



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**ROSANE GOMES DA SILVA**

**DINÂMICA TEMPORAL DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E SUA CORRELAÇÃO  
COM A PRECIPITAÇÃO**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2016

ROSANE GOMES DA SILVA

**DINÂMICA TEMPORAL DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E SUA CORRELAÇÃO  
COM A PRECIPITAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Recursos Florestais.  
Orientador: Alexandre Rosa dos Santos

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2016

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

---

Silva, Rosane Gomes da, 1991-

S586d      Dinâmica temporal de índices de vegetação e sua correlação com a precipitação / Rosane Gomes da Silva. – 2016.  
70 f. : il.

Orientador: Alexandre Rosa dos Santos.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Sensoriamento remoto. 2. Variáveis meteorológicas. 3. Floresta atlântica. 4. Unidade de conservação. I. Santos, Alexandre Rosa dos. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 630

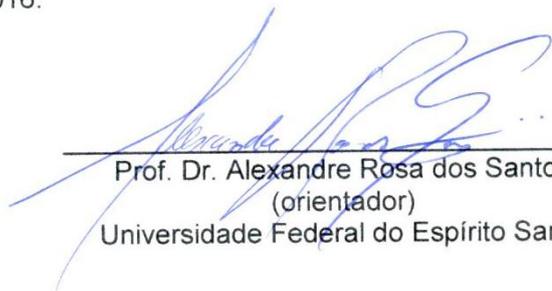
---

**DINÂMICA TEMPORAL DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E SUA CORRELAÇÃO  
COM A PRECIPITAÇÃO**

**Rosane Gomes da Silva**

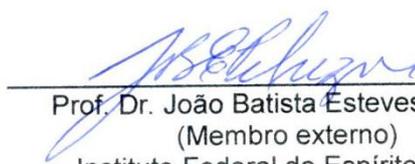
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Recursos Florestais.

Aprovada em 26 de fevereiro de 2016.



---

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



---

Prof. Dr. João Batista Esteves Pelúzio  
(Membro externo)  
Instituto Federal do Espírito Santo



---

Prof. Dr. Nilton César Fiedler  
(Membro interno)  
Universidade Federal do Espírito Santo

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, criador dos céus e da Terra, pelo dom da vida e por me capacitar na execução deste trabalho.

À minha mãe, meu pai (em memória) e irmãos, pelo apoio e incentivo.

À equipe de pesquisa mundo geomática, pelo companheirismo e experiências vividas; em especial ao meu orientador Alexandre, pela confiança, paciência, dedicação e amizade. Ao Elvis pela parceria e auxílio na utilização das ferramentas computacionais.

Aos colegas do laboratório de modelagem hidrológica, em especial às amigas Tamires, Natália e Ana Paula, pelos bons momentos compartilhados e apoio durante o tempo de mestrado.

Aos demais amigos (as), por estarem presentes nos momentos bons e difíceis, sempre à espera do meu sucesso.

À UFES, em particular ao Programa de pós-graduação em ciências florestais, pela oportunidade de cursar o mestrado e à FAPES pela concessão da bolsa no período da pós-graduação.

Aos professores Nilton César Fiedler e João Batista Pelúzio pela participação na banca examinadora e contribuições no trabalho final.

*E tudo quanto fizerdes, fazei-o de coração, como ao  
Senhor, e não aos homens. (Colossenses 3:23)*

## RESUMO

SILVA, Rosane Gomes da. **Dinâmica temporal de índices de vegetação e sua correlação com a precipitação**. 2016. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro-ES. Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos.

As florestas são áreas de grande relevância ambiental, pois seu ecossistema possibilita a manutenção de diversas espécies da fauna e contribui para a qualidade do solo e dos recursos hídricos. As variações climáticas constituem um dos principais agentes de alterações na dinâmica da vegetação, influenciando na distribuição, estrutura e função da vegetação, o que sugere uma desvalorização da mesma sob a forma de bens e serviços, estendendo os impactos à sócio-econômicos e de ecossistemas. Neste contexto, tornam-se cada vez mais importantes pesquisas que estudem a dinâmica de comportamento da vegetação e sua relação com o clima. O objetivo desta pesquisa foi analisar a tendência de comportamento da vegetação em bioma de mata atlântica, por meio de índices de vegetação do sensor MODIS, e sua correlação com a variabilidade dos dados mensais de precipitação do satélite TRMM. A pesquisa foi desenvolvida tendo como área de estudo o Parque Nacional do Caparaó e a parte da sua zona de amortecimento no estado do Espírito Santo. Foram utilizados dados de NDVI e EVI do sensor MODIS, produto MOD13Q1, do período de 2001 a 2014, totalizando 322 imagens e dados mensais de precipitação do satélite TRMM, do mesmo período, totalizando 168 imagens. As análises das tendências interanuais das séries temporais de Índices de vegetação foram realizadas por meio das metodologias de linearidade, correlação linear, tendência linear, tendência monotônica de Mann Kendall, tendência mediana de Theil-Sen e análise dos perfis temporais. Foi verificada a tendência sazonal por meio da análise de tendência sazonal (STA) e da transformada de ondaletas inversa de Haar. Por meio de técnicas de modelagem linear, expressas pelo R e R<sup>2</sup> calculados, foi estudada a correlação entre os dados de precipitação e índices de vegetação. Com a geração dos perfis temporais dos IV, observou-se que houve uma diminuição no vigor vegetativo, em especial nas áreas em que a vegetação apresenta-se mais vigorosa. Esse resultado foi de encontro às tendências interanuais estudadas, que indicaram decréscimo nos valores de IV tanto para a tendência monotônica de Mann Kendall como para a Tendência mediana, sendo um comportamento não linear de acordo com as metodologias de correlação

linear, linearidade e tendência linear. De acordo com a Análise de Tendência sazonal puderam ser identificados dois ciclos sazonais na área de estudo, um ciclo anual e um ciclo semi-anual. Esse resultado foi o mesmo encontrado por meio da transformada de ondaleta para o EVI. Para o NDVI e a precipitação não foi observado padrão de comportamento sazonal pela transformada de ondaleta. Quanto à correlação dos índices de vegetação com a precipitação, foram encontrados valores de correlação que chegaram a 0,7 para o R e 0,6 para o R<sup>2</sup>. No entanto, na maior parte da área, principalmente considerando o PARNA Caparaó, esses valores foram muito baixos. Dessa forma, outros fatores podem ter influenciado nas alterações de comportamento da dinâmica da vegetação no período considerado.

**Palavras- chave:** sensoriamento remoto, variáveis meteorológicas, floresta atlântica, unidade de conservação.

## ABSTRACT

SILVA, Rosane Gomes da. **Temporal dynamics of vegetation indexes and their correlation with precipitation.** 2016. Dissertation (Master of Forest Sciences) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro-ES. Advisor: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos.

Forests are areas of great environmental importance because its ecosystem enables the maintenance of various species of fauna and contributes to the quality of soil and water resources. Climate changes are main change agents in vegetation dynamics, influencing the distribution, structure and function of vegetation, which suggests a devaluation in the form of goods and services, extending the impact on socio-economic and ecosystem. In this context, increasingly important become research to study the dynamics of vegetation behavior and its relationship with the weather. The objective of this study was to analyze the behavioral trend of vegetation in atlantic forest biome, by the MODIS vegetation indices and their correlation with the variability of monthly data satellite precipitation TRMM. The research was realized with the study area the Caparaó National Park and part of its buffer zone in the state of Espírito Santo. We used NDVI and EVI data MODIS sensor, MOD13Q1 product, the period from 2001 to 2014, totaling 322 images and satellite precipitation monthly data TRMM, the same period, totaling 168 images. The analysis of the interannual trends of time series of vegetation index were performed by the methodologies of linearity, linear correlation, linear trend, Mann Kendall monotonic trend, median trend Theil-Sen and analysis of temporal profiles. The seasonal trend was verified by seasonal trend analysis (STA) and transform inverse wavelet Haar. By means of linear modeling techniques, expressed by R and  $R^2$  calculated, the correlation between the data precipitation and vegetation index was studied. With the generation of the temporal profiles of the IVs, it was observed that there was a decrease in greenness, particularly in areas where the vegetation has become more vigorous. This result was similar to study the interannual trends indicate that decrease in IR values for both monotonic trend Mann Kendall and for the median tendency, being a non-linear behavior in accordance with the correlation methodologies linear, linear and linear trend. According to the seasonal trend analysis were identified two seasonal cycles in the study area, an annual cycle and a semi-annual cycle. This result was the same found by wavelet transform to the EVI. For NDVI and

precipitation was observed seasonal pattern of behavior by the wavelet transform. As for the correlation of vegetation indices with precipitation, larger correlation values were to 0.7 to 0.6 and R to R<sup>2</sup>. However, in most of the area, especially considering the PARNA Caparaó, these values were very low. Thus, other factors may have influenced the dynamics of the behavior changes of vegetation in the period considered.

**Key words:** remote sensing, meteorological variables, atlantic forest, protect areas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva espectral da vegetação verde, vegetação seca, e do solo	20
Figura 2 - Localização da área de estudo	31
Figura 3 - Área imageada pelo sensor MODIS, correspondente ao quadrante h14v11	33
Figura 4 - Quadrante selecionado para download das imagens TRMM	37
Figura 5 - Representação da ondaleta inversa de Haar	42
Figura 6 - Fluxograma contendo as etapas da pesquisa	45
Figura 7 - Pixels espúrios acusados pelas imagens de confiabilidade	46
Figura 8 - Presença de pixels espúrios nas imagens IV, de acordo com a época do ano	47
Figura 9 - Perfis temporais dos anos de 2001 a 2014 para o EVI, de acordo com: (a) valores médios; (b) valores máximos; (c) valores mínimos; e (d) variabilidade dos valores	48
Figura 10 - Perfis temporais dos anos de 2001 a 2014 para o NDVI, de acordo com: (a) valores médios; (b) valores máximos; (c) valores mínimos; e (d) variabilidade dos valores	48
Figura 11 - Tendências interanuais para o EVI: (a) linearidade; (b) Correlação linear , (c) Tendência Linear, (d) Tendência Monotônica de Mann Kendall, (e) Tendência mediana	50

Figura 12 - Tendências interanuais para o NDVI: (a) linearidade; (b) Correlação linear , (c) Tendência Linear, (d) Tendência Monotônica de Mann Kendall, (e) Tendência mediana	51
Figura 13 - Análise de tendência sazonal para o EVI	53
Figura 14 - Análise de tendência sazonal para o NDVI	54
Figura 15 - Transformada de ondaleta, para: (a) EVI; (b) NDVI; e (c) Precipitação	55
Figura 16 - Perfis temporais gerados para as anomalias: (a) EVI; (b) NDVI; (c) precipitação	57
Figura 17 - Mapa da anomalia do NDVI do dia 03 de dezembro de 2005 e sua representação no perfil temporal	58
Figura 18 - Relação entre os IV e a precipitação, considerando: (a) EVI médio; (b) EVI máximo;(c) NDVI médio; e (d) NDVI máximo. IVs representados em vermelho e precipitação em azul	60
Figura 19 - R calculado para o EVI (a) e NDVI (b)	61
Figura 20 - R <sup>2</sup> calculado para o EVI (a) e NDVI (b)	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características espectrais do sensor MODIS, para estudo da vegetação	22
Tabela 2 - Principais produtos obtidos do sensor MODIS	23
Tabela 3 - Datas das imagens MODIS utilizadas para o estudo	33
Tabela 4 - Valores de confiabilidade para o NDVI e EVI, obtidos a partir das imagens Pixel Reliability	34
Tabela 5 - Períodos de ocorrência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APP	Área de Preservação Permanente
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy (Sensor de Energia Radiante da Superfície Terrestre e das Nuvens)
DAAC	Distributed Active Archive System (Sistema de Arquivo Ativo Distribuído)
EOS	Earth Observing System (Sistema de observação da Terra)
ETM	EarthTrends Modeler (Modelagem das tendências da Terra)
EVI	Enhanced Vegetation Index (Índice de vegetação melhorado)
FAPAR	Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida pela Vegetação)
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre (Precipitação Acumulada Mensal Global do Centro de Climatologia)
GV	Ground Validation (Validação em campo)
IAF	Índice de Área Foliar
IV	Índice de Vegetação
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency (Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial)
LIS	lightning Imaging Sensor (Sensor para Imageamento de Relâmpagos)

MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Espectroradiometro de imagem de resolução moderada)
MRT	MODIS Reprojection Tools (Ferramenta de reprojeção MODIS)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)
PARNA	Parque Nacional
PR	Precipitation radar (Radar de Precipitação)
RGB	Red Green Blue (Vermelho Verde Azul)
RL	Reserva Legal
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
STA	Sazonal trends Analysis (Análise de tendência sazonal)
TMI	TRMM Microwave Imager (Imageador de Microondas)
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission (Missão de medição de chuvas tropicais)
TSDIS	TRMM Science Data and Information System (Dados Científicos e Sistema de Informação TRMM)
UC	Unidade de Conservação
UTM	Universal Transversa Mercator

VIRS

Visible and Infrared Scanner (Radiômetro no Visível e Infravermelho)

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
2.	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
2.1.	SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DA VEGETAÇÃO.....	19
2.2.	PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO.....	22
2.2.1.	<b>Sensor MODIS</b> .....	22
2.2.2.	<b>Satélite TRMM</b> .....	23
2.3.	EFEITOS DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA VEGETAÇÃO.....	25
2.4.	VALORAÇÃO DA NATUREZA.....	27
2.4.1.	<b>Conservação da natureza</b> .....	28
3.	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	31
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	31
3.2.	OBTENÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	32
3.2.1.	<b>Imagens de índices de vegetação</b> .....	32
3.2.2.	<b>Imagens de precipitação</b> .....	37
3.3.	TENDÊNCIAS DE COMPORTAMENTO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	38
3.3.1.	<b>Tendências Interanuais</b> .....	38
3.3.2.	<b>Tendências sazonais</b> .....	40
3.4.	ANOMALIAS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E DA PRECIPITAÇÃO.....	43
3.5.	CORRELAÇÃO ENTRE IV E PRECIPITAÇÃO.....	44
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	46
4.1.	CONFIABILIDADE DOS DADOS MODIS PARA A REGIÃO DE ESTUDO.....	46
4.2.	TENDÊNCIAS DE COMPORTAMENTO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	47
4.3.	TENDÊNCIAS INTERANUAIS.....	49
4.4.	TENDÊNCIAS SAZONAIS.....	53
4.5.	ANOMALIAS DOS IV E DA PRECIPITAÇÃO.....	57
4.6.	CORRELAÇÃO ENTRE IV E PRECIPITAÇÃO.....	59
5.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	63
6.	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	64

## 1. INTRODUÇÃO

As florestas são áreas de grande relevância ambiental, pois seu ecossistema possibilita a manutenção de diversas espécies da fauna e contribui para a qualidade do solo e dos recursos hídricos. Além disso, Jackson et al. (2008) afirmam que a vegetação é um dos componentes mais importantes dos ecossistemas terrestres, responsável por regular o balanço de energia, ciclo da água e ciclo biogeoquímico na superfície terrestre por meio da fotossíntese, respiração, transpiração, albedo da superfície e rugosidade. Assim, a atividade fotossintética afeta o sistema climático no planeta e mantém a estabilidade do clima, juntamente com a transpiração (ANDERSON et al., 2010).

A vegetação é intimamente dependente do clima. As variações climáticas, principalmente no que se refere à alteração do balanço hídrico de regiões, ou à variação de temperatura fora dos padrões normais, podem causar grandes modificações não só nos limites dos biomas, mas também na distribuição e sobrevivência das espécies ali existentes (CORDEIRO et al., 2008).

Diante do exposto, torna-se cada vez mais importante a realização de pesquisas que relacionem as variações climáticas e seus efeitos na vegetação. Para isso, podem-se utilizar diferentes técnicas, como levantamentos de campo ou tecnologias de sensoriamento remoto. Li et al. (2006) relatam que os levantamentos de campo podem gerar informações precisas relacionadas com a dinâmica da vegetação, porém, são processos demorados e espacialmente limitados.

Por outro lado, o sensoriamento remoto oferece a possibilidade de monitorar grandes áreas da superfície terrestre com uma alta taxa de repetição. Parâmetros de sensoriamento remoto relacionados à cobertura vegetal e biomassa são adequados para detectar processos de paisagem, sendo a variação de quantidade de vegetação relacionada a causas como a mudança socioeconômica ou variabilidade climática. A análise de séries temporais torna-se adequada para o monitoramento da vegetação, em particular no que se pode diferenciar entre as mudanças reais e variações interanuais de fenologia causada por fatores externos como as mudanças nas condições climáticas (TURNER et al., 2007).

Com a finalidade de somar esforços em relação a preservação dos remanescentes florestais do bioma Mata Atlântica, surge a necessidade de novos

estudos relacionados ao comportamento temporal da vegetação ali existente e sua relação com mudanças na variabilidade climática.

O objetivo desta pesquisa foi analisar a tendência de comportamento da vegetação em bioma de mata atlântica, por meio de índices de vegetação do sensor MODIS, e sua correlação com a variabilidade dos dados mensais de precipitação do satélite TRMM.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DA VEGETAÇÃO

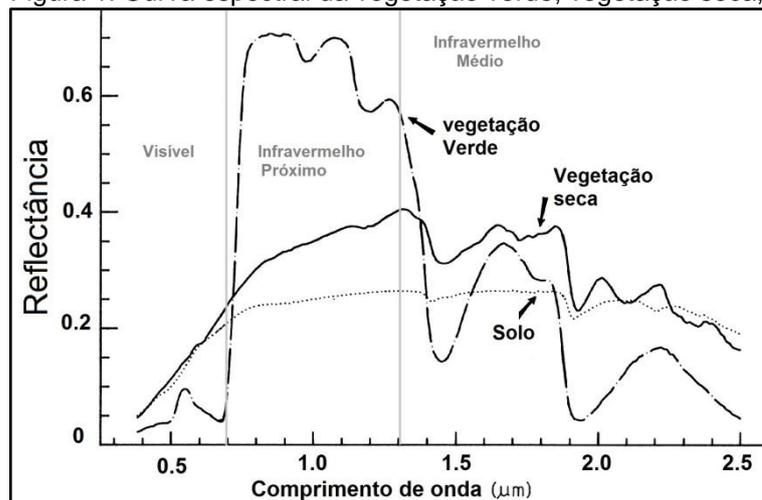
O sensoriamento remoto pode ser definido como o uso conjunto de instrumentos modernos (sensores), equipamentos para processamento e transmissão de dados e plataformas (aéreas ou espaciais) para carregar tais instrumentos e equipamentos, objetivando estudar o ambiente terrestre por meio do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra, em suas diversas manifestações (NOVO, 1989).

