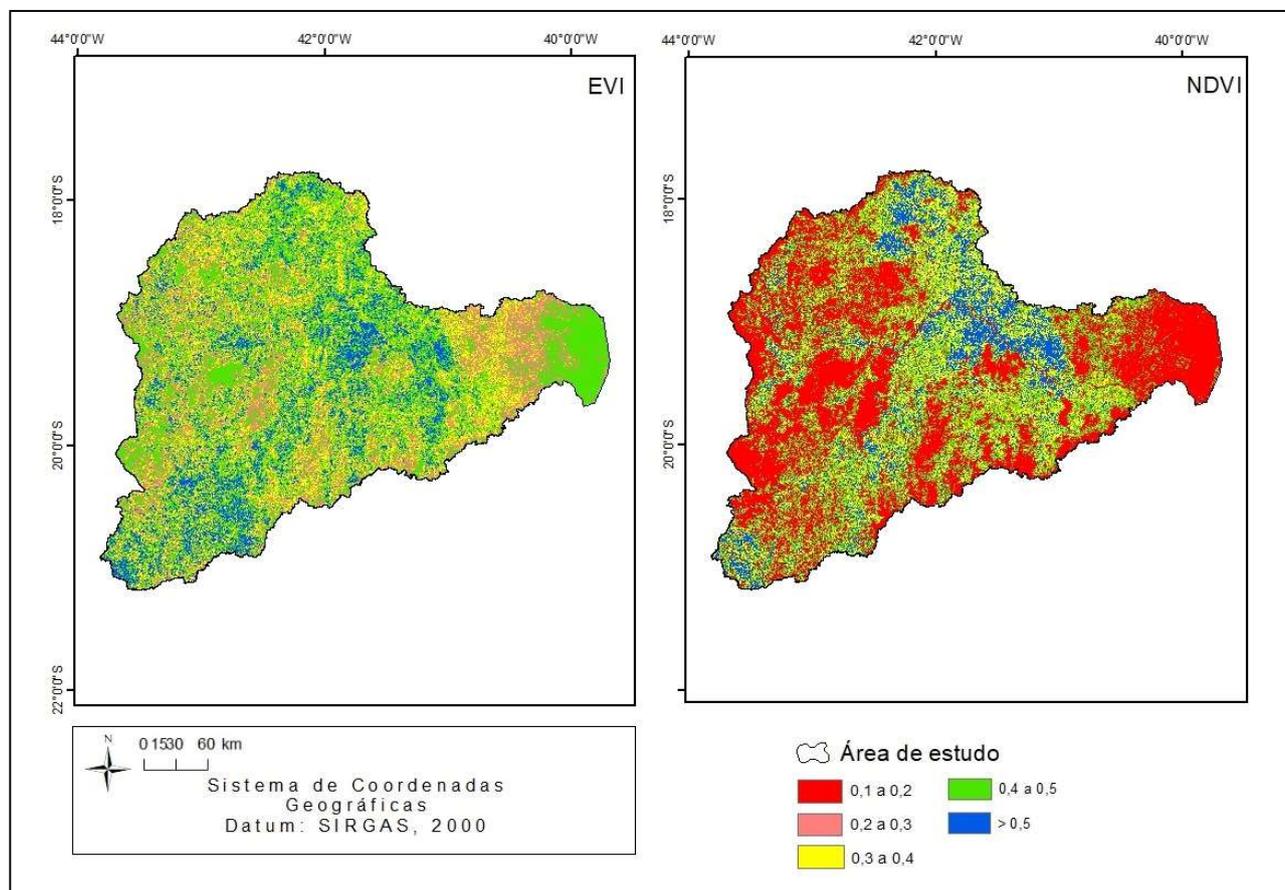
