



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
CURSO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E AGRIMENSURA

FÁBIO VINÍCIUS MARLEY SANTOS LIMA

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO ARMAZENAMENTO TOTAL DE ÁGUA
UTILIZANDO OBSERVAÇÕES GRACE E IMAGENS MODIS: estudo de caso na
região hidrográfica do atlântico nordeste oriental.**

Recife

2018

FÁBIO VINÍCIUS MARLEY SANTOS LIMA

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO ARMAZENAMENTO TOTAL DE ÁGUA
UTILIZANDO OBSERVAÇÕES GRACE E IMAGENS MODIS: estudo de caso na
região hidrográfica do atlântico nordeste oriental.**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito básico para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Cartográfica.

Orientador: Prof^o. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves.

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

L732a Lima, Fábio Vinícius Marley Santos.
Análise espaço-temporal do armazenamento total de água utilizando observações GRACE e imagens MODIS: estudo de caso na região hidrográfica do atlântico nordeste oriental / Fábio Vinícius Marley Santos Lima - 2018.
76 folhas, il., tabs., e sigl.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Cartográfica e Agrimensura, 2018.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Cartográfica e Agrimensura. 2. Recursos hídricos. 3. Seca. 4. TWS (Total Water Storage). I. Gonçalves, Rodrigo Mikosz (Orientador). II. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-470

FÁBIO VINÍCIUS MARLEY SANTOS LIMA

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO ARMAZENAMENTO TOTAL DE ÁGUA
UTILIZANDO OBSERVAÇÕES GRACE E IMAGENS MODIS: estudo de caso na
região hidrográfica do atlântico nordeste oriental.**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito básico para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Cartográfica.

Aprovada em: 30/11/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves (Orientador acadêmico)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Profa. Dra. Karoline Paes Jamur
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Profa. Dra Leidjane Maria Maciel de Oliveira
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

*In memoriam a Maria Angélica, minha vó
materna. Saudades eternas.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado forças, por não me desamparar e ter me guiado em toda a trajetória acadêmica, minha eterna gratidão, sem Ele eu nada seria.

Aos meus pais, Verônica Santos e Fábio Lima, que independente das adversidades, sempre acreditaram nos meus sonhos, e me motivaram a crescer na minha trajetória acadêmica. Amo vocês.

Ao meu irmão Filipe, que me mostrou que devo sorrir, mesmo quando estamos nas adversidades. Por sempre acreditar que eu poderia ir além do que sou capaz. Te amo.

Á minha enorme família, em especial minha Tia Sandra, que me amou e educou como um filho, e me mostrou que eu seria capaz de alcançar grandes vitórias, minha vó paterna (Vó Suzana), que sem ela eu não poderia me dedicar integralmente aos estudos, a minha prima Alessandra que foi meu primeiro espelho para conquistar um ensino superior público. Obrigado por tudo.

Á meus irmãos, não por algo acidental como o sangue, mas por algo muito mais forte, por opção, obrigado Túlio Martins, Tainã Martins, Leonardo José e Dandhara Roberta, por me apoiarem nessa trajetória e por fazer parte dos melhores momentos de minha história.

Á meus portos seguros, Tácito Richarles e Camila Ribeiro. Pelos incentivos, puxões de orelha, por todo apoio desde no início, em 2011 quando ingressávamos no IFPE. Nos tornando amigos e confidentes, que levarei para minha vida toda. Lembra quando tudo era fácil, e achávamos difícil, serão tempos que não voltarão mais. Olho para a frente e vejo os grandes engenheiros que nos tornamos. Amo vocês.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Mikosz, que me deu a oportunidade de desenvolver a monografia e projeto de iniciação científica, por todo conhecimento passado, paciência, encorajamento e todas suas orientações. Meu muito obrigado!

A todos os professores do departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE por todos os ensinamentos passados. Em especial ao Prof. Dr. João Rodrigues, Profa. Dra. Karoline Jamur, Profa. Dra. Andréa de Seixas, Profa. Dra. Ana Lúcia Candeias e ao Prof. Dr. Francisco Jaime.