De acordo com Richards (1993), o sensoriamento remoto destaca-se dentre os métodos modernos para monitorar os ecossistemas terrestres graças a sua capacidade de fornecer informação de forma sinóptica, abrangendo áreas extensas e com alta frequência de aquisição. Além disso, a determinação do estado da vegetação local por meio de medições eco-fisiológicas são caros e demorados quando submetidos a grandes áreas e longos períodos de tempo, o que restringe seu manuseio em determinadas situações para modelagem do ambiente (MASELLI, 2004).

O Sol é a principal fonte de energia no sistema solar e, devido sua elevada temperatura, gera uma grande quantidade de energia que é irradiada para todo o espaço. A porção absorvida de energia solar pelos pigmentos contidos nas folhas corresponde a cerca de 50% do total de energia que a planta recebe. É utilizada nos processos de fotossíntese, fotoconversão, acelera reações como a fotooxidação das xantofilas, ou destrói estruturas de uma molécula. A outra parte da energia é refletida e uma terceira parte é transmitida, através das camadas das folhas que compõem a copa e daquelas que constituem as folhas (MOREIRA, 2011).

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). Por meio da Figura 1 é possível observar as diferenças de reflectância entre a vegetação verde, a vegetação seca e o solo, de acordo com os comprimentos de onda, representativos das faixas do espectro eletromagnético.

Figura 1. Curva espectral da vegetação verde, vegetação seca, e do solo



Fonte: Clark et al. (2003), adaptado pela autora.

Percebe-se que, na região de 0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$ , correspondente à faixa espectral do infravermelho próximo, os valores de reflectância estão no seu máximo para a vegetação. Nessa região, o comportamento da radiação eletromagnética quanto à reflectância, transmitância e absorbância é caracterizado pelas propriedades ópticas da folha e depende das estruturas celulares internas. A absorção é muito baixa (menos de 15%) e a reflectância é elevada (MOREIRA, 2011).

O monitoramento da vegetação por meio de técnicas de sensoriamento remoto geralmente é realizado utilizando índices de vegetação, que são operações matemáticas elaboradas com o objetivo de avaliar a contribuição espectral do verde das plantas em observações multiespectrais (GOWARD et al., 1994; TIESZEN et al., 1997; TUCKER, 1979; TUCKER e SELLERS, 1986).

Segundo Jensen (2009), um índice de vegetação ideal é aquele que consegue maximizar a sensibilidade aos parâmetros biofísicos das plantas, além de normalizar efeitos externos e internos em relação ao dossel, devendo ser acoplável à parâmetros biofísicos mensuráveis, seja a biomassa, o IAF ou FAPAR, para fins de validação e controle da qualidade.

De acordo com Moreira (2011), o índice de vegetação mais empregado para avaliar o vigor da cobertura vegetal é o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), que foi desenvolvido por Rouse et al. (1974) e é calculado pela equação 1:

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

Onde:  $\rho_{IVP}$  representa a reflectância na região do Infravermelho próximo e  $\rho_{VER}$  representa a reflectância na região do vermelho.

O NDVI traduz o contraste gerado pela absorção de pigmentos vermelhos pela clorofila e a alta reflectância do mesofilo na faixa do infravermelho próximo (BANNARI et al., 1995). Na prática, este índice é um indicativo da atividade fotossintética da planta e está relacionado ao Índice de área foliar (IAF) e à fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (FAPAR) (BANNARI et al., 1995; MA, VEROUSTRAETE; 2006). Segundo Justice et al.(2002), o NDVI possui rápida saturação, ou seja, é insensível ao aumento da biomassa vegetal a partir de determinado estágio de desenvolvimento.

Sendo assim, outro índice de vegetação, o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), foi desenvolvido para otimizar o sinal da resposta da vegetação, melhorando a sensibilidade em áreas com maiores densidade de biomassa. Esse índice propicia o monitoramento da vegetação por meio de um sinal de fundo de dossel e redução de influências atmosféricas (JUSTICE et al. 2002). É calculado pela equação 2:

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

Onde:  $\rho_{IVP}$  representa a reflectância na região do Infravermelho próximo,  $\rho_{VER}$  representa a reflectância na região do vermelho e  $\rho_{AZL}$  representa a reflectância na região do azul,  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes de ajuste para os efeitos de aerossóis na atmosfera,  $L$  é o fator de ajuste do solo e  $G$  é o fator de ganho ajustado.

## 2.2. PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

### 2.2.1. Sensor MODIS

O *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) é um dos principais sensores a bordo do satélite Terra EOS, lançado em dezembro de 1999, e do satélite Aqua, lançado em 2002. O EOS faz parte de um programa da NASA de longo prazo, visando pesquisas e análises da terra, dos oceanos, da atmosfera e suas interações (NASA, 2015). Segundo Justice et al. (2002), o objetivo desse programa é determinar as mudanças que estão ocorrendo no planeta Terra e quais as consequências das mesmas.

O MODIS possui uma largura de faixa de visualização de 2.330 km, imageando toda a superfície da Terra a cada um ou dois dias (Dependendo da posição geográfica). Possui órbita polar, e encontra-se a uma altitude de 705 km, com uma resolução radiométrica de 12 bits.

Possui 36 bandas espectrais e adquire dados em três resoluções espaciais: 250 m (Bandas 1 e 2), 500 m (Bandas de 3 a 7), 1000 m (Bandas de 8 a 36). Quanto ao tempo de geração de produtos pode ser diário, 8 dias, 16 dias, mensal, trimestral e anual (NASA, 2015). Para o estudo da vegetação, a faixa espectral utilizada corresponde aos comprimentos de onda entre 0,620 e 2,155  $\mu\text{m}$ , conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Características espectrais do sensor MODIS, para estudo da vegetação

Banda	Largura da banda ( $\mu\text{m}$ )	Faixa do espectro
1	0,620-0,670	Visível
2	0,841-0,876	Infravermelho próximo
3	0,459-0,479	Visível
4	0,545-0,565	Visível
5	1,230-1,250	Infravermelho próximo
6	1,628-1,652	Infravermelho médio
7	2,105-2,155	Infravermelho médio

Fonte: NASA, 2015; adaptado pela autora.

O dado bruto do sensor MODIS não é disponibilizado para os usuários, mas 44 produtos gerados por meio da combinação entre as bandas, que são destinados a

diversos estudos e em diferentes níveis de processamento. Os principais produtos encontram-se descritos na Tabela 2 (JUSTICE et al., 2002).

Tabela 2 - Principais produtos obtidos do sensor MODIS

<b>Nomenclatura</b>	<b>Produto</b>
<b>Produtos relacionados ao balanço energético</b>	
<b>MOD 09</b>	Reflectância de superfície
<b>MOD 11</b>	Temperatura da superfície da Terra e emissividade
<b>MOD 43</b>	Albedo
<b>MOD 10, MOD 29</b>	Cobertura de neve e extensão de gelo na superfície do mar
<b>Produtos relacionados à vegetação</b>	
<b>MOD 13</b>	Índices de vegetação NDVI e EVI
<b>MOD 15</b>	IAF e FAPAR
<b>MOD 17</b>	Fotossíntese líquida e produtividade primária
<b>Produtos voltados à cobertura terrestre</b>	
<b>MOD 12</b>	Mudança na cobertura da Terra e cobertura da Terra
<b>MOD 14</b>	Anomalias termais, fogo e queima de biomassa
<b>MOD 44</b>	Conversão da cobertura vegetal

Fonte: JUSTICE et al., 2002, adaptado pela autora.

### 2.2.2. Satélite TRMM

O satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) foi desenvolvido pela NASA em parceria com a JAXA e lançado em 27 de novembro de 1997, com o objetivo de monitorar e estudar a precipitação nos trópicos, permitindo verificar como esta influencia no clima global (KUMMEROW et al., 2000).

O satélite possui órbita oblíqua não-heliossíncrona e encontra-se a uma altitude de cerca de 403 km, com os seguintes instrumentos a bordo: imageador de microondas (TMI), radar de precipitação (PR), radiômetro no visível e no

infravermelho (VIRS), sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens (CERES), e sensor para imageamento de relâmpagos (LIS) (LINARES, 2012).

Segundo Collischonn (2006), o sensor de micro-ondas (TMI) é o principal sensor de medição de precipitação obtida por meio da lei inversa de Planck e correlação com temperatura de topo de nuvem. Para tornar as estimativas mais precisas é utilizado o radar de precipitação (PR), que é capaz de detectar taxas de precipitação muito baixas, da ordem de 0,7 mm.

As propriedades medidas pelos instrumentos TMI, PR e VIRS são, respectivamente, temperatura, potência e radiância. A partir de combinações sucessivas entre essas medidas e seu cruzamento com produtos de outros satélites, são obtidas as estimativas referentes à precipitação. Para refinar as medições, existe um programa de validação em campo (*Ground Validation*), por meio de radares meteorológicos em diversas estações ao longo da faixa intertropical (COLLISCHONN, 2006).

Os produtos de estimativa de chuva resultantes da missão TRMM são processados pelo *TRMM Science Data and Information System* (TSDIS) e disponibilizados operacionalmente pelo *Gooddard Distributed Active Archive System* (DAAC) (LINARES, 2012).

Dados oriundos do satélite TRMM têm sido amplamente utilizados em diversos trabalhos ao redor do mundo. O desempenho de seus produtos, em especial 3B42 e 3B43, foi analisado por autores como Collischonn et al. (2007) para a bacia do Paraguai superior (Brasil); Nóbrega et al. (2008a) na bacia do rio Jamari (Brasil); Nóbrega et al. (2008) para a bacia da Amazônia ocidental (Brasil); Fang et al. (2013) estudaram dados do TRMM para condições meteorológicas em área montanhosa na bacia do rio Xiao (China Central e do Sul); Duan e Bastiaanssen (2013) avaliaram a versão 7 do produto 3B43 na bacia do lago Tana (Etiópia) e região do mar Cáspio (Irã).

De modo geral, os resultados obtidos por meio do satélite TRMM foram considerados satisfatórios pelos autores supracitados. Os dados do satélite mostraram-se eficazes na análise de variabilidade sazonal, estimando corretamente a ausência de chuva (NOBREGA et al.; 2008a, 2008b). Contudo, de acordo com Nóbrega et al. (2008a), em alguns picos houve superestimação e subestimação dos dados quando comparados com dados de pluviômetros.

### 2.3. EFEITOS DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA VEGETAÇÃO

As variações climáticas constituem o principal agente de alterações na dinâmica da vegetação, por meio da diminuição na taxa fotossintética (SMITH et al., 2014), mudanças nos intervalos ecológicos de árvores (CHUMURA et al., 2011) e mudanças de regime (MCLAUCHLAN et al., 2014). Influenciam, sobretudo, na distribuição, estrutura e função da vegetação, o que sugere uma desvalorização da mesma sob a forma de bens e serviços (SMITH et al., 2014), estendendo os impactos à sócio-econômicos e de ecossistemas (SCHROTER et al., 2005).

Smith et al. (2014) argumentam que a capacidade de mensurar bens e serviços do ecossistema varia a uma taxa diferente à taxa de variação da vegetação com as mudanças climáticas, o que torna necessário indicadores de vulnerabilidade que possam fornecer dados de futuras reduções em bens e serviços ecossistêmicos. Outros fatores associados às alterações nos ecossistemas são a presença de insetos, doenças e ocorrência de queimadas (BOISVENUE, RUNNING, 2006; EASTELING, APPS, 2005; MOHAN et al., 2009).

Compreender como as mudanças climáticas impactam os ecossistemas terrestres naturais e os produtos e serviços associados é possível por meio de quatro métodos principais: a) investigação paleo-ecológica; b) experimentos controlados; c) modelagem de processos fisiológicos; e d) observações das mudanças de acordo com as variações no clima (SMITH et al., 2014).

Segundo Chen et al. (2014), a dinâmica de crescimento da vegetação é complexa e suas respostas não possuem linearidade com as mudanças climáticas globais ou outros fatores. Além disso, os autores reforçam que existe uma divergência de resultados de acordo com o comprimento da série temporal utilizada, e que esforços contínuos no monitoramento da mudança da vegetação, seja *in situ* ou por meio de dados de sensoriamento remoto, em escalas amplas são necessárias e fundamentais para a gestão dos ecossistemas, da biodiversidade e para o diagnóstico e adaptação às mudanças climáticas globais.

Diversos estudos constataram tendências de aumento do crescimento da vegetação no hemisfério Norte (BECK et al., 2011, SLAYBACK et al., 2003 e ZHOU et al., 2001), no Sahel (FENSHOLT et al., 2009 e OLSSON et al., 2005) e Austrália (DONOHUE, MCVICAR E RODERICK, 2009), o que é contraditório aos estudos realizados por GOETZ et al.(2005) e BECK et al.(2011) em florestas boreais;

evidenciando as diferenças substanciais de comportamento da vegetação de acordo com a localização no globo terrestre. Segundo Chen et al. (2014), o aumento do NDVI em regiões tropicais e subtropicais está relacionado a um aumento nos valores mínimos de NDVI estudados.

Maselli (2014) estudou as tendências de comportamento do NDVI no Parque Natural de Maremma, em Toscana, na Itália, e os resultados comprovaram a diminuição do NDVI no período avaliado. Fatores como intervenção humana, erosões costeiras e do solo, incêndios florestais, e influência de desbastes e cortes na área não foram considerados como justificativa de tal resultado, uma vez que trata-se de área protegida, sem intervenção humana, onde não foram registradas ocorrências de incêndios no período e as atividades de desbaste, corte, assim como erosão do solo, não causaram impacto significativo para a área, pois comprometem apenas pequenas superfícies florestais.

Os referidos autores, dessa forma, trabalharam com a hipótese de que a diminuição do NDVI estava relacionada à fator meteorológico, em especial à precipitação; pois, foram registrados, para o período, em diversas regiões italianas, diminuição das chuvas e as temperaturas mantiveram-se amenas durante todos os anos, com variações interanuais limitadas, de acordo com Brunetti et al. (2000). Como resultados, encontraram alta correlação, a 5% de probabilidade, entre a precipitação e NDVI em floresta de pinho.

A intensidade, duração e distribuição da precipitação afetam de formas diferentes o crescimento da vegetação. A precipitação com baixa duração e alta intensidade, por exemplo, gera escoamento superficial e drenagem dos córregos rapidamente, deixando pouca água disponível para a vegetação (DUAN, BASTIAANSEN; 2013). Além disso, existem outros fatores que influenciam no crescimento da vegetação e levam à uma alteração nos valores de NDVI, sejam eles tipo de solo, condições hidrológicas e uso da água para irrigação (JIA et al., 2011).

De acordo com Jong et al. (2012), a variabilidade da dinâmica da vegetação compreende as mudanças sazonais, mudanças de tendência gradual e alterações bruscas. Tratando-se de tendências graduais, são mudanças que ocorrem de forma lenta no ambiente, podendo parar ou reverter em algum intervalo de tempo. Para Chen et al. (2014), este tipo de estudo pode ser realizado para um curto período de tempo, abrangendo séries temporais inferiores a 30 anos de dados.

Dentre as metodologias empregadas para estudo de mudanças nas tendências fotossintéticas da vegetação, os mais difundidos são: a) estimativas anuais em

séries temporais; b) estimativas baseadas em modelos de tendências sazonais; e c) métodos baseados na desazonalidade em séries de tempo, com remoção da sazonalidade para estimativa de tendências. Neste último enquadram-se dois métodos, sejam utilizando a média anual do ciclo ou um ciclo anual baseado em análises simplificadas do espectro (CHEN et al., 2014).

O uso de séries multi-temporais de imagens de satélites permite acompanhar o comportamento de diferentes alvos na superfície. Séries temporais de contínua observação da Terra baseadas em estimativas de vegetação têm melhorado significativamente a compreensão das variações intra e interanuais na vegetação de uma região em escala global (FENSHOLT et al., 2013).

Reed et al. (1994), utilizando série temporal de imagens do sensor AVHRR de NDVI, confirmaram a possibilidade de monitorar a variabilidade da fenologia vegetal a partir do sensoriamento remoto. Além disso, foi possível a separação de diferentes tipos de culturas agrícolas e florestais e a percepção de sua forte relação com a variação do NDVI e fatores climáticos.

Visando monitorar a variação da fenologia, Zhang et al. (2006) utilizaram séries temporais de imagens de NDVI do sensor MODIS para a determinação das fases de transição dos ciclos da vegetação para o Nordeste dos Estados Unidos. Chegaram à conclusão de que a metodologia desenvolvida, além de obter as datas de transição de forma espacial na escala de pixel, não é dependente do período temporal considerado.

## 2.4. VALORAÇÃO DA NATUREZA

Os ecossistemas naturais proporcionam uma série de benefícios, dentre os quais encontram-se a regulação climática, regulação de fluxos hidrológicos, sequestro e armazenamento de carbono, conservação da biodiversidade, ciclagem de nutrientes e beleza cênica (COSTA, 2008). São denominados de serviços ecossistêmicos, os múltiplos serviços fornecidos pelo ecossistema cujos elementos constitutivos não são de clara identificação (WUNDER, 2006).

A valoração dos recursos ambientais ou serviços ambientais é caracterizado pela geração de externalidades, ou seja, pelos impactos das ações de um indivíduo sobre outro e não em um sistema de preços. São exemplos de externalidades, o sequestro de carbono, perda ou conservação da biodiversidade, proteção ou degradação dos corpos d'água (KOSOY et al., 2006).

Embora importante para a sociedade, os serviços ambientais encontram-se ameaçados pela falta de manejo adequado de florestas e ecossistemas naturais, o que ocasiona deterioração da cobertura vegetal, do solo e da água; pela redução da diversidade genética e pelas mudanças climáticas, que comprometem o funcionamento do ecossistema e promove perdas socioeconômicas (WUNDER, 2006).

O pagamento por serviços ambientais é um instrumento útil nos casos em que a informação das externalidades está ausente e onde há diversos potenciais beneficiários (WUNDER, 2006). No pagamento de serviços ambientais, o princípio é que duas partes podem negociar um acordo que beneficie a ambos (KOSOY et al., 2006).

#### 2.4.1. Conservação da natureza

A conservação da biodiversidade representa um dos maiores desafios na atualidade, devido ao alto nível de perturbações antrópicas dos ecossistemas naturais. Uma das principais consequências dessas perturbações é a fragmentação de ecossistemas naturais (VIANA, PINHEIRO, 1998).