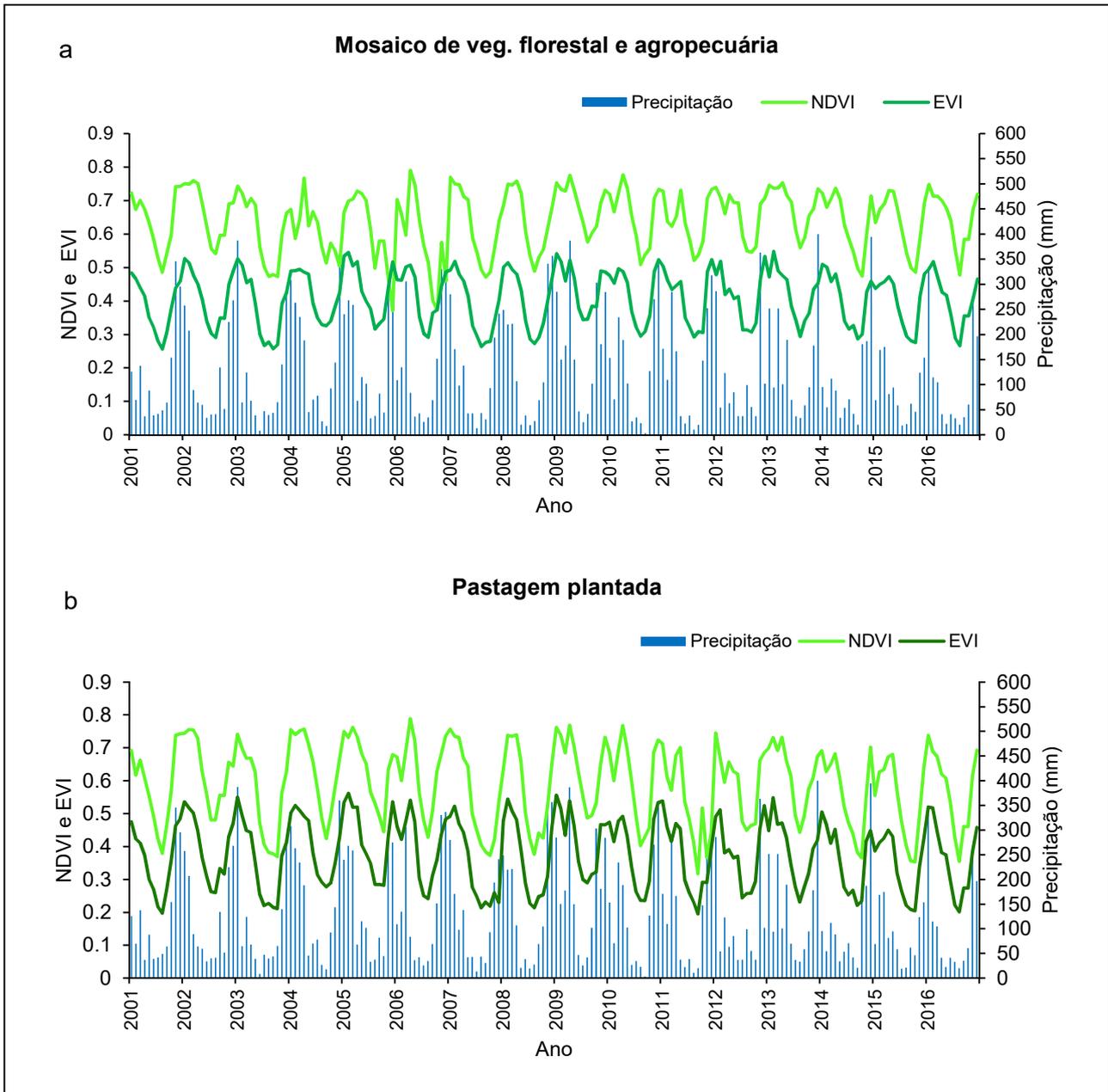