Á Raquel Arcoverde, que chegou despercebida, e de repente, já éramos confidentes um do outro. Obrigado por passar e dividir esses momentos finais da graduação, desde TCC até a seleção do mestrado. Te amo.

Á Laisa Barreto, por tudo que vivemos, pelos abraços em momentos de tristeza. Te amo “moção”.

Aos melhores amigos que a UFPE poderia me dar: Carlos Fabricio, Ronald Barcelos, André Victor, Antônio Juarez, Vanessa Moraes, Emylle Lira, Jefferson Alves, José Augusto e Anderson Filipe.

Aos amores que o coração carregou ao longo da caminhada da graduação, em especial ao amor atual, pelo apoio e confiança na minha capacidade.

Aos novos amigos que a vida me deu, Angélica Nogueira, Camila Sales e Aline Barros. Obrigado pelo carinho e admiração.

À minha banca, por ter aceitado avaliar e contribuir com este trabalho, Profa. Dra. Karoline Jamur e a Profa. Dra. Leidjane Oliveira.

E finalmente, a todos que por lapso de memória não tenha mencionado, mas, que eu sei, estão cientes da importância na minha trajetória profissional, não seria possível sem o apoio de todos.

RESUMO

O presente estudo analisa dados da missão GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*), a partir dos *mascons* (*mass concentration*), da resolução do laboratório GSFC - *Goddard Space Flight Center* vinculado a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), dados fornecidos pela ANA (Agência Nacional de Águas) e informações do índice físico de vegetação oriundo do sensor MODIS, a bordo do satélite TERRA, no período de janeiro de 2003 a julho de 2016, totalizando um estudo de 13 anos. A partir do estudo de correlação e tendência, foi elaborado um levantamento de 30 anos de dados históricos de precipitações para estudar o índice de seca da região até julho de 2018. A área de estudo é a RHANO (Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental), localizada no extremo nordeste brasileiro, desde o Piauí até Alagoas, onde ocupa 3,4% do território nacional, uma área de aproximadamente 287 mil km², abrangendo boa parte do Semiárido brasileiro caracterizada por apresentar períodos de estiagens prolongadas e temperaturas elevadas durante todo o ano. A pesquisa comprova a coesão de informações GRACE com os dados da ANA e dados do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), obtendo um coeficiente de correlação de Pearson no valor de 0,88 e 0,69 respectivamente, mostrando a alta correlação entre as fontes. O ano de 2009 obteve o maior índice de chuva no Nordeste, apontado tanto pelos dados de precipitação quanto pelo volume dos reservatórios, tendo seu ápice no mês de maio e a partir de março de 2012 o volume d'água entra em declínio. O índice de seca SPI (Índice de Precipitação Padronizado) indica a entrada da região num período de seca que começa em abril de 2012 chegando a um estado crítico em maio de 2013, perdurando a seca até junho de 2017. O estudo comprova a importância do uso do GRACE para monitorar recursos hídricos, auxiliando na tomada de decisões no aspecto econômico e social.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Seca. TWS (*Total Water Storage*).

ABSTRACT

The present study analyzes data from the GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) mission, from the mass concentration, from the GSFC-Goddard Space Flight Center laboratory-linked NASA (National Aeronautics and Space Administration), data provided by ANA (National Water Agency) and information on the physical index of vegetation coming from the MODIS sensor, aboard the TERRA satellite, from January 2003 to July 2016, totaling a 13 year study. From the correlation and trend study, a 30-year survey of historical precipitation data was prepared to study the drought index of the region until July 2018. The study area is RHANO (Eastern Northeast Atlantic Hydrographic Region), located in the extreme northeast of Brazil, from Piauí to Alagoas, where it occupies 3.4% of the national territory, an area of approximately 287 thousand km², covering a good part of the Semiarid characterized by periods of prolonged droughts and high temperatures throughout the year. The research confirms the cohesion of GRACE information with ANA data and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), data, obtaining a Pearson correlation coefficient of 0.88 and 0.69 respectively, showing the high correlation between the sources. The year of 2009 obtained the highest rainfall index in the Northeast, indicated by both the precipitation data and the volume of the reservoirs, with its peak in May and from March 2012, the water volume declines. The SPI (Standardized Precipitation Index) drought index indicates the region's entry into a drought period beginning in April 2012, reaching a critical state in May 2013, continuing the drought until June 2017. The study demonstrates the importance of using GRACE to monitor water resources, assisting in economic and social decision-making