De acordo com Drumond (2002), uma das principais estratégias adotadas pelos governos para conservação da diversidade biológica é a criação de Unidades de Conservação (UCs), definidas como o espaço territorial e seus recursos ambientais, nos quais se incluem as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo poder público, com o objetivo de conservação e que está sujeita às medidas que garantam sua proteção (BRASIL, 2011).

A função básica das UCs é separar elementos da biodiversidade de processos que ameacem sua permanência na natureza. O grau em que essas unidades cumprem com sua função depende de quão bem elas atingem dois objetivos. O primeiro, de representatividade, de como amostram toda a sua variedade em biodiversidade, em todos os níveis de organização. O segundo, de persistência, relacionada a sobrevivência a longo prazo das espécies e demais elementos da biodiversidade (MARGULES, PRESSEY, 2000).

As UCs são de grande importância para conservação, pois impedem o avanço da supressão vegetal e criam na região da sua influência ambiente favorável à conservação da biodiversidade. Além disso, em seu entorno instalam-se processos de informação e capacitação da população sobre a importância da conservação do meio ambiente na melhoria da qualidade de vida. Essas áreas estão relacionadas com a melhoria na qualidade do ar, o abastecimento de água, a contenção de erosões, ecoturismo, e com o desenvolvimento sustentável de modo geral (BRASIL, 2011).

É importante salientar também a importância da zona de amortecimento. Trata-se de uma região no entorno da unidade de conservação, onde as atividades humanas estão sujeitas a normas e restrições específicas, tendo como intuito minimizar os impactos negativos sobre a unidade (BRASIL, 2010). É uma área que não pertence ao interior da unidade de conservação, porém objetiva filtrar os impactos negativos das atividades externas a ela, como ruídos, poluição, espécies invasoras e avanço da ocupação humana (MILLER, 1997).

A definição de uma zona de amortecimento não impede o desenvolvimento de atividades econômicas em sua extensão e não há desapropriação de terras. Porém é essencial para o manejo da UC, uma vez que possibilita aos gestores da unidade estabelecer medidas de controle e negociar com comunidades locais sobre o uso dessa área (GANEM, 2015).

Qualquer atividade que possa afetar a biota é obrigatoriamente passível de licenciamento ambiental. Além disso, o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), em seu artigo 49, destaca que, uma vez definida a zona de amortecimento, a partir do plano de manejo da unidade de conservação, esta não pode ser convertida em área urbana. A tendência é que as pressões sobre uma unidade de conservação ocorram de fora para dentro, assim, a existência de uma

zona de amortecimento torna-se importante para evitar que haja degradações na UC e para que esta cumpra efetivamente com o objetivo da sua criação (GANEM, 2015).

No Brasil, outra forma de uso e proteção à biodiversidade é instituída por meio da lei nº 12.651, de 2012, o código florestal. Nessa lei, as florestas e outras formações vegetais são declaradas de interesse comum, definindo-se limites para o uso privativo desses recursos, sejam em Áreas de Preservação Permanente (APP) ou Reserva Legal (RL).

Conforme definido no Código Florestal, as APPs são áreas protegidas, cobertas ou não por vegetação nativa, e tem a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, a proteção do solo e assegurar o bem-estar das populações humanas.

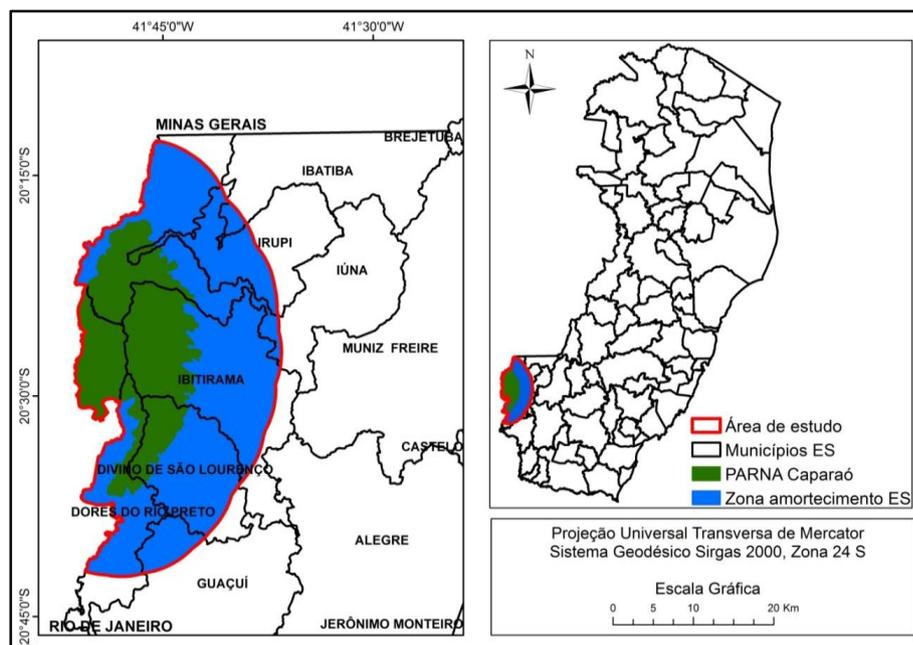
As áreas de Reserva Legal (RL) são áreas localizadas no interior de uma propriedade rural, com a função de assegurar o uso econômico de modo sustentável dos recursos naturais do imóvel rural, auxiliar a conservação e a reabilitação dos processos ecológicos e promover a conservação da biodiversidade (BRASIL, 2012).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange o Parque Nacional do Caparaó (PARNA Caparaó) e parte da sua zona de amortecimento, definida como uma faixa de 10 km de distância a partir dos limites do Parque, de acordo com o que foi estabelecido em seu plano de manejo. Localiza-se na divisa do Sudoeste do estado do Espírito Santo com Minas Gerais, entre os paralelos 20°12' e 20°42' de latitude Sul e os meridianos 41°52' e 41°38' de longitude Oeste, correspondendo a uma área de 970,01 km<sup>2</sup> (Figura 2). Engloba parcialmente os municípios de Iúna, Ibatiba, Irupi, Ibitirama, Divino de São Lourenço, Guaçuí e Dolores do Rio Preto, no estado do Espírito Santo.

Figura 2. Localização da área de estudo



Fonte: a autora.

O clima da região enquadra-se no tipo CwB, de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado como clima tropical de altitude, onde o relevo assume grande importância na determinação das diferenças de temperatura. A temperatura média anual varia entre 19°C e 22°C, sendo as mínimas de -4°C nos picos mais altos do parque (IBAMA, 1995). A pluviosidade média anual é de 1.400 mm, mas pode

chegar até 1.750 mm. As chuvas concentram-se no trimestre de novembro a janeiro, correspondendo de 35 a 50% das precipitações anuais. Entre junho e agosto encontram-se as menores médias anuais, embora este fator varie em consequência do relevo local (IBDF, 1981).

O PARNA Caparaó possui uma área aproximada de 317,03 km<sup>2</sup>, dos quais cerca de 80% encontram-se localizados no estado do Espírito Santo e o restante no estado de Minas Gerais. Está inserido na província biogeográfica da floresta pluvial do Brasil de Udvardy, sendo pertencente ao domínio de Mata Atlântica. (IBAMA, 1995).

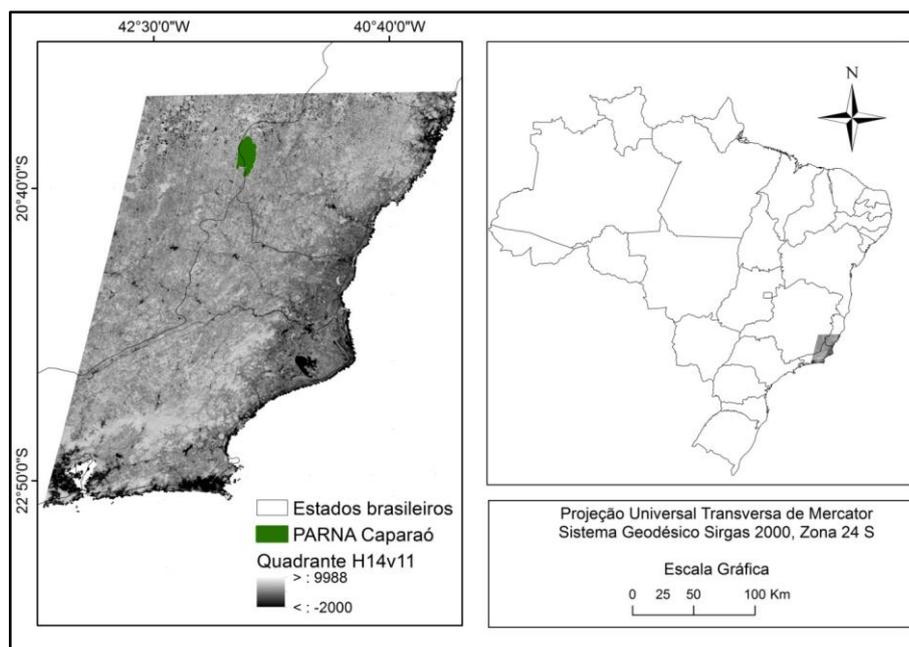
## 3.2. OBTENÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

### 3.2.1. Imagens de índices de vegetação

Os dados de índices de vegetação utilizados foram obtidos do satélite Terra, sensor MODIS, produto MOD13Q1, quadrante h14v11, abrangendo a área apresentada na Figura 3, onde encontra-se inserido o Parque Nacional do Caparaó e seu entorno.

Essas imagens são disponibilizadas de forma gratuita no site da NASA, com dados obtidos desde 2000. Neste estudo, porém, os dados utilizados correspondem aos anos de 2001 a 2014, totalizando 322 imagens de satélite, conforme Tabela 3. Isso porque, é importante que a série temporal possua o mesmo número de imagens em todos os anos de estudo, e para o ano de 2000 as primeiras imagens datam de fevereiro.

Figura 3. Área imageada pelo sensor MODIS, correspondente ao quadrante h14v11



Fonte: a autora.

Tabela 3 - Datas das imagens MODIS utilizadas para o estudo

Anos	Aquisição das Imagens (Ano)	Datas					
<b>Bissextos</b>		01/01	17/01	02/02	18/02	05/03	21/03
	2004						
		06/04	22/04	08/05	24/05	09/06	25/06
	2008						
	2012	11/07	27/07	12/08	28/08	13/09	29/09
		15/10	31/10	16/11	02/12	18/12	-
<b>Normais</b>	2001, 2002	01/01	17/01	02/02	18/02	06/03	22/03
	2003, 2005,	07/04	23/04	09/05	25/05	10/06	26/06
	2006, 2007,	12/07	28/07	13/08	29/08	14/09	30/09
	2009, 2010,						
	2011, 2013 e 2014	16/10	01/11	17/11	03/12	19/12	-

Fonte: a autora.

O produto MOD13Q1, disponibilizado como arquivo compactado em formato .hdf, é composto por sete imagens, a saber: imagem NDVI, imagem EVI, imagem de qualidade VI Quality, imagem de confiabilidade Pixel Reliability e as imagens da reflectância referentes às bandas utilizadas para geração do NDVI e EVI (Bandas 1, 2 e 3).

As imagens NDVI e EVI são processadas a cada 16 dias, sendo a primeira a partir das bandas 1 e 2; e a segunda a partir das bandas 1, 2 e 3, referentes à reflectância nas faixas do vermelho, infravermelho próximo e azul, respectivamente. A geração das mesmas é feita a partir da composição do máximo valor de pixel no período de 16 dias. Assim, os valores de cada pixel são os máximos nesse período, podendo corresponder a datas diferentes.

As imagens de qualidade VI Quality e de confiabilidade Pixel Reliability são utilizadas para a extração dos pixels “espúrios” nas imagens NDVI e EVI, resultados de ruídos e/ou presença de nuvens. Os valores e significados das imagens de confiabilidade Pixel Reliability variam conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de confiabilidade para o NDVI e EVI, obtidos a partir das imagens Pixel Reliability

<b>Valor do pixel</b>	<b>Qualidade</b>	<b>Descrição</b>
<b>-1</b>	Sem dado	Não processado
<b>0</b>	Dado bom	Pode ser usado com confiança
<b>1</b>	Dado marginal	Pode ser usado, mas olhe outra informação de qualidade
<b>2</b>	Neve/gelo	Alvo coberto de gelo ou neve
<b>3</b>	Nuvem	Não há visibilidade, por causa da cobertura por nuvens

Fonte: Didan et al., 2015, adaptado pela autora.

Quanto aos valores de qualidade das imagens VI Quality, Moraes e Rocha (2011), encontraram a partir das combinações dos valores em bits disponibilizados pela NASA, que o intervalo válido a considerar como pixels “desejáveis” é de 4 a 37.572.

De acordo com Moraes (2012), o objetivo dessas imagens é eliminar pixels com presença de nuvens, assegurando a qualidade e consistência dos dados. Além disso, apesar de as imagens NDVI e EVI possuírem o mínimo de nuvens, os produtos de VI Quality e Pixel Reliability são importantes, pois permitem a eliminação de pixels com problemas desde ruídos a nuvens e melhora a utilização de produtos MOD13Q1 (MORAES, ROCHA, 2011).

As imagens MODIS são disponibilizadas na projeção sinusoidal e referenciadas para o Norte dos Estados Unidos, sendo necessárias as correções da projeção, sistema de referência e localidade. Para isso, foi utilizado o *software Modis Reprojection Tools* (MRT), que é de acesso livre com download disponível no site da NASA.

Inicializado o aplicativo, os dados preenchidos foram: As imagens de entrada, o quadrante da área de estudo (para proceder com o recorte), o local de saída dos dados, o formato dos dados de saída como .GeoTiff, sistema de coordenadas geográfica e projeção UTM zona 24 S.

Após realizada essa etapa, as imagens NDVI, EVI, Pixel reliability e VI Quality foram importadas para o *software ArcGis 10.2.2*, onde foi realizado o recorte da área de estudo e extração dos pixels indesejados das imagens de índices de vegetação. O recorte das imagens foi realizado tendo como base arquivo vetorial em formato *shape*, representativo da área do Parque Nacional do Caparaó e a parte capixaba de sua zona de amortecimento. Esse arquivo foi gerado a partir de um arquivo representativo do limite do Parque Nacional do Caparaó obtido do banco de dados do Geobases, aplicando-se um buffer de 10 km referente à zona de amortecimento do Parque, no estado do Espírito Santo.

Imagens de índices de vegetação de composição máxima dos pixels possuem quantidade reduzida de nuvens e ruídos atmosféricos, mantendo informações da dinâmica da vegetação. Contudo, é importante nas etapas de pré-processamento dos dados, eliminar pixels que foram afetados por nuvem (YU et al., 2003). Sendo assim, foram criadas máscaras das imagens de confiabilidade “Pixel reliability”, 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). Esse procedimento não foi aplicado às imagens VI Quality, uma vez que as mesmas não acusaram pixels espúrios para a região de estudo.

Cada máscara resultante foi somada às imagens NDVI e EVI da data correspondente, para extração dos pixels espúrios, que receberam valor NoData. Após essa etapa, as imagens foram exportadas, em formato .img para o software TerrSet. Foi criado um arquivo de série temporal para cada grupo de imagens, NDVI e EVI. Uma série temporal consiste em um par de arquivos: Um arquivo de varredura contendo as imagens da série de tempo, em formato .rgf e um arquivo de documentação que descreve as características temporais da série, em formato .tsf.

Com o intuito de preencher os dados faltantes nas imagens representativas das séries temporais (Valores NoData, referentes aos pixels espúrios), foram utilizadas etapas sucessivas de interpolação. Primeiramente, procedeu-se com 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 só preenche o valor do pixel caso a maioria dos seus vizinhos possua um valor válido.

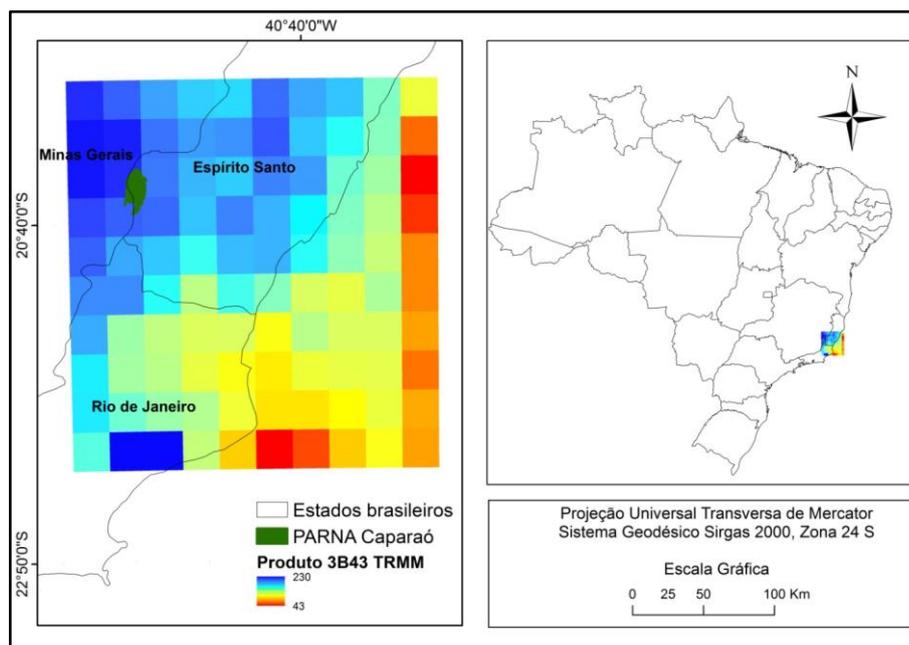
Então, utilizou-se o método de interpolação linear, no qual o preenchimento do valor do pixel baseia-se nos valores médios do mesmo pixel em imagens anteriores e posteriores à data a ser preenchida. O preenchimento é realizado de forma linear, porém só são preenchidos dados até uma lacuna máxima permitida. Por fim, foi utilizado o método de interpolação por média temporal ou climatologia. Por meio desse método, os valores em falta são preenchidos de acordo com uma mediana a longo prazo dos valores das imagens da série temporal.

Chen et al. (2014) ao utilizarem dados de NDVI do satélite NOAA, produto GIMMS para estudar tendências de comportamento da vegetação, procederam de forma análoga, ao eliminarem os pixels sinalizados como neve ou nuvens nas imagens e posteriormente utilizarem técnicas de interpolação para preenchimento das lacunas.

### 3.2.2. Imagens de precipitação

Os dados de precipitação foram obtidos do satélite TRMM, produto 3B43, versão v7 e v6A (Para as datas que não possuíam versão v7), abrangendo quadrante onde se encontra a área de estudo, conforme a Figura 4.