Figura 3.9 – Cálculo de “r” na correlação espacial pixel a pixel entre as séries de imagens EVI e NDVI com índices de precipitação pluvial.

Fonte: A autora.

A Figura 3.10 apresenta as classes com correlação entre os índices de vegetação e a precipitação, sendo possível observar que quando há menor incidência da precipitação, são registrados também os menores valores de NDVI e EVI que mostram menor quantidade de biomassa verde; isso indica que a atividade fotossintética sofre o impacto do estresse hídrico nesse período, provavelmente devido às limitações hídricas (HUETE, 2006). A classe “vegetação florestal” (Figura 3.10d) mostra que, apesar de os valores dos IVs apresentarem-se variáveis acompanhando a sazonalidade da precipitação, os mesmos mantiveram-se altos quando comparados com as demais classes de UCT, fato que se deve à presença de maior quantidade de biomassa verde, uma vez que essa classe abrange as unidades de conservação representadas pelo bioma mata atlântica na área de estudo.



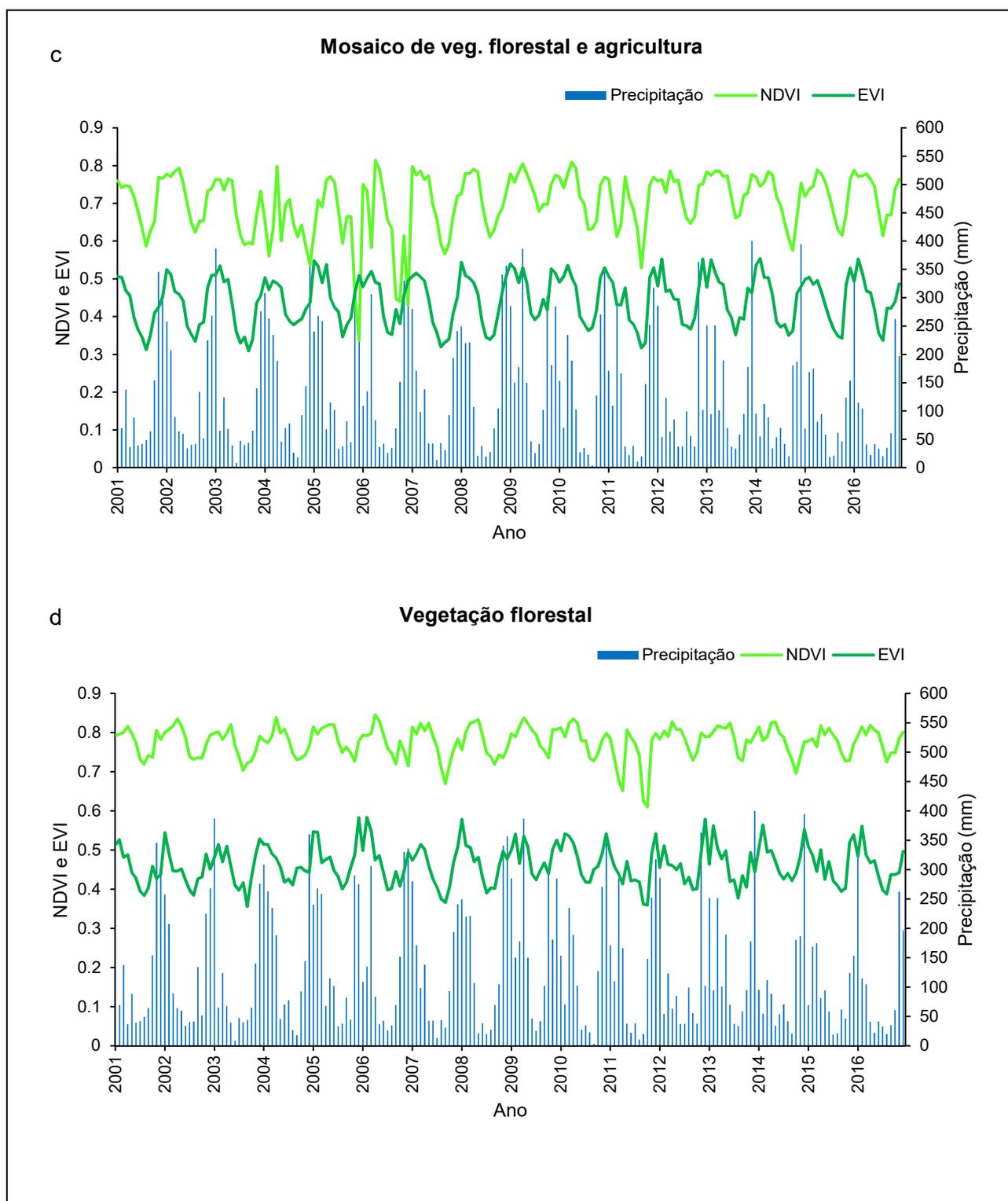


Figura 3.10 – Coeficiente médio de NDVI e EVI associado ao índice de precipitação pluvial no período de 2001 a 2016 na bacia hidrográfica do rio Doce. a. Mosaico de vegetação florestal e agropecuária; b. Pastagem plantada; c. Mosaico de vegetação florestal e agricultura; d. Vegetação florestal.

Fonte: A autora.

Analisando as classes “mosaico de vegetação florestal e agropecuária” (Figura 3.10a) e “mosaico de vegetação florestal e agricultura” (Figura 3.10c), observa-se que houve semelhança nos valores dos IVs, sendo que para ambas as classes, o EVI variou de 0,3 a 0,6 e o NDVI de 0,3 a 0,8, porém, observa-se uma sazonalidade mais evidente na classe cuja agropecuária está presente, devido à quantidade de biomassa verde.

Comparando os resultados apresentados na Figura 3.10, observa-se que a classe “pastagem plantada” (Figura 3.10b) foi a que obteve os menores valores de NDVI e EVI, assim como a sazonalidade mais evidente acompanhando o perfil temporal apresentado pelos índices de precipitação, fato que comprova pouca quantidade da vegetação verde nessa área específica da bacia.

Resultados semelhantes foram encontrados por Rosendo e Rosa (2005), os quais avaliaram a utilização de índices de vegetação no monitoramento de algumas classes de UCT na bacia do rio Araguari, MG.

A resposta da vegetação às condições climáticas é variável, ou seja, há necessidade de um período específico para que ocorra maior incremento da biomassa verde, esse intervalo de tempo entre a ocorrência da precipitação e o aumento da biomassa, denominado de defasagem, é necessário para a atividade fotossintética e a produção de carboidratos estruturais destinados à formação de folhas.

Após a análise dos resultados da correlação entre os IVs (série dependente) e a precipitação pluvial (série independente), observando diferentes valores de defasagens (lag 0 a 3), constatou-se que o melhor resultado da vegetação em resposta à precipitação do TRMM, tanto para o EVI quanto para o NDVI, foi o lag 2, ou seja, toda a vegetação na BHRD respondeu de forma mais eficiente, com relação ao aumento da precipitação, no período aproximado de 2 meses após a sua ocorrência (Tabela 3.5).