Keywords: Water resources. Dry. TWS (Total Water Storage).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Representação dos satélites gêmeos da missão GRACE.	18
Figura 2 –	As 12 Regiões Hidrográficas Brasileiras.	22
Figura 3 –	Evolução das secas em função da duração e dos impactos.	26
Figura 4 –	(A) Localização da RH no Brasil, (B) ampliação da RH no Nordeste.	28
Figura 5 –	(A) Localização da RH no Brasil, (B) ampliação da RH no Nordeste com todas estações contidas na Região	29
Figura 6 –	(A) Localização da RH no Brasil, (B) Interseção entre a Região Hidrográfica e o Semiárido Brasileiro.	30
Figura 7 –	Fluxograma esquemático dos procedimentos metodológicos.	34
Figura 8 –	Interface do Modis Tools.	37
Figura 9 –	(A) Localização da RH no Brasil, (B) estações pluviométricas do INMET contidas na Região	39
Figura 10 –	Volumes pluviométricos médios por mês na região hidrográfica (1988-2018).	40
Figura 11 –	Distribuição normal com o SPI	45
Figura 12 –	Interface do executável SPI Generator 1.7.1.	45
Figura 13 –	Análise temporal a partir de dados da solução GRACE – GSFC.	46
Figura 14 –	Análise temporal a partir de dados da SAR-ANA.	47
Figura 15 –	Valores de máximos de mínimos anuais das observações GRACE.	48
Figura 16 –	Valores do NDVI correspondentes aos meses de máximos e mínimos das observações GRACE	48
Figura 17 –	Análise da variação anual em porcentagem dos dados ANA.	50
Figura 18 –	Análise da variação anual em porcentagem dos dados GRACE.	50
Figura 19 –	Gráfico SPI na escala de 12 meses.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Produtos da superfície terrestre gerados pelo sensor MODIS.	21
Tabela 2 –	Disponibilidade Hídrica per capita na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental.	30
Tabela 3 –	Capacidade dos Reservatórios.	31
Tabela 4 –	Meses faltantes de dados da missão GRACE.	35
Tabela 5 –	Composição percentual referentes ao número de reservatórios de cada estado na Região Hidrográfica do Atlântico Oriental.	36
Tabela 6 –	Estações pluviométricas utilizadas para obtenção de dados históricos de precipitação.	39
Tabela 7 –	Análise de máximos e mínimos dos dados ANA.	52
Tabela 8 –	Análise de máximos e mínimos dos dados GRACE.	53
Tabela 9 –	Classificação do Índice de Precipitação Padronizada	54
Tabela 10 –	Análise mensal dos valores SPI nos anos de seca.	56

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agencia Nacional de Águas
CCAR	<i>Colorado Center For Astrodynamics Research</i>
CSR	<i>Center for Space Research</i>
EOS	<i>Earth Observing System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GFZ	<i>Geo Forschungs Zentrum</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
GRACE-FO	Gravity Recovery e Climate Experiment Follow-On
GSFC	<i>Goddard Space Flight Center</i>
HDF	<i>Hierarchical Data Format</i>
IA	Índice de Aridez
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LACOST	Laboratório de Cartografia Costeira
Landsat	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MRT	<i>MODIS Reprojection Tool</i>
NDBI	<i>Normalized Difference Built-up Index</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NDMC	<i>National Drought Mitigation Center of the United States</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
PDSI	Índice de severidade de seca de Palmer
PHDI	Índice hidrológico de seca de Palmer
RH	Região Hidrográfica
RHANO	Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
SAR	Sistema e Acompanhamento de Reservatórios
SDS	<i>Science Data System</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPI	Índice de Precipitação Padronizado
SPOT	<i>Satellite Pour l' Observation de la Terre</i>