Figura 4. Quadrante selecionado para download das imagens TRMM



Fonte: a autora.

Esses dados encontram-se disponíveis de forma gratuita no sítio da NASA, referentes ao período de 1998 a 2015. Com o intuito de correlacionar esses dados aos índices de vegetação, foi realizado download das imagens correspondentes ao período de 2001 a 2014. Tratando-se de dados mensais, foram obtidas 168 imagens referentes à precipitação, do dia 01 de cada mês.

Os dados foram obtidos em formato .NetCDF, na plataforma mirador, no site da NASA. De acordo com a NASA (2015), o algoritmo 3B43 tem como objetivo estimar a melhor taxa de precipitação em um mês, de acordo com um erro quadrado médio (RSM). Estas estimativas possuem uma resolução espacial em grade de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , se estendendo de  $50^\circ$  de latitude Sul a  $50^\circ$  de latitude Norte. É resultado de uma combinação da fusão de alta qualidade de dados a cada 3 horas/IR com a precipitação acumulada mensal global do centro de climatologia (GPCC) com auxílio de pluviômetros. A taxa de precipitação média mensal é descrita

em  $\text{mm.h}^{-1}$  e para obtenção da precipitação acumulada mensal, em mm, é necessária a multiplicação do valor disponibilizado pelo número de horas mensais.

Após download dos dados, os mesmos foram importados para o *software* ArcGis 10.2.2, onde inicialmente foi feita reamostragem dos pixels, para converter a resolução espacial para 250 x 250 m (Resolução do sensor MODIS). As imagens foram reprojctadas para o sistema de referência SIRGAS 2000 zona 24 S e recortadas a partir do arquivo vetorial em formato *shape* representativo da área de estudo.

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

### 3.3. TENDÊNCIAS DE COMPORTAMENTO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

O processamento e análise das tendências de comportamento dos IVs, foi realizado com auxílio do módulo Earth Trends Modeler (ETM), no *software* TerrSet. Esse módulo foi elaborado especialmente para análise de tendências e características dinâmicas dos fenômenos ambientais, com base em séries temporais.

#### 3.3.1. Tendências Interanuais

Foram gerados os perfis temporais dos índices de vegetação NDVI e EVI, para análise do seu comportamento ao longo dos anos de 2001 a 2014. Estes perfis temporais foram comparados, a fim de verificar as diferenças existentes entre os dois índices no estudo da dinâmica da vegetação. Ao longo dos mesmos, foi traçada

uma linha de tendência linear, para possibilitar melhor visualização de possíveis aumentos ou diminuições dos valores ao longo do tempo.

Com o objetivo de compreender como ocorrem as mudanças de comportamento interanual da vegetação, espacialmente, na área de estudo, foram analisadas tendências de comportamento, conforme os métodos descritos a seguir:

**Linearidade:** Por meio deste método é gerado o coeficiente de determinação  $R^2$ , tomando como base uma regressão linear entre os valores de cada pixel da série temporal e uma série linear. Na prática, expressa o grau em que uma tendência linear está presente na série estudada.

**Correlação linear:** É resultado de uma correlação linear de Pearson, entre os valores de cada pixel da série temporal e uma série linear. O coeficiente de correlação de Pearson avalia o grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente varia entre os valores “-1” e “1”, sendo o valor “0” associado à ausência de relação linear, o valor “1” à uma relação linear perfeita e o valor “-1” associado à uma relação linear perfeita, mas inversa, ou seja, quando uma das variáveis aumenta a outra diminui.

O coeficiente de correlação de Pearson é calculado por meio da seguinte equação (equação 3):

$$r = \frac{\sum(x_1 - \bar{x})(y_1 - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_1 - \bar{x})^2)(\sum(y_1 - \bar{y})^2)}} \quad (3)$$

Onde  $r$  é o coeficiente de correlação de Pearson,  $x$  e  $y$  são os valores da série temporal e da série linear gerada, respectivamente.

**Tendência Linear:** É resultado do cálculo do coeficiente angular de uma regressão de mínimos quadrados entre os valores de cada pixel da série e uma série linear. Na prática, expressa a taxa de variação dos dados para o período entre cada imagem da série.

**Tendência mediana:** Representa o valor mediano calculado das inclinações entre todas as combinações de pares na série de tempo. É um método não-paramétrico, capaz de medir a taxa de alteração, inclusive em séries curtas e com presença de ruídos.

**Tendência monotônica (Mann-Kendall):** É um indicador de tendência não linear, capaz de inferir o grau em que uma tendência é crescente ou decrescente.

Varia de -1 a +1, sendo que o valor de +1 indica uma tendência crescente e que nunca diminui, e -1 indica uma tendência decrescente e que nunca aumenta. Seu cálculo é realizado por meio de pares de valores ao longo do tempo, onde é contabilizada a diferença entre os acréscimos e decréscimos relativos na série.

A estatística do teste, segundo Silva et al. (2010), é a seguinte (equação 4):

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(\hat{x}_i - \hat{x}_j) \quad (4)$$

Em que  $\hat{x}_i$  representa os valores das imagens na série temporal,  $\hat{x}_j$  são os valores na série temporal estimada,  $n$  é o comprimento da série,  $(x_i - x_j)$  representa o sinal da série; se é negativa, positiva, ou zero.

### 3.3.2. Tendências sazonais

**Análise de tendência Sazonal (STA):** Este método utiliza duas etapas de análise de séries temporais para encontrar as tendências na forma de curva sazonal, com o objetivo de descrever as tendências de carácter essencialmente sazonal, rejeitando ruídos e variabilidades de curto prazo. Na primeira etapa, cada ano de dados é submetido à uma regressão harmônica, para extrair a amplitude e a fase de ondas senoidais com uma frequência anual e semestral, juntamente com a média anual (o termo de interceptação, conhecido como amplitude 0). Nessa primeira etapa são produzidos cinco parâmetros, de forma a descrever o ciclo sazonal: amplitude 0 (Média anual), Amplitude 1 e fase 1 (ciclo anual), Amplitude 2 e fase 2 (ciclo semi-anual).

Na segunda etapa, um declive médio de Theil-Sen é calculado, ao longo do tempo, para cada pixel, para cada uma das cinco séries de tempo geradas na etapa anterior, para a fase 1. O procedimento STA rejeita dois tipos de ruídos: Um sub-anual, com uma frequência de menos de seis meses e uma variabilidade interanual para 29% de toda a série estudada. Concentra-se, assim, em uma caracterização generalizada das tendências de longo prazo na sazonalidade.

Como resultados desta análise são fornecidas imagens, uma representando as fases e outra representando as amplitudes, em que o valor RGB é atribuído à amplitude 0, amplitude 1 e amplitude 2, respectivamente, no caso da imagem de amplitude. Para a imagem de fase os valores de RGB são atribuídos à amplitude 0, fase 1 e fase 2, respectivamente. Além disso, é possível visualizar as curvas da natureza da tendência.

Manipulando o painel de resultados, é possível identificar os períodos de ocorrência de *green-up* e *green-down*. Esses dois termos dizem respeito às etapas da fenologia da planta, referentes ao aumento e diminuição da biomassa, respectivamente, representados na curva de crescimento ou desenvolvimento da mesma. Segundo DeFries et. al (2005), *green-up* é definida como uma medida fenológica que descreve o aumento da taxa de atividade durante a fase de crescimento da vegetação, da emergência à maturação. Pode ser utilizado como uma medida indireta da taxa de acumulação da biomassa ao nível de copa.

**Transformada de ondaletas (*Wavelets*):** A transformada de ondaletas surgiu em sua forma contínua a partir dos trabalhos de dois pesquisadores franceses: J. Morlet, um geofísico, e A. Grossmann, um físico teórico (MORETTIN, 1999). Ondaletas podem ser utilizadas para diversas finalidades, entre elas a busca de padrões de eventos anômalos ao longo do tempo. Um padrão seria um ciclo perfeito, ou seja, um movimento de oscilação consistente ao longo do tempo, como uma onda sinusoidal.

Uma ondaleta pode ser entendida como uma pequena onda ou uma onda que aparece brevemente (EASTMAN, 2015). O procedimento consiste na dilatação ou compressão de uma função-mãe em um conjunto de pequenas ondas, capazes de detectar as altas e baixas frequências em uma série de dados, possibilitando a análise em diferentes escalas temporais (ROSEMBACK, 2007).

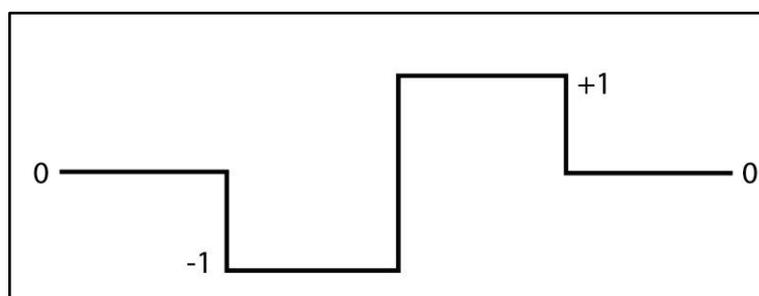
Existe uma variedade de ondas, dentre elas a ondaleta de *Haar*. De acordo com Graps (1991), a partir deste método pode-se pensar nos coeficientes como um filtro. Esses coeficientes são colocados em uma matriz de transformação e ordenados usando dois padrões dominantes, um funciona como filtro de suavização e o outro disponibiliza informações detalhadas dos dados. A matriz é aplicada em um algoritmo hierárquico, chamado algoritmo de pirâmide. Os coeficientes da ondaleta são dispostos de modo que as linhas ímpares contêm os coeficientes que

agem como filtro de suavização, e as demais linhas agem no sentido de realçar os detalhes dos dados.

A matriz é aplicada em primeiro lugar ao vetor de comprimento inicial completo. Em seguida, o vetor é suavizado e reduzido para metade, e a matriz é aplicada novamente. Essa metade do vetor é suavizada, e metade suavizada outra vez, e a matriz aplicada mais uma vez. Este processo continua até que um número significativo de dados permaneça suavizado. Isto é, cada aplicação da matriz traz uma maior resolução dos dados e ao mesmo tempo suaviza os dados restantes com os detalhes de componentes acumulados.

Em ETM é utilizada uma ondaleta inversa de *Haar*, que pode ser representada pela Figura 5.

Figura 5. Representação da ondaleta inversa de *Haar*



Fonte: EASTMAN (2015).

O gráfico acima representa uma série de pesos ao longo de quatro amostras adjacentes para um único pixel no tempo. Aplicando-se o filtro de ondaleta para qualquer pixel, é possível determinar o grau em que a ondaleta está presente em qualquer momento no tempo. Este filtro é deslizado para os dados da série, até aumentar o número de meses em cada metade do filtro de *Haar* por um. A cada nível, ocorre uma mudança de escala de tempo progressivamente, com menos duas amostras em cada escala (considerando que não há vizinhos para o cálculo das primeiras e últimas amostras de cada escala). O resultado é mostrado de forma gráfica, em forma de pirâmide, com o início do período correspondendo à escala de ganho entre a primeira metade da série e a última.

### 3.4. ANOMALIAS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E DA PRECIPITAÇÃO

Com o objetivo de detectar diferenças de comportamento fora da normalidade, características de eventos anômalos, tais como os fenômenos climáticos El Niño e La Niña, foram calculadas as anomalias dos índices de vegetação e da precipitação. As mesmas foram calculadas por meio da diferença entre a média dos dados para cada repetição e a média correspondente à todo o período.

Segundo Steinmetz et. al (2004), fenômenos como El Niño e La Niña possuem importante participação na variabilidade das condições meteorológicas, principalmente no regime de nebulosidade e de precipitação pluvial, que por consequência afetam a vegetação.

O fenômeno climático El Niño é um evento não cíclico, caracterizado pelo aumento da temperatura superficial e sub-superficial das águas do Oceano Pacífico Equatorial. Tal anomalia influencia a interação oceano-atmosfera, cuja troca de energia e umidade é responsável pelo comportamento do clima, em escala regional e global. Pode ocasionar tanto chuvas intensas como fortes secas, dependendo da região do planeta (ROSEMBACK et al., 2013).

O fenômeno La Niña, é o episódio frio do Oceano Pacífico. É caracterizado pela queda da temperatura superficial do Oceano Pacífico Equatorial e Central. Esta diminuição de em média 3,5°C se dá numa estreita faixa (10 graus de latitude) que se estende da costa do Peru até 180 graus de longitude. Na ocorrência de La Niña, os ventos alísios são mais intensos e o Índice de Oscilação Sul apresenta valores positivos, os quais indicam aumento da pressão no Pacífico Central e Oriental em relação à pressão no Pacífico Ocidental (ROSEMBACK et al., 2013).

Para o cômputo das anomalias e geração da sua representação como uma série temporal, em ETM, foi elaborado o que é conhecido como uma climatologia da série como um todo. No caso dos dados mensais, como os de precipitação utilizados neste estudo, ele elabora uma média de janeiro a fevereiro, de fevereiro a março e assim por diante. Sequencialmente, subtrai de cada valor encontrado, a média a longo prazo de cada mês. Exemplificando, a imagem de anomalia para janeiro de 2001, por exemplo, seria igual a janeiro de 2001 menos a média de todos os meses

de janeiro, de 2001 a 2014. Para os dados de IV, o processamento é análogo, porém considerando que os dados variam de 16 em 16 dias.

Após o processamento das anomalias, foram gerados os perfis temporais das mesmas, a fim de verificar possíveis efeitos de ocorrência de eventos anômalos que pudessem ter exercido influência sobre os resultados anteriores de tendências de comportamento dos dados.

### 3.5. CORRELAÇÃO ENTRE IV E PRECIPITAÇÃO

Para correlacionar os dados de IV com dados de precipitação, inicialmente fez-se necessário a geração de séries temporais mensais para os IV, uma vez que as séries criadas para análises anteriores constavam de dados num período de 16 em 16 dias, e a série temporal dos dados de precipitação é mensal.

Isso foi feito na guia de pré-processamento, no painel de geração e edição de séries, na opção de séries agregadas, no módulo ETM do *software* TerrSet. Essa opção possibilita a geração de uma nova série com resolução temporal maior do que a série original. As novas séries foram geradas considerando a média dos valores mensais. Feito isso, foram gerados os perfis temporais dos índices de vegetação, NDVI e EVI, e da precipitação.

**Modelagem linear:** As correlações entre o NDVI e a precipitação, e entre o EVI e a precipitação, foram processadas por meio da ferramenta de modelagem linear, no módulo ETM, no *software* TerrSet. Esta metodologia utiliza uma regressão múltipla, sendo os resultados mostrados em forma de mapas que expressam os coeficientes de correlação R e R<sup>2</sup>.

Para ambas as correlações, não foram aplicadas técnicas de avaliação e remoção da correlação dos resíduos das análises de regressão, o que é comum de acontecer em modelagens de regressão entre séries temporais (KIRCHNER, 2013).

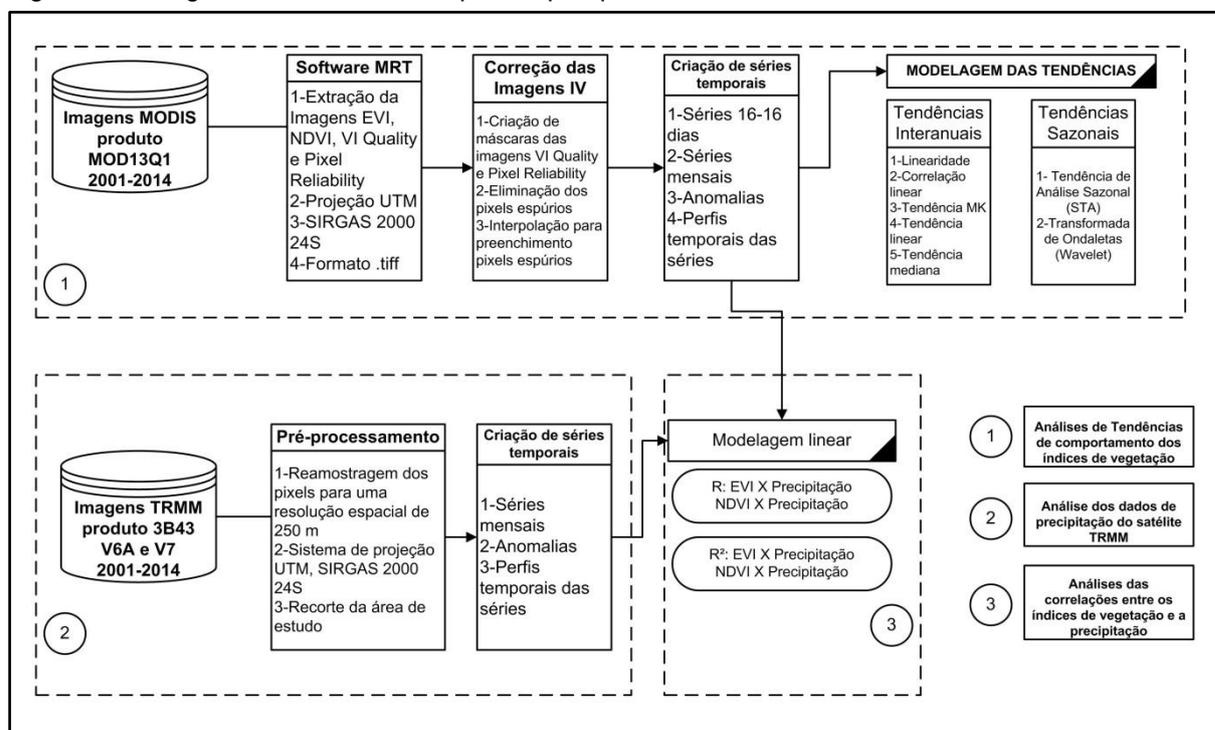
A série correspondente a cada índice de vegetação foi considerada como a série dependente e a série temporal correspondente à precipitação foi considerada como série independente. Esse procedimento foi realizado para diferentes

defasagens, de -3 a +3, com intuito de verificar em qual defasagem há maior correlação entre as séries. Esses limites foram utilizados de acordo com a verificação de aumentos/diminuições nos valores obtidos anteriormente.

Na prática, isso indica qual o tempo de resposta da vegetação à precipitação. Considerando uma defasagem 0, o resultado refere-se à correlação da vegetação com a precipitação na data em que se ocorreu a precipitação, ou seja, considera os efeitos da chuva no mesmo mês na precipitação. De forma análoga, uma defasagem de 1, considera os efeitos de uma precipitação do mês anterior na vegetação, e assim por diante.