A defasagem resultante da relação entre índices de vegetação e a precipitação é variável de acordo com as características climáticas e a vegetação, porém, para Malo e Nicholson (1990) a melhor correlação entre o NDVI e a precipitação ocorre entre o mês corrente e os dois meses seguintes. Braga et al. (2003) avaliaram o tempo de resposta da vegetação ao regime de chuvas no nordeste brasileiro e detectaram alta correlação entre NDVI e a precipitação, sendo que o melhor resultado de correlação foi a defasagem temporal de um a dois meses da ocorrência da precipitação em resposta ao desenvolvimento da vegetação.

Tabela 3.5 – Resultados da correlação entre os índices de vegetação do MODIS e os índices de precipitação oriundos do TRMM para o período de 2001 a 2016, observando o período de defasagem de 0 a 3 meses.

Período de Defasagem (lag)	EVI	NDVI
	R	R
Lag 0 – 0 mês de diferença entre as séries	0,71	0,64
Lag 1 – 1 mês de diferença entre as séries	0,73	0,70
Lag 2 – 2 meses de diferença entre as séries	0,75	0,72
Lag 3 – 3 meses de diferença entre as séries	0,67	0,65

Fonte: A autora.

3.3 TENDÊNCIA SAZONAL

Os resultados relacionados à STA, para os índices EVI e NDVI, são apresentados nas Figuras 3.11 e 3.12, respectivamente. Na maior parte da análise, os padrões de cores tiveram distribuição espacial semelhante para os dois índices. As composições RGB revelam que as áreas que passam por tendências sazonais similares, apresentam resposta semelhante na composição colorida (EASTMAN et al., 2009).

A distribuição de amplitudes e fases do EVI mostrou-se mais evidente quando comparada com a dinâmica de amplitudes e fases do NDVI que, por sua vez, apresentou a distribuição em menor evidência.

Os harmônicos de escala anual e semi-anual (representados pelas cores verde e azul) apresentam-se bem evidentes para os dois índices, predominando a amplitude 1 e fase 1 e amplitude 2 e fase 2, indicando, ciclo sazonal anual e ciclo sazonal semi-anual, respectivamente, uma sazonalidade típica da resposta da vegetação à ocorrência da precipitação, envolvendo o pico do vigor vegetativo para áreas florestais. Nessas áreas, nota-se que houve mistura de cores, sobretudo para o EVI, indicando que a vegetação apresenta uma mistura dos ciclos anual e semi-anual.

Por outro lado, as áreas que predominaram amplitude 0 (representada pela cor vermelha), apresentaram-se semelhantes para os dois índices, sugerindo tendências médias anuais, sendo essa tendência um indicativo da ausência de um ciclo vegetativo definido, uma vez que, na maior parte da bacia ocorre mosaico de vegetação florestal com agropecuária (66%).