SR	Sensoriamento Remoto
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SWSI	Índice de fonte de água da superfície
TWS	<i>Total Watter Storage</i>
USGS	United States Geological Survey
WET	<i>Water Equivalente Thickness</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo Geral	17
1.2	Objetivo Específico	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Missão GRACE – Gravity Recovery and Climate Experim	18
2.2	Sensoriamento Remoto	19
2.2.1	Sensor MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.....	20
2.3	Recursos Hídricos	22
2.4	Regressão Linear	23
2.5	Seca e Índices de Seca	24
3	ÁREA DE ESTUDO	28
4	MATERIAIS E METODOS	32
4.1	Materiais	32
4.2	Recursos tecnológicos e hardware	32
4.3	Procedimentos Metodológicos	32
4.4	Dados GRACE (water equivalent thickness)	35
4.5	Dados dos reservatórios da ANA – Agência Nacional de Águas	36
4.6	Processamento Digital de Imagens MODIS	37
4.7	Dados de precipitação	38
4.8	O Índice de Precipitação Padronizada SPI	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	Comparação entre valores GRACE e valores NDVI-MODIS	49
5.2	Comparação entre dados GRACE e dados SAR-ANA	49
5.3	Análise dos resultados do SPI	53
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2003	63
	APÊNDICE B – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2003 ...	63
	APÊNDICE C – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2004	64
	APÊNDICE D – MAPA NDVI PARA A RHANO FEVEREIRO DE 2004 ...	64
	APÊNDICE E – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2005	65

APÊNDICE F – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2005....	65
APÊNDICE G – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2006.....	66
APÊNDICE H – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2006...	66
APÊNDICE I – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2007.....	67
APÊNDICE J – MAPA NDVI PARA A RHANO OUTUBRO DE 2007.....	67
APÊNDICE K – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2008.....	68
APÊNDICE L – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2008.....	68
APÊNDICE M – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2009.....	69
APÊNDICE N – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2009.....	69
APÊNDICE O – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2010.....	70
APÊNDICE P – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2010....	70
APÊNDICE Q – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2011.....	71
APÊNDICE R – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2011...	71
APÊNDICE S – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2012.....	72
APÊNDICE T – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2012....	72
APÊNDICE U – MAPA NDVI PARA A RHANO JULHO DE 2013.....	73
APÊNDICE V – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2013...	73
APÊNDICE W – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2014.....	74
APÊNDICE X – MAPA NDVI PARA A RHANO NOVEMBRO DE 2014..	74
APÊNDICE Y – MAPA NDVI PARA ABRILRHANO DE 2015.....	75
APÊNDICE Z – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2015...	75
APÊNDICE AA – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2016.....	76
APÊNDICE AB – MAPA NDVI PARA A RHANO FEVEREIRO DE 2016	76

1 INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno natural desastroso, que tem um impacto significativo nas esferas socioeconômicas, agrícolas e ambientais. Difere de outros desastres naturais por seu processo se dar de forma lenta e ter seu início e fim de difícil determinação. Por ser um processo lento, frequentemente a seca não atrai a atenção da comunidade, persistindo seu impacto mesmo depois do término do evento. As secas normalmente atingem uma vasta extensão espacial e temporal (Molina e Lima, 1999)

As análises de tendência temporal possibilitam a avaliação de longas séries de dados, sendo úteis para o acompanhamento e a predição da evolução da qualidade e quantidade da água. Essas análises têm como objetivo subsidiar medidas preventivas, corretivas e emergenciais a serem tomadas para a manutenção do equilíbrio do ecossistema (Christofaro, C. e Leão, 2009; Viana, 2011).