A Figura 6 simplifica as etapas metodológicas descritas.

Figura 6. Fluxograma contendo as etapas da pesquisa



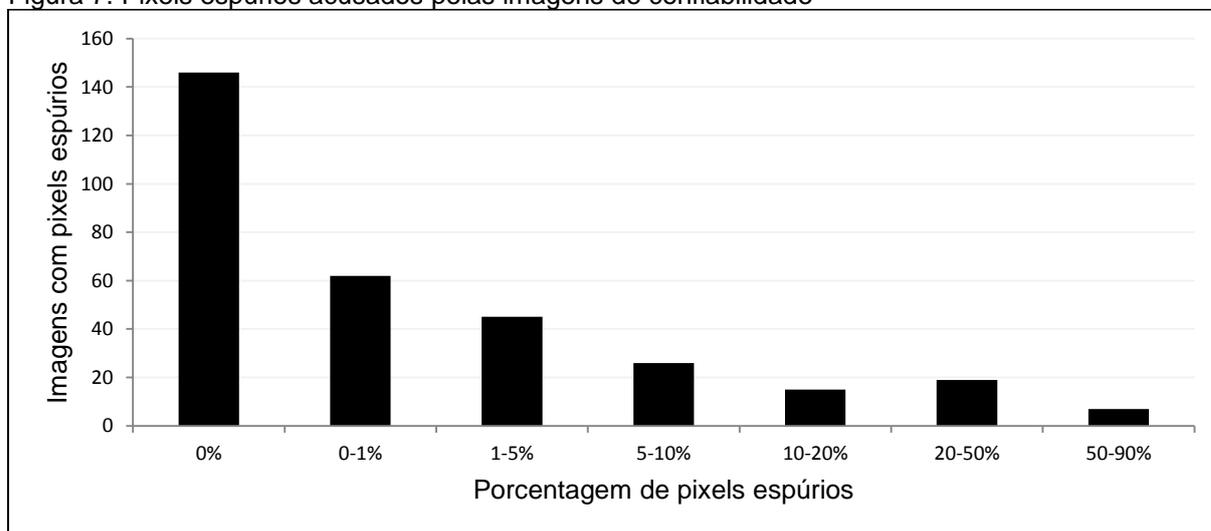
Fonte: a autora.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. CONFIABILIDADE DOS DADOS MODIS PARA A REGIÃO DE ESTUDO

Dentre as 322 imagens *Reliability*, utilizadas para obtenção da confiabilidade dos IV, a maior parte não acusou presença de pixels espúrios ou esse valor foi inferior a 1% (muito pequeno), representando aproximadamente 64,6% de todas as imagens. Considerando que até 10% de presença de pixels espúrios, caracterizados por nuvens e/ou ruídos é um valor baixo; aproximadamente 86,7% dos dados possuíram alta confiabilidade, de acordo com o que expressa a imagem *Reliability*. Além disso, foi constatado que apenas 2,17% dos dados acusaram quantidade maior que 50% de pixels espúrios, representando um total de 7 datas de imagens de satélite. Essa análise encontra-se ilustrada na Figura 7.

Figura 7. Pixels espúrios acusados pelas imagens de confiabilidade



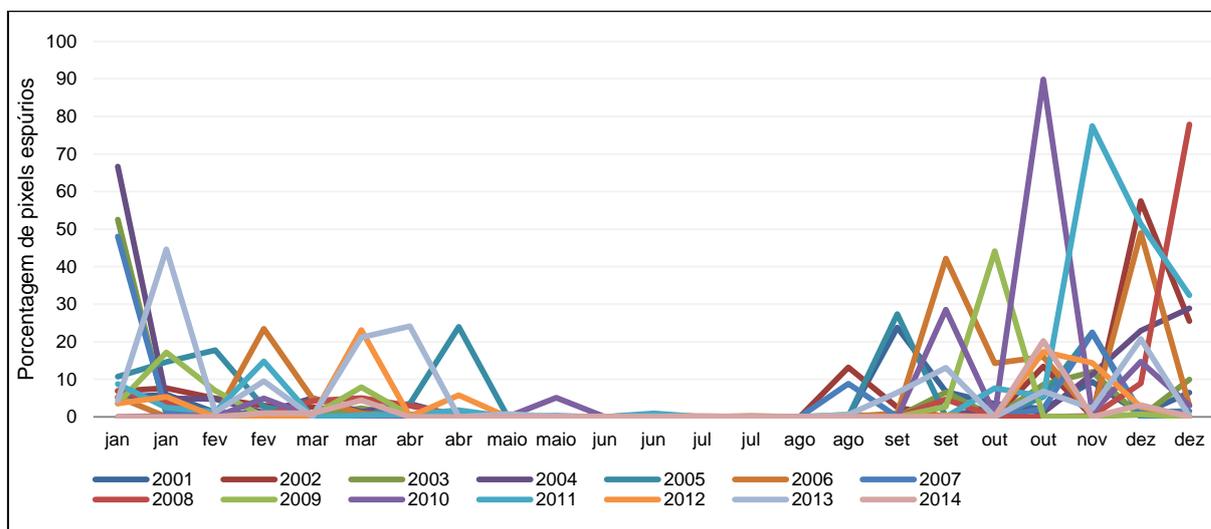
Fonte: a autora.

A média de pixels espúrios por imagem foi de 5,10, equivalente a 0,03% de todos os pixels das imagens. Os anos em que as imagens apresentaram melhor qualidade foram 2014 (média de 1,31 pixels espúrios por imagem ou 0,008% dos pixels da imagem), 2001 (média de 2,86 pixels espúrios por imagem ou 0,017% dos pixels da imagem) e 2012 (média de 3,16 pixels espúrios por imagem ou 0,019% dos pixels da imagem). Por outro lado, os anos que apresentaram menores

confiabilidades dos dados foram 2011 (Com uma média de 8,93 pixels espúrios por imagem ou 0,05% dos pixels da imagem) e 2006 (com uma média de 7,04 pixels espúrios por imagem ou 0,04% dos pixels da imagem).

A Figura 8 apresenta a presença de pixels espúrios, ao longo dos anos em estudo e de acordo com os meses do ano. É possível perceber que, no geral, as imagens com maior quantidade de pixels espúrios são referentes aos períodos de setembro a janeiro. Isso já era esperado, uma vez que esse é o período chuvoso na região e, conseqüentemente, onde há maior possibilidade de presença de nuvens sobre a área durante um maior período de tempo. Percebe-se também que nos meses de maio a agosto as quantidades de pixels espúrios são mínimas, e iguais ou muito próximas a zero nos meses de junho e julho.

Figura 8. Presença de pixels espúrios nas imagens IV, de acordo com a época do ano

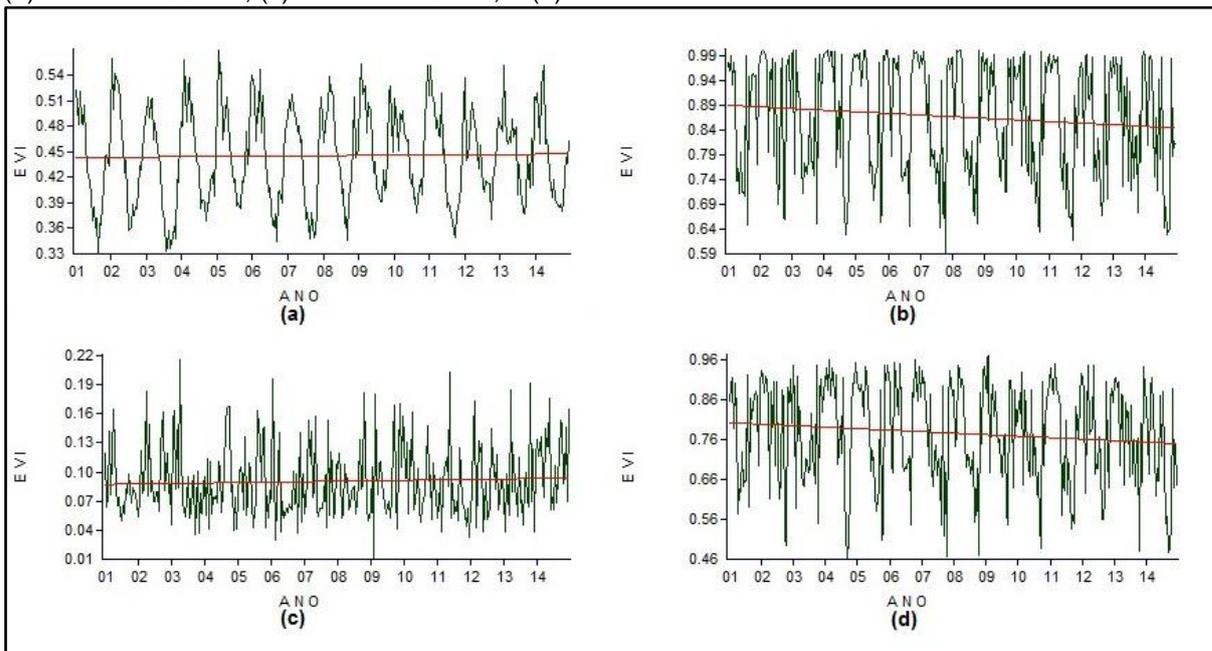


Fonte: a autora.

## 4.2. TENDÊNCIAS DE COMPORTAMENTO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

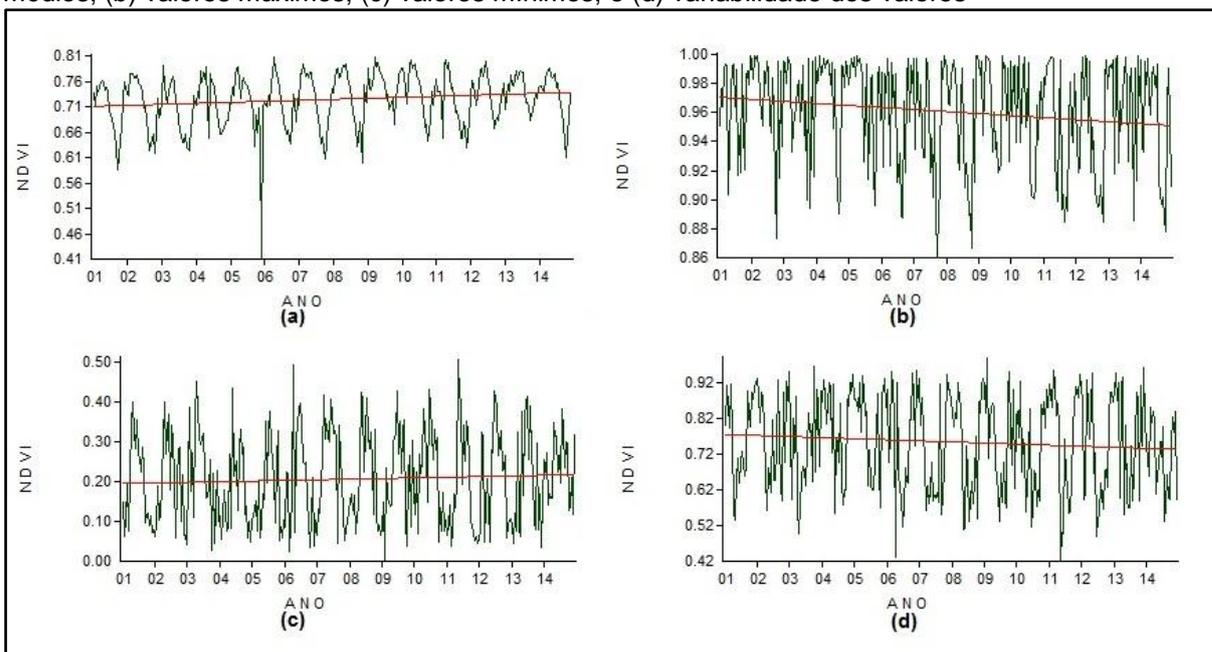
Os perfis temporais para o NDVI e EVI são mostrados nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9. Perfis temporais dos anos de 2001 a 2014 para o EVI, de acordo com: (a) valores médios; (b) valores máximos; (c) valores mínimos; e (d) variabilidade dos valores



Fonte: a autora.

Figura 10. Perfis temporais dos anos de 2001 a 2014 para o NDVI, de acordo com: (a) valores médios; (b) valores máximos; (c) valores mínimos; e (d) variabilidade dos valores



Fonte: a autora.

É possível observar que os dois índices apresentaram o mesmo comportamento ao longo dos anos estudados, ou seja, um período de aumento e outro de decréscimo durante cada ano. É notável também que existe relação entre os valores de ambos, porém os valores do NDVI são sempre superiores aos valores de EVI. Esse padrão pode ser explicado levando-se em consideração que o NDVI

apresenta uma tendência de saturação mais rápida em relação ao EVI, sendo mais sensível à um aumento na produção de biomassa.

Ferreira et al. (2006) observaram um comportamento semelhante entre os índices de vegetação EVI e NDVI do sensor MODIS, que expressaram um padrão de sazonalidade no estado de Goiás. Encontraram que, os resultados obtidos para o EVI se mostraram mais satisfatórios do que os resultados do NDVI, associado a maior saturação dos pixels do NDVI.

É importante salientar que, em se tratando de dados de máxima composição de índices de vegetação, os valores máximos representados graficamente se referem aos pixels com valores máximos nas imagens, ou seja, às regiões onde há maior vigor vegetativo. Os valores mínimos se referem às regiões onde há menor vigor vegetativo, os valores médios representam as médias representativas de toda a área e a variação representa o quanto os valores variaram dentro da área de estudo.

Para os valores máximos e para os valores de variação, é possível perceber que há uma tendência de diminuição nos valores. Considerando que, para a área em questão, os máximos valores de índices de vegetação estão inseridos provavelmente no interior do PARNA Caparaó, têm ocorrido uma tendência de diminuição do vigor vegetativo ao longo do tempo, levando os valores de índices de vegetação à uma diminuição gradual. Para os valores mínimos e médios, a linha de tendência manteve-se próxima da média em todo período.

#### 4.3. TENDÊNCIAS INTERANUAIS

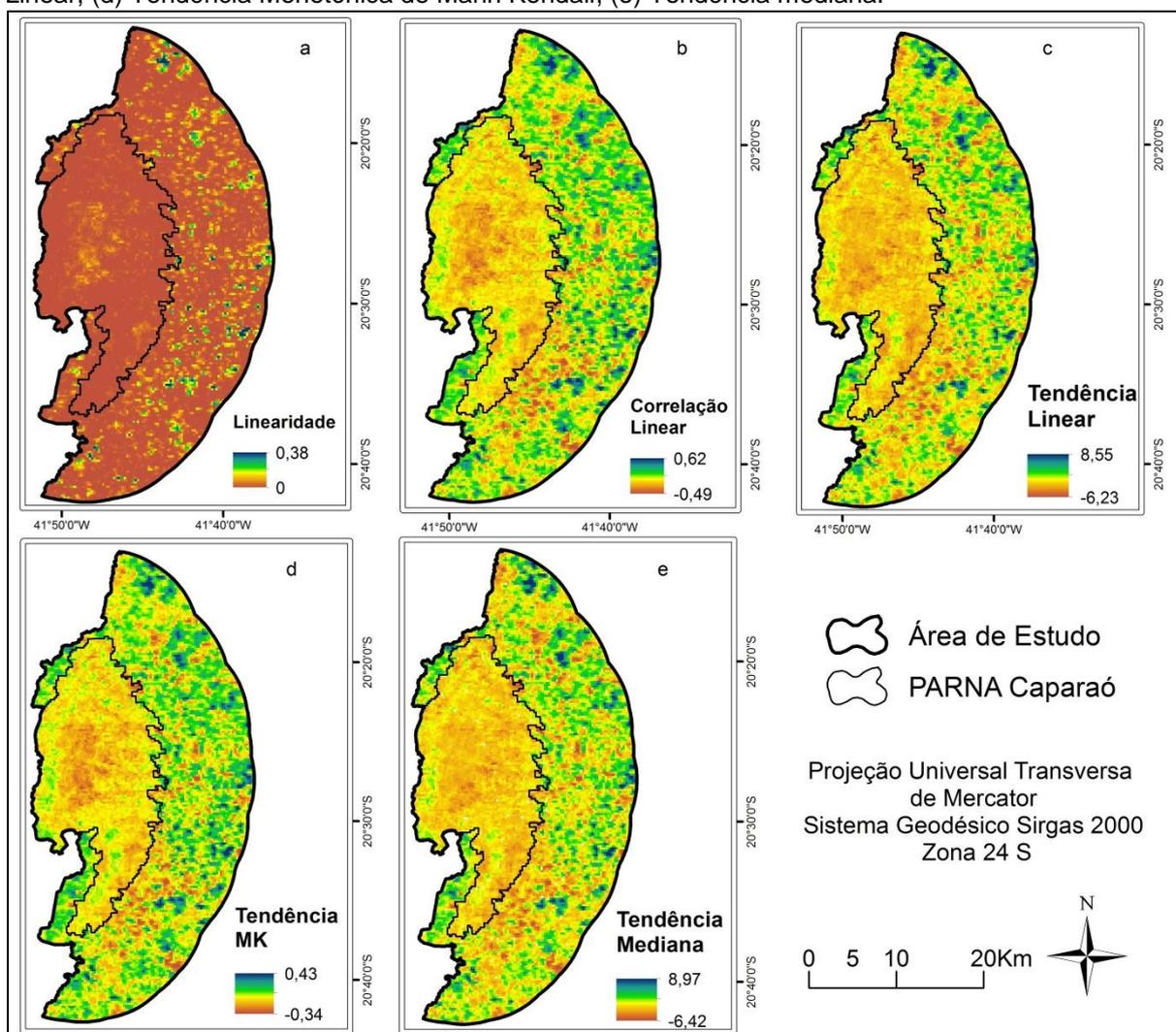
Os resultados das tendências interanuais para o EVI, encontram-se expostos na Figura 11, e os resultados para as tendências interanuais para o NDVI, expostos na Figura 12.

Pode-se perceber que, para todas as análises de tendência, para os dois IV, os resultados foram semelhantes. Contudo, para o NDVI os valores apresentaram maiores amplitudes. Isso pode indicar que, no caso de estudos de tendências interanuais, ou seja, que levem em consideração as alterações que ocorrem entre

período de anos, o NDVI apresente uma melhor resposta quando comparado ao EVI.