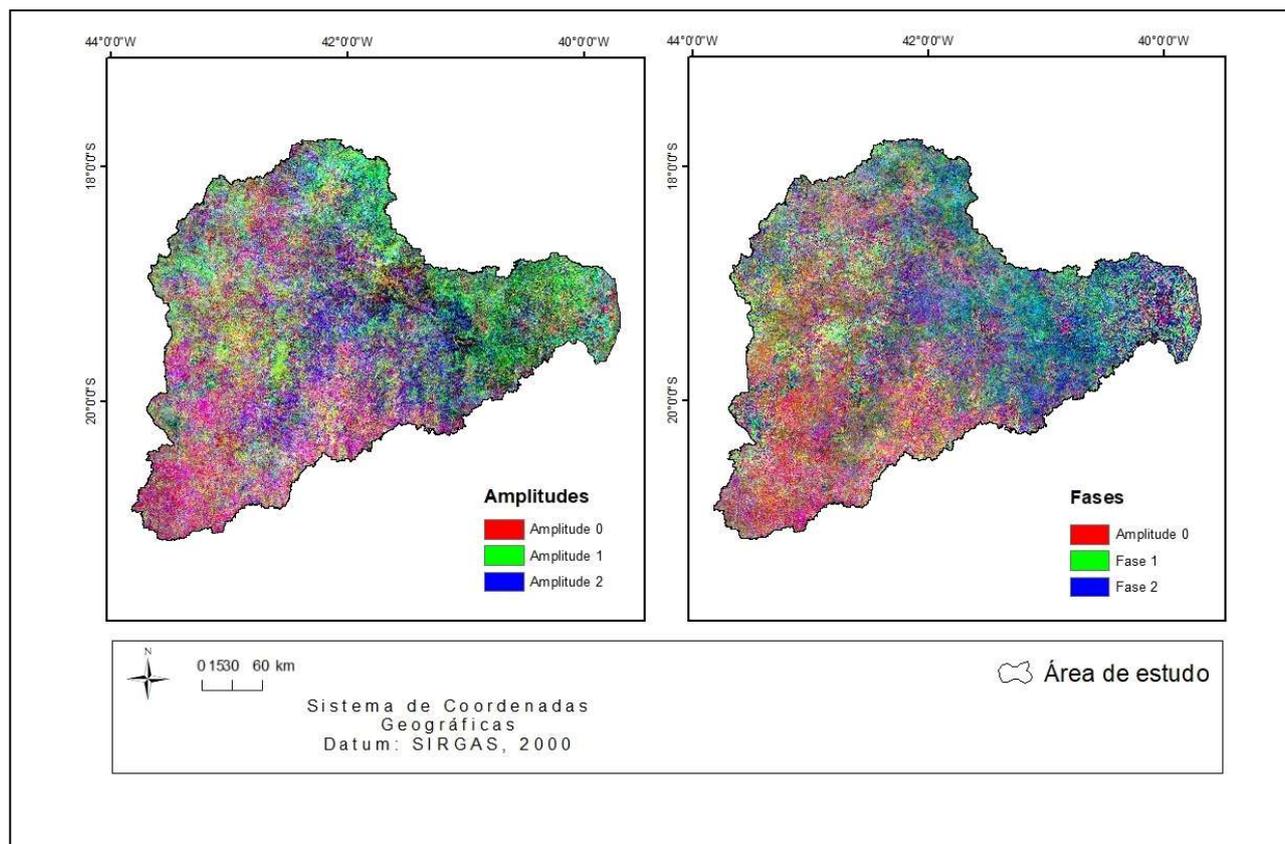


Figura 3.11 – Composições RGB nas amplitudes e fases resultantes da análise de tendência sazonal para o índice de EVI no período de 2001 a 2016.
Fonte: A autora.

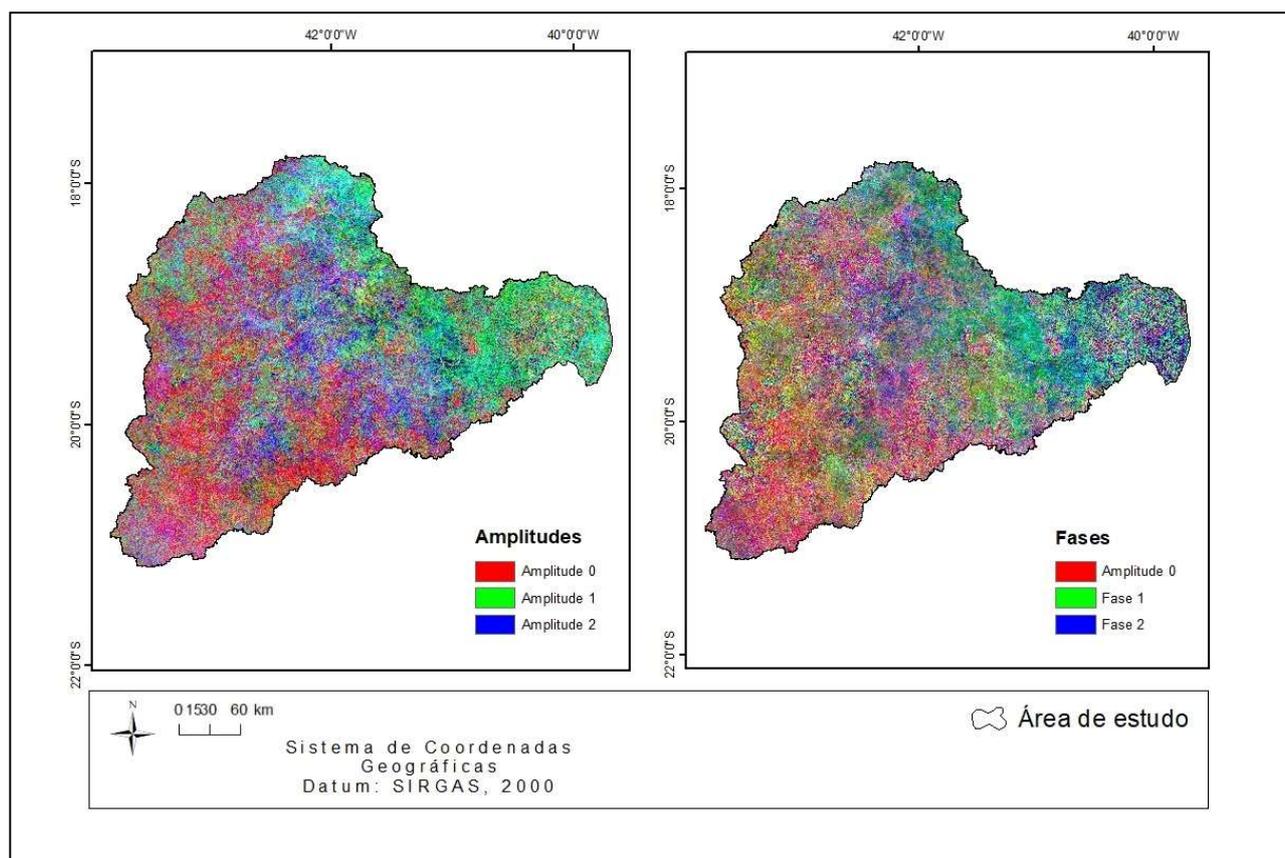


Figura 3.12 – Composições RGB nas amplitudes e fases resultantes da análise de tendência sazonal para o índice de NDVI no período de 2001 a 2016.

Fonte: A autora.

Esses resultados demonstraram similaridade com o trabalho desenvolvido por Ratana et al. (2005), que encontraram sazonalidade bem pronunciada nos perfis temporais dos índices EVI e NDVI, com valores altos na estação chuvosa e menores na estação seca. Ferreira e Huete (2004) afirmaram que essa diferença sazonal é indicativa da alta atividade fotossintética e acumulação de biomassa em meses chuvosos e de déficit hídrico com baixa biomassa verde no período de estiagem.

4 CONCLUSÕES

Após as análises realizadas na bacia hidrográfica do rio Doce, durante o período de 2001 a 2016, foi possível concluir que:

- A correlação entre os índices de vegetação e a precipitação pluvial foi positiva e significativa, contudo, outros fatores influenciam na alteração do comportamento da dinâmica da vegetação na bacia;

- O índice de vegetação EVI oriundos do sensor MODIS apresentou melhor correlação com os índices de precipitação pluvial oriundos do satélite TRMM;

- A tendência sazonal dos índices NDVI e EVI mostrou-se em concordância com as tendências de aumento e decréscimo da precipitação pluvial, especialmente nas áreas ocupadas por vegetação florestal, nas Unidades de Conservação;

- A vegetação presente na bacia hidrográfica do rio Doce apresenta os dos ciclos sazonais, sendo ciclo sazonal anual e ciclo sazonal semianual.

5 REFERÊNCIAS

ABER, J. D.; MELILLO, J. M. **Terrestrial ecosystems**. San Diego: Academic Press, 556 p, 2001.

ADAMI, M.; FREITAS, R. M. de; PADOVANI, C. R.; SHIMABUKURO, E.; MOREIRA, M. A. Estudo da dinâmica espaço-temporal do bioma Pantanal por meio de imagens MODIS. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.43, n.10, p.1371-1378, 2008.

ANTUNES, J.F.G.; ESQUERDO, J.C.D.M. Geração automática de produtos derivados de imagens AVHRR-NOAA para monitoramento de áreas inundáveis do Pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.59, p.115-122, 2007.

BRAGA, C. C., BRITO, J. I. B., SANSIGOLO, C.A., RAO, T.V.R. Tempo de resposta da vegetação às variabilidades sazonais da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.1, p.149-157, 2003.

BRANDO, P.M; GOETZ, S. J.; BACCINI, A.; NEPSTAD, D. C.; BECK, P. S. A.; CHRISTMAN, M. C. Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon. **PNAS**, v. 107, n. 33, 2010.

CALEGARI, L.; MARTINS, S. V.; GLERIANI, J. M.; SILVA, E.; BUSATO, L. C. Análise da dinâmica de fragmentos florestais no município de Carandaí, MG, para fins de restauração florestal. **Revista Árvore**, v. 34, n. 5, p. 871-880, 2010.

CARVALHO JUNIOR, O. A. de; COUTO JUNIOR, A. F.; SILVA, N. C. da; MARTINS, E. de S.; CARVALHO, A. P. F.; GOMES, R. A. T. Avaliação dos classificadores espectrais de mínima distância euclidiana e spectral correlation mapper em séries temporais NDVI-MODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 61, v. 04, p. 399-412, 2009.

CLARK LABS. TerrSet – **Geospatial Monitoring and Modeling System**. Clark University, 2015. Disponível em: <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/03/TerrSet18-2_Brochure_WEB.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

COELHO, A. L. N. Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-Baixo Rio Doce/ES 2007. 227 f. **Tese de Doutorado** (Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia), Niterói, 2007.

CORDEIRO, S. A., SOUZA, C., MENDOZA, Z. Florestas brasileiras e as mudanças climáticas. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 11, 1-20, 2008.

EASTMAN, J. R.; SANGERMANO, F.; GHIMIRE, B.; ZHU, H.; CHEN, H.; NEETI, N.; CAO, Y.; CREMA, S. Seasonal Trend Analysis of Image Time Series. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n.10, p. 2721-2726, 2009.

FELIPPE, M. F.; COSTA, A.; FRANCO, R.; MATOS, R. E. S. A Tragédia Do Rio Doce: A Lama, O Povo e a Água. Relatório de Campo e Interpretações Preliminares Sobre as Consequências do Rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão (Samarco/Vale/Bhp). **Revista GEOgrafias**, v. 1, p. 63-94, 2016.

FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n.10, p. 1837-1860, 2004.

FONTANA, D. C.; ALMEIDA, T. S.; JACÓBSEN, L. O. Caracterização da dinâmica temporal dos Campos do Rio Grande do Sul por meio de imagens AVHRR/NOAA. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.15, p.69-83, 2007.