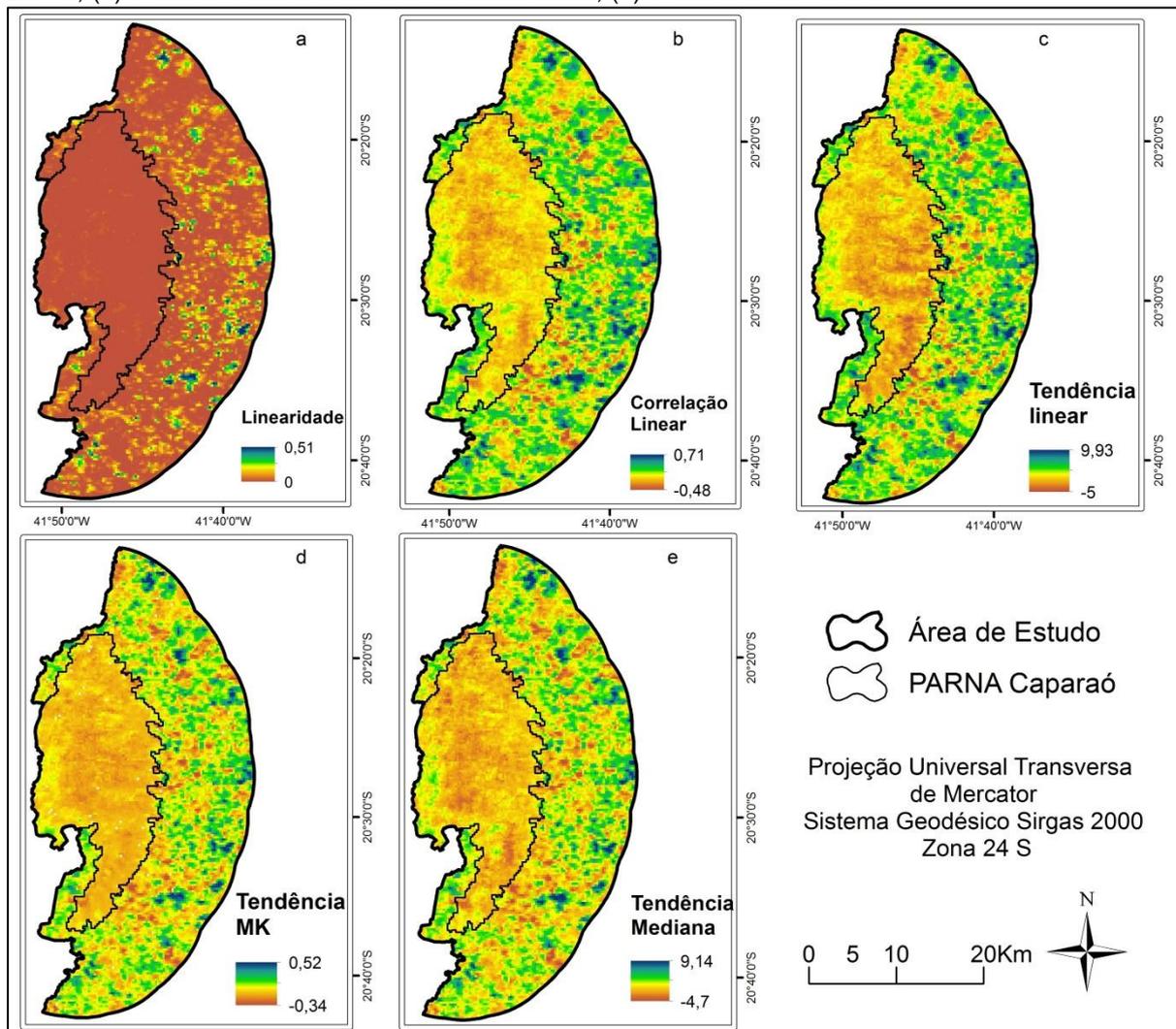
A afirmativa acima pode ser melhor entendida, considerando que maiores valores nas tendências, indicam maior correlação entre os dados na série temporal, o que, nesse caso, significa que os dados variaram menos e, portanto, têm sofrido menores alterações. Por outro lado, onde há menor correlação entre os dados na série temporal, há maior variação dos valores, o que significa que essas áreas têm sofrido maiores alterações. Assim, quando há maior amplitude entre esses resultados no mapa, há maior contraste no mesmo e uma maior sensibilidade às diferenças que ocorrem na área de estudo, quanto ao vigor vegetativo.

Figura 11. Tendências interanuais para o EVI: (a) linearidade; (b) Correlação linear, (c) Tendência Linear, (d) Tendência Monotônica de Mann Kendall, (e) Tendência mediana.



Fonte: a autora

Figura 12. Tendências interanuais para o NDVI: (a) linearidade; (b) Correlação linear, (c) Tendência Linear, (d) Tendência Monotônica de Mann Kendall, (e) Tendência mediana.



Fonte: a autora

É perceptível, para todas as análises executadas, que os menores valores foram encontrados para a área pertencente ao interior do PARNA Caparaó. Isso vai de encontro ao que foi observado por meio dos perfis temporais, que indicaram que vêm ocorrendo uma diminuição nos valores de IVs para as áreas onde os valores são máximos, ou seja, áreas que apresentam maior vigor vegetativo, que são as áreas pertencentes ao PARNA Caparaó.

De acordo com cada técnica é possível obter as seguintes inferências:

**Linearidade:** É compreensível que, tanto para o NDVI quanto para o EVI, os valores encontrados estão mais próximos de 0 do que próximos de 1. Sendo assim, por meio do coeficiente  $R^2$ , é possível deduzir que em toda área de estudo não houve correlação dos dados (Figuras 11a e 12a). Isso indica que os índices de vegetação variaram bastante no período de 2001 a 2014, e portanto, têm acontecido alterações nas características da vegetação em toda a área de estudo.

**Correlação linear:** Por meio dessa técnica, os valores obtidos foram, para a maior parte da área, baixos. Para o NDVI, os maiores valores chegaram a 0,71 e para o EVI chegaram a 0,61; porém esses valores foram encontrados em algumas regiões isoladas na área de estudo, representados pelas cores mais escuras, em tons de azul nos mapas gerados (Figuras 11b e 12b). A maior parte da área encontra-se com valores muito próximos de 0, tons próximos do amarelo nos mapas, em especial a área do PARNA Caparaó, que apresentou resultados bastante homogêneos, praticamente com nenhuma correlação entre os dados na série de tempo, indicando alta variabilidade.

**Tendência linear:** Por meio dessa metodologia é possível inferir que a tendência de comportamento dos dados é não-linear, em especial na região do interior do PARNA Caparaó (Figuras 11c e 12c), ou seja, as alterações não acontecem da mesma forma em todos os anos.

**Tendência monotônica de Mann-Kendall (MK):** Considerando que essa metodologia indica se a série é crescente (valores próximos a 1) ou decrescente (valores próximos a -1), pode-se inferir que, apesar de possuir áreas em que a série tende a ser crescente, na maior parte da área a série apresenta um comportamento mais próximo de decrescente, representado pelos tons de amarelo a laranja nos mapas. Observa-se que os menores valores correspondem à área do PARNA Caparaó, ou seja, é a área onde os valores têm sofrido maior alteração, no sentido de decréscimo; conforme observado por meio das Figuras 11d e 12d.

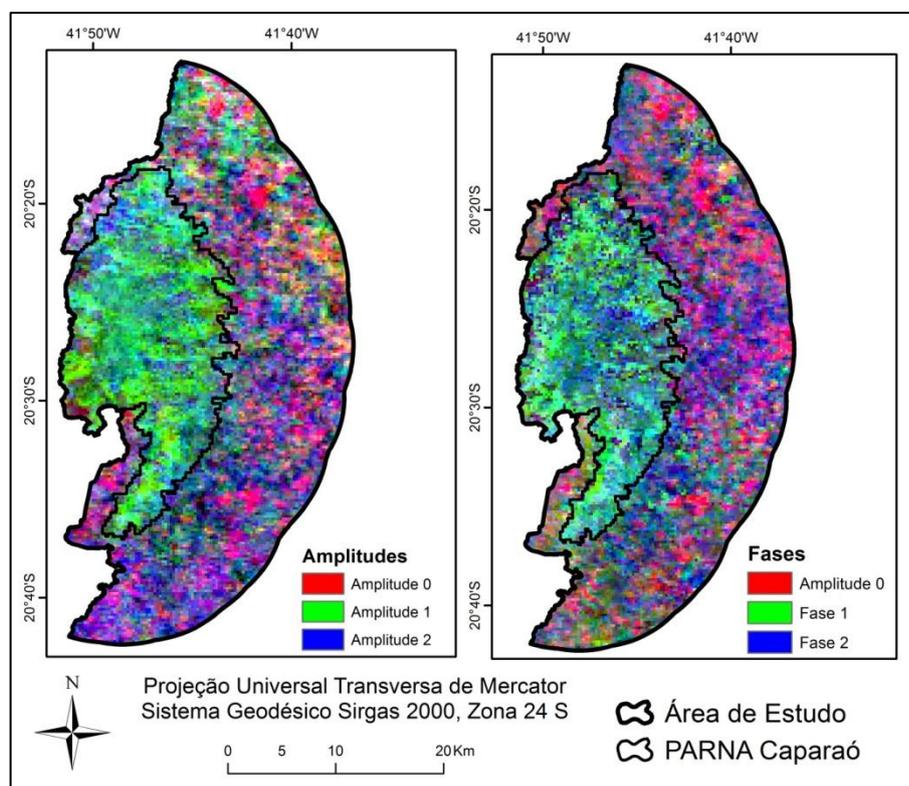
**Tendência mediana:** De acordo com a tendência mediana, é possível entender que, embora ocorra um aumento dos valores com relação à mediana ao longo do tempo em algumas regiões da área de estudo, em grande parte o que ocorre é uma diminuição dos valores com relação à mediana ao longo da série (Figuras 11e e 12e). Ou seja, a taxa em que os IV diminuem vem aumentando ao longo do tempo.

#### 4.4. TENDÊNCIAS SAZONAIS

**Análise de tendência sazonal (STA):** Os mapas de amplitudes e fases, para o EVI e NDVI, podem ser analisados por meio das Figuras 13 e 14, respectivamente. É possível observar, por meio dos mapas, que houve uma diferenciação entre duas regiões na área de estudo. Uma com aspecto do vermelho e azul mais acentuados, com maior influência da amplitude 0, fase 2 e amplitude 2, e outra que apresenta os tons de verde e azul mais acentuados, representativos das amplitudes 1 e 2, e fases 1 e 2. Esta última parece representar praticamente toda a área do PARNA Caparaó, distinguindo-o claramente da área representativa da sua zona de amortecimento.

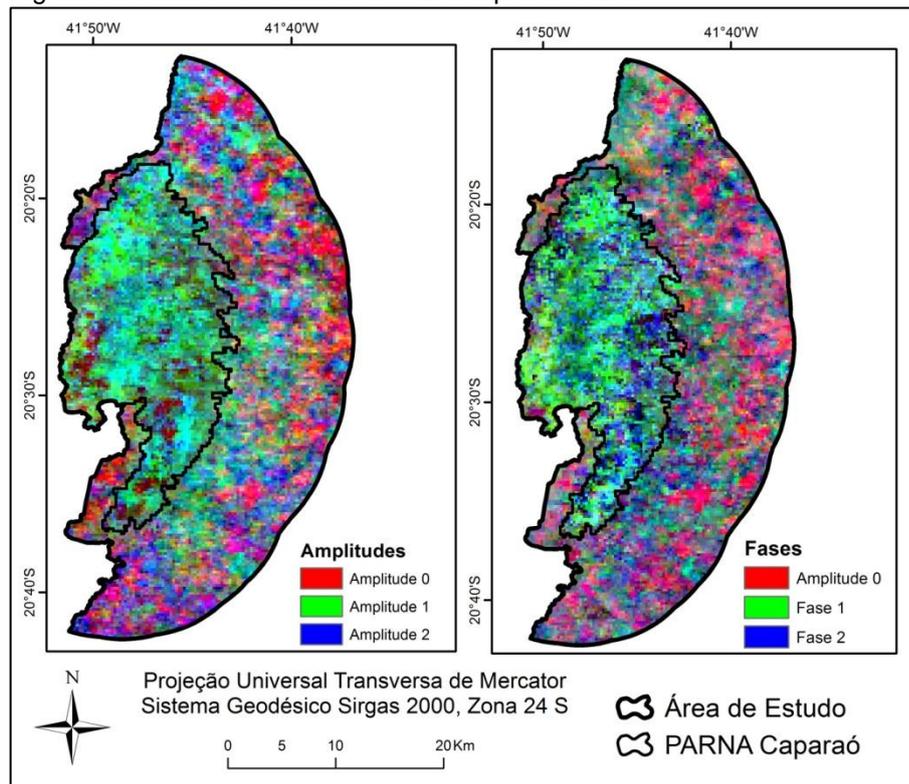
Além disso, para os dados de EVI houve maior contraste nos mapas, o que pode indicar que, para o caso de análises de tendências sazonais, o EVI apresente melhores respostas, se comparado ao NDVI. Considerando que a amplitude 0 refere-se à média anual dos dados, que a fase 1 e amplitude 1 descrevem um ciclo sazonal anual e que a fase 2 e amplitude 2 descrevem um ciclo sazonal semi-anual, pode-se observar que a região representativa da zona de amortecimento, não caracteriza muito bem um padrão de sazonalidade.

Figura 13. Análise de tendência sazonal para o EVI



Fonte: a autora.

Figura 14. Análise de tendência sazonal para o NDVI



Fonte: a autora.

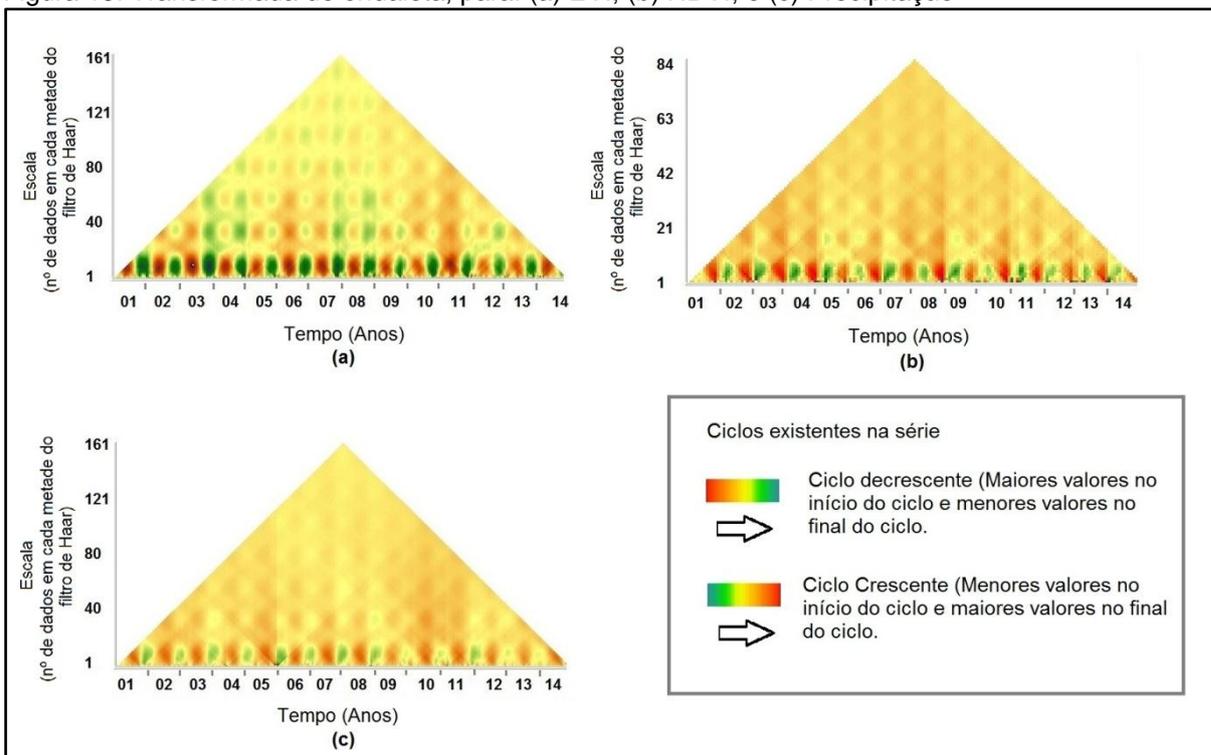
A região em tons de verde e azul, onde situa-se o PARNA Caparaó, apresenta influências da sazonalidade, em especial da fase 2, característica de um ciclo semi-anual de sazonalidade. Esse resultado pode ser explicado levando-se em consideração que a área do PARNA encontra-se bastante preservada, não havendo intervenção humana, o que mantém as características de sazonalidade esperadas para o tipo de vegetação ali existente.

Além disso, foi possível observar uma alteração no *green-up*, que para 40%, representando a fase em que a produção de biomassa corresponde à 40% da produção máxima; o início era em 06 de novembro, para o EVI em 2001, e passou a ser em 10 de novembro, para o EVI em 2014. No caso do NDVI, o início de *green-up* passou de 11 de novembro, em 2001, para 23 de outubro, em 2014.

Da mesma forma, o *green-down* de 40% ocorreu em 01 de julho para o EVI em 2001 e passou a ocorrer em 20 julho em 2014. Para o NDVI, ocorreu em 02 de agosto em 2001 e 10 de setembro em 2014. Esses resultados indicam que ocorreu uma alteração na fenologia da vegetação na área de estudo, com atraso nos inícios do *green-up* e do *green-down*, indicando um atraso nos ciclos sazonais representados.

**Transformada de ondaletas (*wavelets*):** O resultado gráfico da transformada de ondaletas inversa de *Haar*, pode ser descrito pela Figura 15.

Figura 15. Transformada de ondaleta, para: (a) EVI; (b) NDVI; e (c) Precipitação



Fonte: a autora.

Por meio da manipulação desses gráficos, foi possível perceber que, para todos os anos de estudo, são identificados dois ciclos anuais, tanto para os IV quanto para a precipitação. Para a vegetação, um período em que inicia uma fase de crescimento até chegar numa produção máxima (representada pelo tom mais verde nos gráficos) e outra em que essa produção máxima começa a decrescer, até chegar a um valor de produção mínima anual (representado pelo tom mais avermelhado nos gráficos). Para a precipitação, indica a presença de um período seco e um período chuvoso ao longo do ano.

Esse resultado corrobora com o resultado encontrado para a STA, em que foi identificada a presença de tendência sazonal nos dados, em especial nos maiores valores de NDVI e EVI, encontrados na região interior do PARNA Caparaó. As ondaletas reforçaram o resultado do STA, no sentido em que tornaram possível a visualização mais detalhada de como e quando as mudanças de fenologia da vegetação ocorreram, quando esses gráficos foram manuseados no software TerrSet.

Foi possível perceber que os melhores resultados das ondaletas, referem-se aos dados de EVI, o que pode reiterar a ideia de que, para a análise de tendência

sazonal, esse índice é mais adequado em comparação com o NDVI. Por meio do gráfico de EVI, foi possível identificar ocorrência de um padrão de sazonalidade semi-anual em todo período de estudo, em que os valores positivos da transformada de ondaleta iniciaram sempre em meados de setembro e os valores negativos iniciaram entre fevereiro e março, mantendo um padrão. O que ocorreu ao longo do tempo foi uma alteração nos valores, de forma que os valores positivos se tornaram menos expressivos e os valores negativos mais expressivos, referentes a uma diminuição no vigor vegetativo das plantas.

Quanto ao resultado encontrado para o NDVI, foi possível identificar ocorrência de um padrão de sazonalidade semi-anual no período de 2001 a 2009, em que os valores positivos iniciaram sempre no começo de outubro e os negativos sempre em meados de março e abril. Contudo, a partir de 2010 não pode ser identificado padrão de comportamento dos dados. Para os dados de precipitação, um padrão não pode ser verificado por meio da transformada de ondaletas.

É importante destacar alguns pontos que possam ter influenciado nessas respostas. Primeiro, os dados de precipitação expressam taxa de precipitação, em mm.h<sup>-1</sup>. Isso significa que a taxa de precipitação mensal não possui um comportamento sazonal para a área de estudo. Além disso, são dados mensais, enquanto os dados de IV são dados de 16 em 16 dias, o que pode ter interferido no grau de detalhamento e conseqüentemente na detecção de padrões na série temporal.

Kuplich et al. (2013), realizaram um estudo semelhante, utilizando imagens EVI e NDVI do produto MOD13Q1 do sensor MODIS, porém foi utilizada uma transformada de ondaleta mãe Dog para uma série de dados de 2000 a 2010. Com os resultados, encontraram um padrão sazonal semi-anual em área de domínio da mata atlântica, em Santa Maria, no Rio Grande do Sul, para os dois índices de vegetação estudados. Além disso, os autores puderam concluir que a análise de ondaletas torna-se útil nesse tipo de estudo, pois possibilita a identificação de ciclos intra e interanuais de desenvolvimento da vegetação.

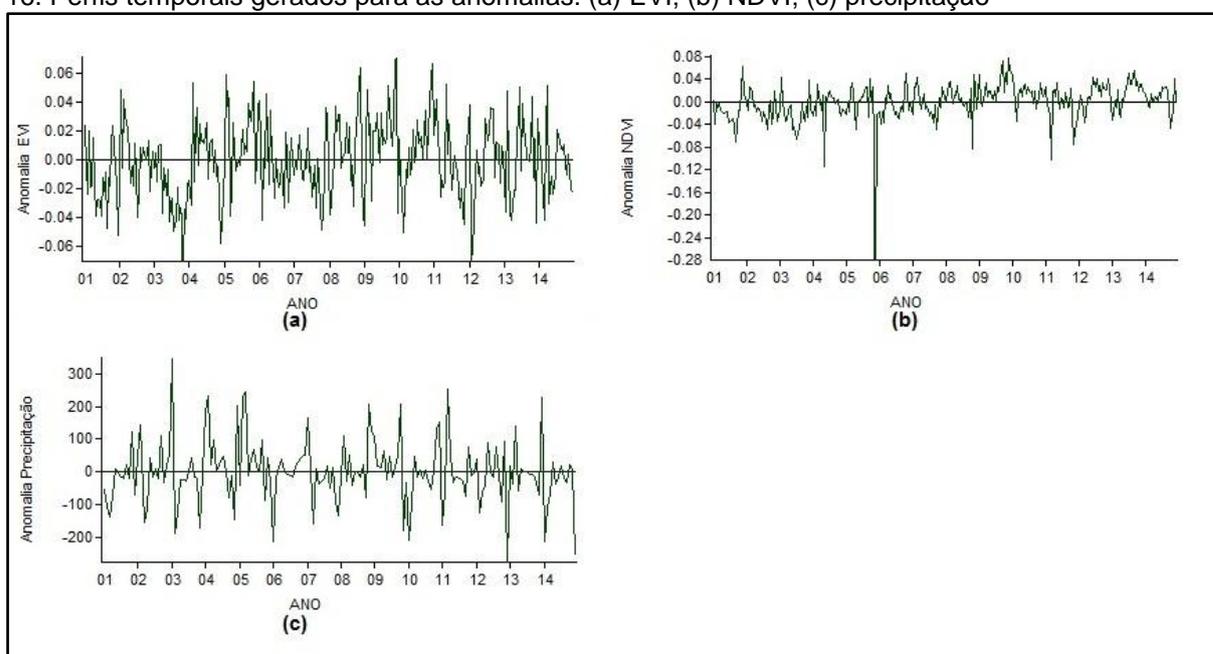
Rosembach et al. (2010) ao utilizarem a transformada de ondaleta, em área de mata atlântica no sul do Brasil, por meio de imagens de NDVI do sensor MODIS, identificaram a presença de um ciclo anual bem definido e de um ciclo semi-anual mais fraco. Os autores chegaram à conclusão de que a transformada de ondaleta pode ser empregada na identificação de variabilidades periódicas e aperiódicas na

região, sendo os dados de NDVI do produto MOD13Q1 eficientes na caracterização de variação sazonal na região sul do Brasil.

#### 4.5. ANOMALIAS DOS IV E DA PRECIPITAÇÃO

Os perfis temporais gerados para as séries temporais de anomalias podem ser visualizados por meio da Figura 16.

16. Perfis temporais gerados para as anomalias: (a) EVI; (b) NDVI; (c) precipitação



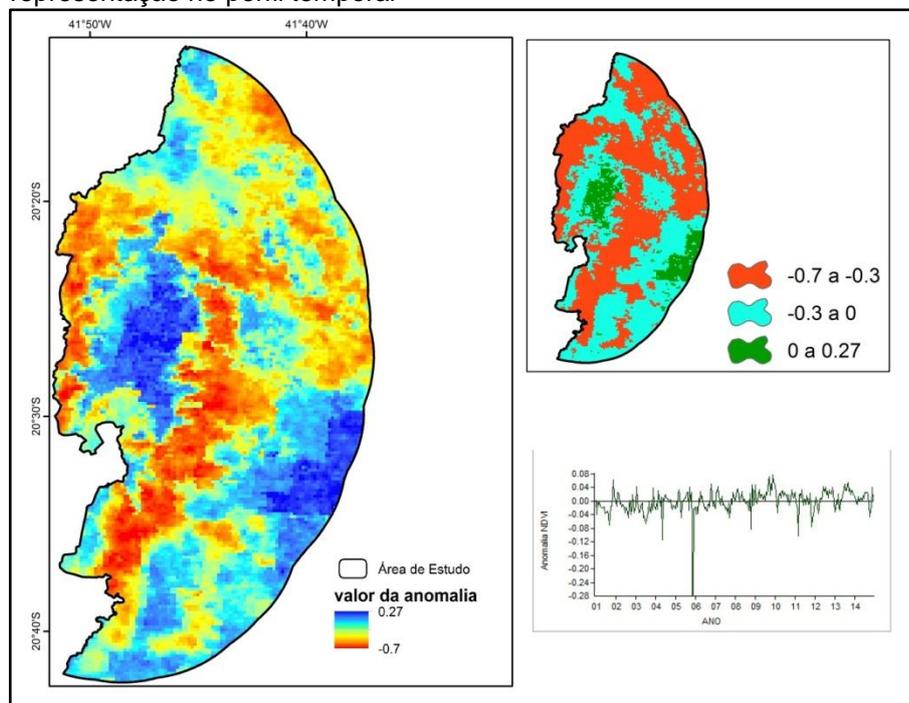
Fonte: a autora.

É possível perceber, no caso do EVI, que as anomalias mantiveram um padrão de comportamento ao longo do tempo. Logo, por meio da análise das anomalias no índice de vegetação EVI não foi constatada a ocorrência de nenhum evento anômalo. Para a precipitação o raciocínio é semelhante, não havendo influência de eventos anômalos sobre esses dados.

Quanto aos dados de anomalias para o NDVI, é observável um padrão de comportamento dos dados ao longo do tempo, com exceção do período correspondente à data de 03 de dezembro de 2005. Pode-se perceber um comportamento anômalo, em que a anomalia negativa chegou a um valor de 0,28, enquanto o padrão de comportamento para o restante da série foi de no máximo

0,08 para as anomalias negativas e positivas. Essa resposta pode ser melhor visualizada na Figura 17.

Figura 17. Mapa da anomalia do NDVI do dia 03 de dezembro de 2005 e sua representação no perfil temporal



Fonte: a autora.

Observa-se para essa data, que os valores de anomalias negativas chegaram a -0,7, sendo a normalidade em torno de -0,3 para as anomalias negativas das outras datas. É possível perceber ainda, que a maior parte da área apresentou anomalias negativas de -0,3 a -0,7, representando valores fora da média do restante da série. Além disso, a menor parte da área apresentou anomalias positivas, que chegaram a um valor máximo de 0,27.

Não houve um padrão espacial de representação desses resultados, como verificado para resultados anteriores, em que a área do PARNA Caparaó distinguiu-se claramente da área pertencente a zona de amortecimento. É importante considerar, também, que esse comportamento anormal aconteceu em apenas uma imagem na série de 322 imagens, não sendo possível afirmar, com base nestes resultados, que a área sofreu grande influência da ocorrência de algum evento anômalo.

Contudo, as evidências de que, para essa data de imagem, houve influência desse fenômeno são grandes. Deve-se considerar que trata-se de dados de NDVI de máxima composição de pixels num período de 16 dias, portanto, a detecção da

ocorrência de anomalias negativas, só se torna possível nos casos em que há persistência de valores muito baixos num período de 16 dias consecutivos.

A tabela 5 mostra as datas de ocorrência de fenômenos climáticos La Niña e El Niño, obtidas no site do INPE. No período estudado não foi registrada ocorrência de El Niño de forte intensidade, porém nos anos de 2005 e 2006 houve registro de El Niño de intensidade fraca, em que os impactos para a região de estudo ocorreram em meados de dezembro e janeiro.

Tabela 5 - Períodos de ocorrência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña

<b>Período de ocorrência</b>	<b>Fenômeno climático</b>
2002-2003	El Niño
2004-2005	El Niño
2006-2007	El Niño
2007-2008	La Niña
2009-2010	El Niño

Fonte: INPE, 2016, adaptado pela autora.

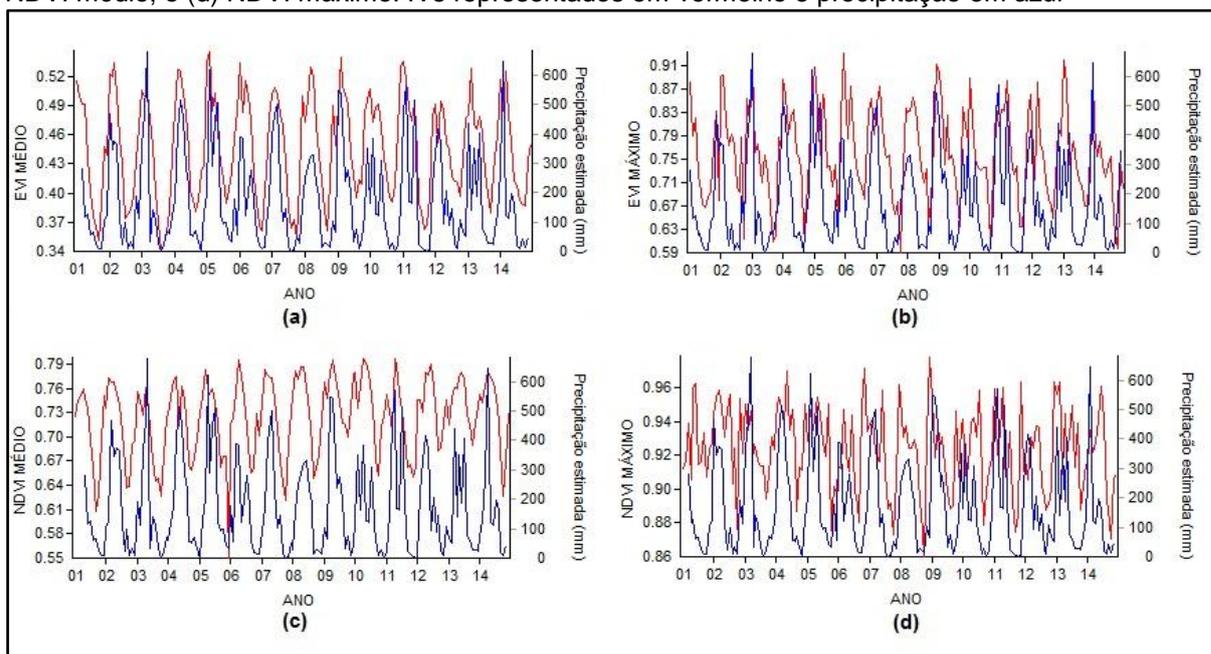
## 4.6. CORRELAÇÃO ENTRE IV E PRECIPITAÇÃO

### 4.6.1. Perfis temporais

A sobreposição dos perfis temporais dos IV com a precipitação pode ser visualizada na Figura 18. Observa-se que, o comportamento ao longo dos anos é semelhante em relação aos picos de máxima e mínima. Porém, ao analisar a correlação entre os dados, os valores obtidos foram baixos.

Os melhores resultados de correlação, de acordo com o tempo de defasagem da precipitação em relação aos IVs, para o NDVI foram:  $R=0,39$ , com dois meses de diferença para os valores máximos do NDVI (Figura 18d) e  $R=0,57$ , com três meses de diferença entre os valores de NDVI médio e precipitação (Figura 18c). Para o EVI, os melhores valores de R encontrados foram  $R=0,63$  para os valores máximos, com nenhum mês de diferença entre as séries (Figura 18b) e  $R=0,74$  para os valores médios, com dois meses de diferença entre os dados (Figura 18a).

Figura 18. Relação entre os IVs e a precipitação, considerando: (a) EVI médio; (b) EVI máximo; (c) NDVI médio; e (d) NDVI máximo. IVs representados em vermelho e precipitação em azul



Fonte: a autora.

A primeira inferência que pode ser feita é que os dados de EVI se correlacionaram melhor aos dados de precipitação, principalmente para os valores médios, que representam toda a área em estudo. Os valores máximos, onde foi verificada maior alteração dos IV, de acordo com as séries estudadas, obtiveram uma correlação razoável com os dados de precipitação.

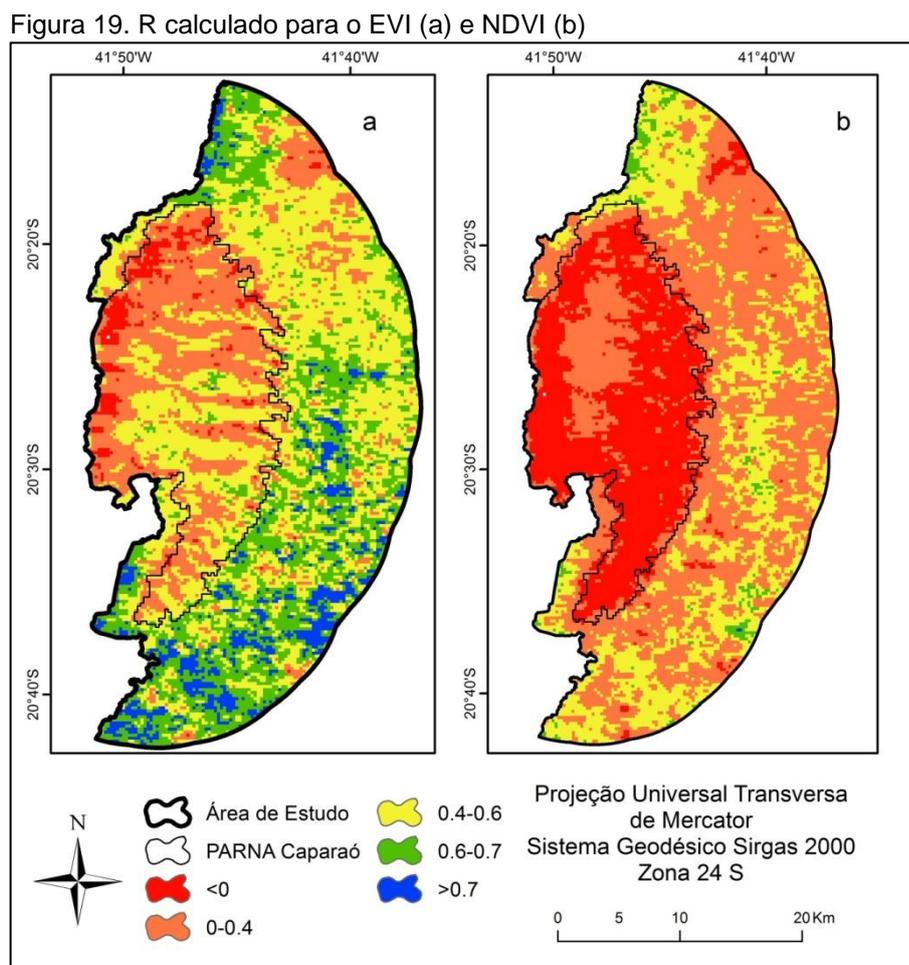
Em segundo lugar, é importante notar que o tempo de resposta da vegetação à precipitação para as regiões com maior valor de EVI, foi imediato, enquanto para os valores médios foi necessário deslocar a curva em dois meses para obter a maior correlação, ou seja; as regiões com maior biomassa vegetal respondem em um tempo menor às alterações da taxa de precipitação, com relação às outras áreas da região de estudo.

Porém, essas são apenas inferências, considerando que levam em conta análise de perfis temporais. Além disso, as séries de IVs consideradas correspondem à dados mensais, o que implica que o tempo de diferença de resposta considerado pode estar sendo subestimado ou superestimado.

**Modelagem linear:** De acordo com os resultados obtidos por meio da modelagem linear, tanto para o EVI quanto para o NDVI, os melhores valores de R e  $R^2$  estão associados à uma defasagem lag1, o que significa que a melhor resposta da vegetação à precipitação refere-se à um mês após ocorrência de chuvas, para a série estudada. Perez et al. (2004), verificaram uma defasagem temporal entre a chuva e a resposta total da vegetação de aproximadamente três meses, sendo que,

após o início das chuvas, entre a Primavera e o Verão, os valores de NDVI começaram a subir gradualmente até atingir seus máximos entre o Verão e o Outono.