GOLTZ, E.; BRANDÃO D.; TOMÁS, L.; MATELLI, L. R.; ADAMI, M.; SHIMABURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R. Utilização de índices espectrais de vegetação do sensor MODIS na determinação de áreas suscetíveis a alagamento no Pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 59, 2007.

GURGEL, H. C. **Variabilidade Espacial e Temporal do NDVI sobre o Brasil e suas Conexões com o Clima**. Dissertação de Mestrado - São José dos Campos: INPE, 118p., 2003.

HELLDÉN, U.; EKLUNDH, L. **National Drought Impact Monitoring – A NOAA NDVI and precipitation data study of Ethiopia**. Lund Studies in Geography, Ser. C. General, Mathematical and Regional Geography, v.15, 55 p., 1998. Disponível em: <<https://lup.lub.lu.se/search/publication/627435>>. Acesso em: Agosto de 2017.

HERDIANTO, R.; PAIK, K.; COLES, N. A.; SMETTEM, K. Transitional responses of vegetation activities to temperature variations: Insights obtained from a forested catchment in Korea. **Journal of Hydrology**, 484, 86–95, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413000450>>. Acesso em: Março de 2017.

HUETE, A.; 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.

HUETE, A. R., DIDAN, K., SHIMABUKURO, Y., RATANA, P., SALESKA, S. R., HUTYRA, L. R., YANG, W., NEMANI, R. R.; MYNENI, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research letters**, v.33, L06405, 2006.

HUFFMAN, G.J. et al. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, p. 38-55, 2007. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JHM560.1>>. Acesso em: Dezembro de 2017.

Instituto Bio Atlântica (IBIO). **Entidade delegatária e equiparada às funções de Agência de Água**. Disponível em: <<http://www.ibioagbdoce.org.br/a-bacia>>. Acesso em: Outubro de 2016.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do rio Doce**: Volume I, relatório final. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2014/10/PIRH_Doce_Volume_I.pdf>. Acesso em: Novembro de 2015.

JACÓBSEN, L. O.; FONTANA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do Estado do Rio Grande do Sul observados através do NDVI/NOAA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.2, p.129-140, 2004.

JONG, R. de; BRUIN, S. de. Linear trends in seasonal vegetation time series and the modifiable temporal unit problem. **Biogeosciences**, v. 9, p. 71-77, 2012.

LADÁNYI, Z.; RAKONCZAI, J.; BOUDEWIJN, V. L. Evaluation of precipitation-vegetation interaction on a climate-sensitive landscape using vegetation indices. **Journal of Applied Remote Sensing**, 053519-1, Vol. 5, 2011.

LEEUWEN, W. J. D. van; ORR, B. J.; MARSH, S. E.; HERRMANN, S.M. Multisensor NDVI data continuity: uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 67-81, 2006.

LOUZADA, F. L. R. de O. **Balando hídrico climatológico com dados estimados pelo satélite Tropical Rainfall Measuring Mission para a bacia hidrográfica do rio Doce**. 107 p. **Tese de Doutorado** (Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias), Alegre, ES, 2016.

MALO, A. R.; NICHOLSON S. E. A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index. **Journal of Arid Environments**, v. 19, p. 1-24, 1990. Disponível em: <<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19920754527>>. Acesso em: Agosto 2017.

MENZEL, A.; FABIAN, P. Growing season extended in Europe. **Nature**, v. 397, p. 659-669, 1999.

MISHRA, N. B.; CHAUDHURI, G. Spatio-temporal analysis of trends in seasonal vegetation productivity Uttarakhand, Indian Himalayas, 2000 e 2014. **Applied Geography**, v. 56, p. 29-41, 2015.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Sensor MODIS**. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>. Acesso em: Março de 2017.

PILLAR, V. D. **Dinâmica temporal da vegetação**. UFRGS. Departamento de Botânica. 1994. Disponível em: <<http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br>>. Acesso em: Junho de 2017.

RATANA, P.; HUETE, A. R.; FERREIRA, L. Analysis of Cerrado Physiognomies and Conversion in the MODIS Seasonal-Temporal Domain. **Earth Interactions**, v. 9, n. 3, 22 p, 2005.

ROSENDO, J. dos S.; ROSA, R. A utilização de sensores com resolução moderada (MODIS) no estudo da vegetação na bacia do rio Araguari, MG. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 17 (33): 91-104, 2005. Disponível em: <http://www.ecologia.ib.usp.br/lepac/bie5759/jussara_santos.pdf>. Acesso em: Janeiro de 2018.

TURNER, B. L.; LAMBIN, E. F.; REENBERG, A. The emergence of large change science for global environment change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of science*, v. 104, p. 20666-20671, 2007.

VIBRANS, A. C.; VANESSA; SCHRAMM, F. Perfil temporal de EVI/NDVI na bacia hidrográfica do rio Itajaí em Santa Catarina. *Anais... XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Natal, Brasil, 25 a 30 de abril de 2009, INPE. P. 1581-1588. 2009.