Os valores R encontrados podem ser observados por meio da Figura 19. Tanto para o EVI quanto para o NDVI, a região correspondente ao PARNA Caparaó obteve os menores valores de correlação.



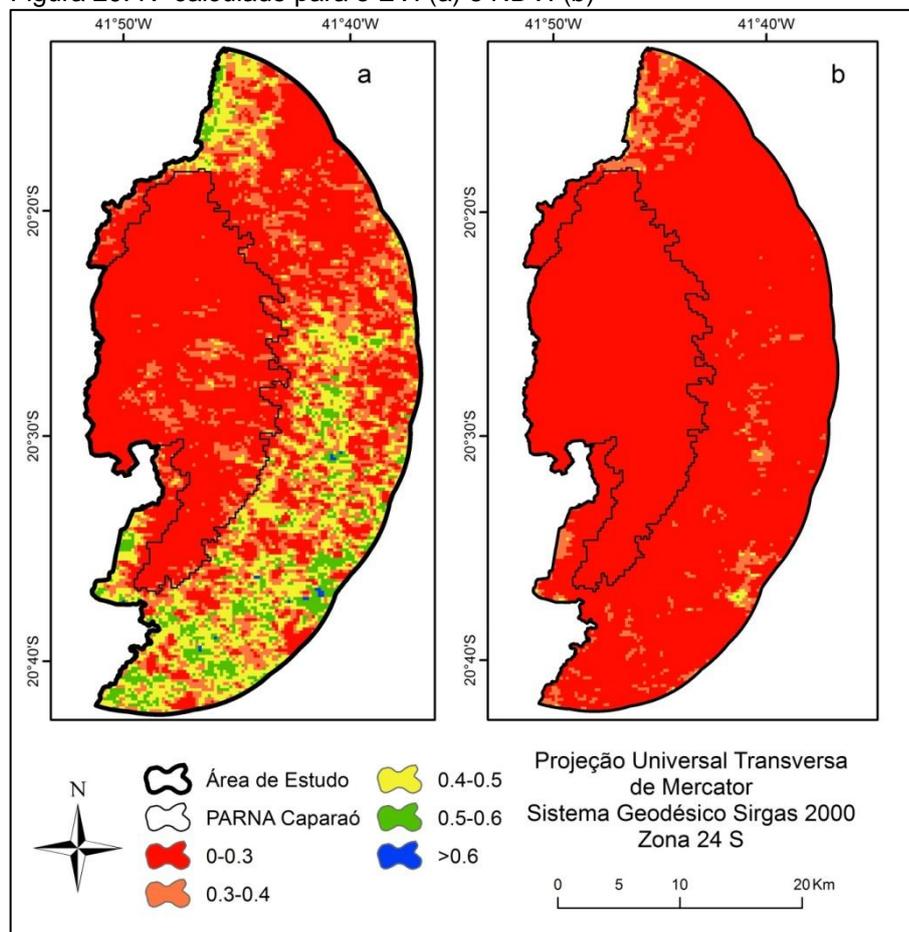
Fonte: a autora.

Para o EVI, que obteve a melhor resposta, observa-se que as regiões com melhores correlações encontram-se inseridas fora da área do PARNA Caparaó, sendo os maiores valores relacionados ao parque em torno de 0,6. Esse resultado indica que, a diminuição verificada ao longo do tempo nos valores dos IV, possuem uma relação com a alteração do regime de precipitação e que essa relação é, praticamente em toda a área, positiva. Porém, outros fatores podem ter influenciado nessa dinâmica de comportamento, seja diferenças de temperatura, alterações nos regimes hídricos da região, entre outros; pois a correlação encontrada não pode ser considerada como alta.

Resultados similares foram obtidos por autores como PRINCE et al., 1998; FENSHOLT; RASMUSSEN, 2011; FENSHOLT et al., 2013, que encontraram correlação linear entre o NDVI e dados de precipitação.

Quanto aos resultados obtidos com o cálculo do  $R^2$ , os maiores valores encontrados foram de 0,64 para o EVI e 0,5 para o NDVI. Contudo, a única inferência que pode ser feita é que para uma correlação linear entre dados mensais de precipitação e dados mensais de IV houve uma correlação muito baixa. Os resultados obtidos para o  $R^2$  podem ser vistos na Figura 20.

Figura 20.  $R^2$  calculado para o EVI (a) e NDVI (b)



Fonte: a autora.

A região referente ao PARNA Caparaó é representada pelos menores valores de correlação, sendo esses muito próximos de 0, ou seja, praticamente nenhuma correlação. Com relação à área pertencente à zona de amortecimento, para o NDVI os resultados são semelhantes aos obtidos na área do parque e para o EVI, foram um pouco maiores, porém ainda considerados baixos por se aproximarem de 0.

## 5. CONCLUSÕES

Entre os anos de 2001 e 2014, a tendência de comportamento da vegetação foi não linear e decrescente na área de estudo;

Ocorreu uma diminuição no vigor vegetativo na área de estudo, representativa do bioma de mata atlântica;

Houve uma alteração na dinâmica de comportamento da vegetação, considerando o ciclo interanual e ciclos sazonais;

Houve correlação dos IV com a precipitação, contudo, outros fatores podem ter influenciado na alteração do comportamento da dinâmica da vegetação no período considerado.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, R. G.; CANADELL, J. G.; RANDERSON, J. T.; HUNGATE, B. A.; BALDOCCHI, D. D. Biophysical considerations in forestry for climate protection. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 9, p. 174-182, 2010.

BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F., HUETE, A. R. "A review of vegetation indices", **Remote Sensing Reviews**, v. 13, p. 95-120, 1995.

BECK, H. E.; MCVICAR, T. R.; VAN DIJK, A. I. J. M.; SCHELLEKENS, J.; JEU, R. A. M.; BRUIJNZEEL, L. A. Global evaluation of four AVHRR-NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 2547-2563, 2011.

BOISVENUE, C.; RUNNING, S. W. Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century Global Change. **Biology**, v. 12 p. 862-882, 2006.

BRASIL. **Código Florestal Brasileiro**. Lei Federal n. 12.651, de 25 de maio de 2012.

BRASIL. **Sistema Nacional de Unidades de Conservação (2000)**. Lei 9985 de 18 de julho de 2000. Coletânea de legislação ambiental, Odete Medauar, ed. 10, p. 1129, 2011.

BRASIL. **Ministério do meio ambiente**. Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas. Brasília, setembro de 2010, 202 pg.

BRUNETTI, M.; MAUGERI, M.; NANNI, T. Variations of temperature and precipitation in Italy from 1866 to 1995. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 65 p. 165-174, 2000.

CHEN, B.; XU, G.; COOPS, N. C.; CIAIS, P.; INNES, J. L.; WANG, G.; MYNENI, R. B.; WANG, T.; KRZYZANOWSKI, J.; LI, Q.; CAO, L.; LIU, Y. Changes in vegetation photosynthetic activity trends across the Asia-Pacific region over the last three decades. **Remote sensing of environment**. v. 144, p. 28-41, 2014.

CHMURA, D. J.; ANDERSON, P. D.; HOWE, G. T.; HARRINGTON, C. A.; HALOFSKY, J. E.; PETERSON, D. L. Forest responses to climate change in the northwestern United States: Ecophysiological foundations adaptive management. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p. 1121-1142, 2011.

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.

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.

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.

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

COSTA, R. C. **Pagamento por serviços ambientais: limites e oportunidades para o desenvolvimento sustentável da agricultura familiar na amazônia brasileira**. Tese (doutorado em ciencia ambiental)- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

DEFRIES, R. S.; HANSEN, M. C.; TOWNSHEND, J. R. G.; JANETOS, A. C.; Loveland a new global 1-km dataset of percentage tree cover derived from remote sensing Global Change. **Biology**, v. 2, n. 6, p. 247–254, 2000.

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

DUAN, Z., BASTIAANSEN, W. G. M. First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling–calibration procedure. **Remote sensing of enviroment**. v. 131, p. 1-13, 2013.

DONOHUE, R. J.; MCVICAR, T. R.; RODERICK, M. L. Climate-related trends in Australian vegetation cover as inferred from satellite observations, 1981–2006 Global Change. **Biology**, v. 15 p. 1025–1039, 2009.

DRUMOND, M. A. **Participação comunitária no manejo de unidades de conservação: manual de técnicas e ferramentas**. Instituto terra-brasilis de desenvolvimento socio-ambiental: Belo Horizonte, 2002. 81 p.

EASTMAN, J. R. et al. Seasonal trend analysis of image time series. **International Journal of Remote Sensing**. v. 30, n. 10, p. 2721–2726, 2015.

EASTERLING, W.; APPS, M. Assessing the consequences of climate change for food and forest resources: a view from the IPCC. **Climatic Change**, v. 70 p. 165–189, 2005

FANG, J.; DU, J.; XU, W.; SHI, P.; LI, M.; MING, X. Spatial downscaling of TRMM precipitation data based on the orographical effect and meteorological conditions in a mountainous area. **Advances in Water Resources**, v. 61, p. 42-50, 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, p. 1242–1255, 2009.

FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, K.; KASPERSEN, P.; HUBER, S.; HORION, S.; SWINNEN, E. Assessing land degradation/recovery in the African Sahel from long-

term earth observation based primary productivity and precipitation relationships. **Remote Sensing**, v. 5, 664–686, 2013.

GANEM, R. S. **Zonas de amortecimento de unidades de conservação**. Brasília-DF, 22 p. 2015.

GOETZ, S. J.; BUNN, A. G.; FISKE, G. J.; Houghton Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance. **Proceedings of the National Academies of Science**, v. 102, p. 13521–13525, 2005.

GOWARD, S. N.; WARING, R. H.; DYE, D. G.; YANG, J. Ecological remote sensing at OTTER: Macroscale satellite observations. **Ecological Applications**, v. 4, n. 2, p. 322- 343, 1994.

GRAPS, A. **An introduction to wavelets**: An earlier version of this article will appear in the official scientific Engineering Applications of the :lizcintush 1991. 12 p.

ICMbio – Instituto Chico Mendes. **Parque nacional do Caparaó**. Disponível em:< <http://www.icmbio.gov.br/parnacaparao/natureza-local.html>> . Acesso em: 20 de agosto de 2015.

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF). **Plano de Manejo para o Parque Nacional do Caparaó**. Fundação Brasileira para a Conservação da Natureza. Doc. Tec. n. 8. Brasília, 1981. 139p.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. IBAMA. **Roteiro metodológico para a elaboração de planos de ação para implementação e gerenciamento de unidades de conservação de uso indireto**. Brasília: IBAMADIREC, 1993. 24 p.

JACKSON, R. B.; RANDERSON, J. T.; CANADELL, J. G.; ANDERSON, R. G.; AVISSAR, R.; BALDOCCHI, D. D.; BONAN, S. P. Protecting climate with forests. **Environment Research Letters**, v. 3, p. 44006, 2008.

JENSEN, J.R. 1949. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2ed por: EPHIPHANIO, J.C.; FORMAGGIO, A.R.; SANTOS, A.R.; RUDORFF, B.F.T.; ALMEIDA, C.M.; GALVÃO, L.S. São José dos Campos-SP: Parêntese, 598p, 2009.

JIA, S. F.; ZHU, W. B.; LU, A. F.; Yan, T. T. A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China. **Remote Sensing of Environment**, v. 115 p. 3069–3079, 2011.

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

- KIRCHNER, J. W. Data Analysis Toolkit: **Serial correlation**. p. 1–8, 2001.
- KOSOY, N.; MARTINEZ-TUNA, M.; MURADIAN, R.; MARTINEZ-ALIER, J. Payments for environmental services in watersheds: insights from a comparative study of three cases in Central America. **Ecological economics**, v. 59, n.1, p. 131-141, 2006.
- KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; ASHCROFT, P.; KOZU, T. HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.; HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; FERRIER, B.; OLSON, W. S.; ZIPSER, E.; SMITH, E. A.; WILHEIT, T. T.; NORTH, G. KRISHNAMURTI, T.; NAKAMURA, K. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. **Journal of Applied Meteorology**, vol. 39, p. 1965-1982. 2000
- LI, A.; WANG, A.; LIANG, S.; ZHOU, W. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS- A case study in the upper reaches of Minjiang River, China. **Ecological Modelling**, v. 192, p. 175-187, 2006.
- LINARES, J. A. H. **Análise multitemporal de imagens MODIS dos Parques Nacionais do Cerrado: EVI como uma das ferramentas para seleção de áreas de conservação**. 2012. 104 f. Dissertação (mestrado em geografia)- Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- MA, M.; VEROUSTRAETE, F. Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI time-series data for the Northwest of China. **Advances in Space Research**, v. 37, p. 835-840, 2006.
- 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.
- MARGULES, C. R.; PRESSEY, R. L. Systematic conservation planning. **Nature**, v. 405, p. 243- 253, 2000.
- MCLAUHLAN, K.; HIGUERA, P. E.; GAVIN, D. G.; PERAKIS, S. S.; MACK, M. C.; ALEXANDER, H. Reconstructing disturbances and their biogeochemical consequences over multiple timescales. **BioScience**, v. 64, n. 2, p. 105–116, 2014.
- MILLER, K.R. **Evolução do Conceito de Areas de Proteção** – Oportunidades para o século XXI. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO, Curitiba, 1997. Anais... UNILIVRE. 1997. v. 1, p. 3 – 21.
- MOHAN, J. E.; COX, R. M.; IVERSON, L. R. Composition and carbon dynamics of forests in northeastern North America in a future, warmer world Canadian. **Journal of Forest Research**, v. 39 p. 213–230, 2009.
- MORAES, R. A.; ROCHA, J. V. Imagens de coeficiente de qualidade (Quality) e de confiabilidade (Reliability) para seleção de pixels em imagens de NDVI do sensor MODIS para monitoramento da canade- açúcar no estado de São Paulo. In: **SBSR...2011**. Curitiba, Paraná. p. 0547-0552.

MORAES, R. A. **Monitoramento e estimativa da produção da cultura de cana-de-açúcar no estado de São Paulo por meio de dados espectrais e agrometeorológicos.** Tese (Doutorado em engenharia agrícola)- Unicamp, Campinas. 2012. 134 f.

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

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

MORETTIN, P. A. **Ondas e ondaletas:** Da análise de Fourier à análise de ondaletas. Ed USP: São Paulo. 284 p. 1999.

NASA – **National Aeronautics and Space Administration.** Disponível em <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>. Acesso em: nov. 2015

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.** v. 25, n 1, 2008a.

NOBREGA, R. S.; SOUZA, E. P.; SOUZA, F. A. S. ANALISE DA UTILIZACAO DE DADOS DO SATELITE TRMM EM UM MODELO HIDROLOGICO SEMIDISTRIBUIDO NA BACIA DO RIO JAMARI (RO). **Revista Brasileira de Geografia Física,** v. 1, n. 1, p. 47-61, 2008b.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento Remoto:** princípios e aplicações. São José dos Campos, SP: E. Blucher, 1989. 308 p.

OLSSON, L.; EKLUNDH, L.; ARDO, J. A recent greening of the Sahel — Trends, patterns and potential causes. **Journal of Arid Environments,** v. 6, p.. 556–566, 2005.

PEREZ, L. P.; SHIMABUKURO, Y. E.; FERREIRA, N. J.; ANDRÉ, I. R. N. Dinâmica dos principais domínios fitogeográficos do nordeste brasileiro e suas conexões com a precipitação. **Geografia,** v. 29, n. 2, p. 217-228. 2004.

PRINCE, S. D.; COLSTOUN, E. B. de; KRAVITZ, L. L. Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. **Global Change Biology,** v. 4, n. 4, p. 359–374, 1998

REED, B. C.; BROWN, J. F.; VANDERZERR, D.; LOVELAND, T. R.; MERCHANT, J. W.; OHLEN, D. O. Measuring phenological variability from satellite imagery. **Journal of Vegetation Science.** v.5, p. 703-714, 1994.

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, 1974. 87 p.

ROSEMBACK, R. **Análise da dinâmica da cobertura vegetal na região sul do Brasil a partir de dados modis-terra.** 2007. 87 f. Dissertação (mestrado em sensoriamento remoto)- INPE, São José dos Campos, 2007.

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 MODIS/TERRA. **Revista Brasileira de Cartografia**, p. 62, 2013.

RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis: An introduction**. Springer-Verlag, Heiderberg (2 ed.). 1993. 340 p.

SCHRÖTER, D.; CRAMER, W.; LEEMANS, R.; PRENTICE, I. C.; ARAÚJO, M. B.; ARNELL, N. W. Ecosystem service supply and vulnerability to global change. **Europe Science**, v. 310, p. 1333–1337, 2005.

SILVA, R. A.; SILVA, V. P. R.; CAVALCANTI, E. P.; SANTOS, D. N. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.5, p. 501-509, 2010.

SLAYBACK, D. A.; PINZON, J. E.; LOS, C.J. Tucker Northern hemisphere photosynthetic trends 1982–99 Global Change. **Biology**, v. 9, p. 1–15, 2003.

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.

STEFFEN, C. A.; **Radiação solar**. Introdução ao sensoriamento remoto. 2008.

STEINMENTZ, S. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: GOMES, A. S., MAGALHÃES JUNIOR, A. M. de. (Org.) Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 899 p, 2004.

TIESZEN, L. L.; REED, B. C.; BLISS, N. B.; WYLIE, B. K; DEJONG, D. D. NDVI, C3 and C4 production, and distributions in Great Plains grassland land cover classes. **Ecological Application**, v. 7, p. 59–78, 1997.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, p. 127–150, 1979.

TUCKER, C. J.; SELLERS, P. J. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, p. 1395–1416, 1986.

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.

VIANA, V. M.; PINHHEIRO, L. A. F. V. **Conservação da biodiversidade em fragmentos florestais**. Série técnica ipef v. 12, n. 32, p. 25-42, 1998.

WUNDER, S. Pagos por servicios ambientales: principios basicos esenciales. CIFOR. **Indonésia**. 2006. p 42.

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.

ZHANG, X., FRIEDL, M. A., SCHAAF, C.B., STRAHLER, A.H., HODGES, J.C.F., GAO, F., REED, B.C., HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using Modis. **Remote Sensing of Environment**. v.84, p.471-475, 2006.

ZHOU, L. M.; TUCKER, C. J.; KAUFMANN, R. K.; SLAYBACK, D.; SHABANOV, N. V.; MYNENI, R. B.. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981-1999. **Journal of Geophysical Research**, v.106, p. 20069-20083, 2001.