WAGNER, A. P. L.; FONTANA, D. C.; FRAISSE, C.; WEBER, E. J.; HASENACK, H. Tendências temporais de índices de vegetação nos campos do pampa do Brasil e do Uruguai. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v. 48, n. 9, p. 1192-1200, 2013.

WANG, J.; RICH, P. M.; PRICE, K. P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 11, p. 2345–2364, 2003. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160210154812>>. Acesso em: Janeiro de 2018.

WHITE, M. A., et al. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1992-2006. *Global Change Biology*, v. 15, p. 2335-2359, 2009.

YU, F.; PRICE, K. P.; ELLIS, J.; SHI, P. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote sensing of environment*, v. 87, n. 1, p. 42-54, 2003.

YUAN, F.; ROY, S. S. **Analysis of the Relationship Between NDVI and Climate Variables in Minnesota Using Geographically Weighted Regression and Spatial Interpolation**. ASPRS 2007 Annual Conference. Tampa, Florida. 2007.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B. Global vegetation phenology from moderate resolution imaging Spectroradiometer (MODIS): evaluation no global patterns and comparison within situ measurements. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, p. 1-14, 2006.

ZHAO, M.; HEINSCH, F. A.; NEMANI, R.; RUNNING, S. W. Improvements of the MODIS territorial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, v.95, p.164-176. 2005.

ANEXO A

Tabela 1 – Classes de Cobertura e Uso da Terra.

Classe	Descrição
Área agrícola	Área caracterizada por lavouras temporárias e lavouras permanentes, irrigadas ou não, sendo a terra utilizada para a produção de alimentos e fibras do agronegócio. Inclui todas as terras cultivadas, que podem estar plantadas ou em descanso e também as áreas alagadas cultivadas. Pode ser representada por zonas agrícolas heterogêneas ou extensas áreas de plantação. Inclui também os tanques de aquicultura.
Área artificial	Área caracterizada por uso urbano, estruturado por edificações e sistema viário, onde predominam superfícies artificiais não-agrícolas. Estão incluídas nesta categoria as metrópoles, cidades, vilas, áreas de rodovias, serviços e transportes, redes de energia, comunicações e terrenos associados, áreas ocupadas por complexos industriais e comerciais e edificações que podem, em alguns casos, estar situadas em áreas periurbanas. Também pertencem a essa classe as aldeias indígenas e áreas de lavra de mineração.
Corpo d'água continental	Inclui todas as águas interiores, como rios, riachos, canais e outros corpos d'água lineares. Também engloba corpos d'água naturalmente fechados (lagos naturais) e reservatórios artificiais (represamentos artificiais de água construídos para irrigação, controle de enchentes, fornecimento de água e geração de energia elétrica).
Mosaico de vegetação florestal e agricultura	Área caracterizada por ocupação mista de agricultura, pastagem e/ou silvicultura associada a remanescentes florestais, na qual não é possível uma individualização de seus componentes. Podem ocorrer, em menor proporção, outras formações vegetais (herbáceas e arbustivas).
Mosaico de vegetação florestal e agropecuária	Área caracterizada pelo predomínio da vegetação florestal associada a uma ocupação mista de agricultura, pastagem e/ou silvicultura, na qual não é possível uma individualização de seus componentes.
Pastagem natural	Área caracterizada por vegetação campestre (natural) sujeita a pastoreio e outras interferências antrópicas de baixa intensidade.
Pastagem plantada	Área caracterizada por vegetação exótica ou nativa, onde já não existe a vegetação original. Este tipo de pastagem é dividida em permanente que podem durar até trinta anos e em temporárias que podem durar seis meses.
Silvicultura	Área caracterizada por plantios florestais de espécies exóticas e/ou nativas como monoculturas.
Vegetação campestre	Área caracterizada por formações campestres. Entende-se como campestres as diferentes categorias de vegetação fisionomicamente bem diversa da florestal, ou seja, aquelas que se caracterizam por um estrato predominantemente arbustivo, esparsamente distribuído sobre um tapete gramíneo-lenhoso. Incluem-se nessa categoria as Savanas, Estepes, Savanas

	Estépicas, Formações Pioneiras e Refúgios Ecológicos. Encontram-se disseminadas por diferentes regiões fitogeográficas, compreendendo diferentes tipologias primárias: estepes planaltinas, campos rupestres das serras costeiras e campos hidroarenosos litorâneos (restinga).
Vegetação florestal	Área ocupada por florestas. Consideram-se florestais as formações arbóreas com porte superior a 5 metros de altura, incluindo-se aí as áreas de Floresta Densa, de Floresta Aberta, de Floresta Estacional, além da Floresta Ombrófila Mista. Inclui outras feições em razão de seu porte superior a 5 m de altura, como a Savana florestada, Campinarana florestada, Campinarana arborizada e os Manguezais.

Fonte: IBGE, 2014.