Desde 17 de março de 2002, os satélites gêmeos da missão *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), têm sido usados para monitorar o campo de gravidade da Terra nos domínios de espaço e tempo. Wahr et al. (1998) relataram que a maior amplitude e os mais variados sinais dependentes do tempo estão relacionados à variabilidade do armazenamento de água na Terra. Ramillien et al. (2008) concluíram que a gravimetria por satélite GRACE oferece técnicas alternativas para medir mudanças no armazenamento total de água em inglês *total watter storage* (TWS) considerando áreas continentais. Isso inclui gelo, neve, águas superficiais, umidade do solo e águas subterrâneas.

Diversos trabalhos evidenciam o monitoramento e importância, aplicados a diversas localidades no planeta, tais como, por exemplo, na África, com o trabalho de Awange et al. (2014), que estudaram as características espaço-temporais das mudanças no armazenamento de água e a variabilidade interanual e sazonal, bem como as mudanças no armazenamento total de água sobre a Etiópia. Ahmed et al. (2014) utilizaram dados do GRACE para monitorar variações induzidas naturais e antrópicas na disponibilidade de água em toda a África, Ndehedebe et al. (2016) apresentam os campos gravimétricos mensais do GRACE para fornecer estimativas de mudanças integradas verticalmente na TWS durante o período. 2002–2014 na África Ocidental. Na Austrália Chen et al. (2016) estudaram a mudança de armazenamento de água subterrânea a longo prazo em Victoria, a partir do GRACE e observações *in situ*, nos EUA. Já Molodtsova et al. (2015) avaliaram o potencial de inundação com o GRACE nos Estados Unidos. Na Ásia Xiang et al. (2016) estudaram as mudanças no armazenamento de água subterrânea no planalto tibetano e áreas adjacentes reveladas a partir dos dados gravitacionais do satélite GRACE. No

Brasil, Sun et al. (2016) utilizaram dados GRACE, de 2002 a 2015, para avaliar e quantificar a seca em curso na bacia hidrográfica do Rio São Francisco. Montecino et al. (2016), demonstram outra aplicabilidade do GRACE na América do Sul com enfoque para águas subterrâneas na região norte do Chile.

O Sensoriamento Remoto é uma ferramenta de obtenção de dados da superfície terrestre, que constitui uma técnica importante para o acompanhamento sistemático ambiental. Essa ferramenta assume um papel na estimativa dos diversos fenômenos meteorológicos e ambientais, servindo de suporte para monitoramento e estudo das mudanças climáticas e possibilitando a tomada de decisão para preservação ambiental (Moreira, 2003).

O sensor “*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*” (MODIS) a bordo dos satélites Terra e Aqua, tem como objetivo geral fornecer suporte a três segmentos do projeto “*Earth Observing System*” (EOS): atmosfera, oceano e continente. Esse sensor permitiu avanços nos trabalhos que necessitam de maior resolução temporal aliada à moderada resolução espacial (250m). Os produtos são voltados para aplicações terrestres, direcionados para o monitoramento da cobertura vegetal do planeta, para identificar mudanças decorrentes de variações no clima e tempo (Justice et al., 2002).

Os índices espectrais são uma das técnicas mais comuns usadas para analisar dados de sensoriamento remoto (Huete, A.R., Liu, H.Q., et al., 1997). Os índices espectrais concentram-se em enfatizar as características da vegetação, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) tem sido utilizado com sucesso para o monitoramento de mudanças na vegetação em escala regional, continental e global (Bannari et al., 1995; Huete et al., 2002; Junges e Fontana, 2009)

As secas podem ser diagnosticadas, com base em uma série histórica de dados meteorológicos, por meio de índices quantificadores de secas e análises estatísticas. Esses índices identificam os períodos de seca ou umidade em uma área pontual ou regional a partir de equações empíricas. A utilização de índices para quantificar a seca se faz necessária para determinar a intensidade, a duração e a frequência em que essa anomalia ocorre (Fernandes, 2009).

O Índice de Precipitação Padronizado (SPI) é um índice de seca meteorológica desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist (1993) com o objetivo de monitorar e analisar a seca, e quantificar variações da precipitação em várias escalas de tempo. O SPI pode ser aplicado a qualquer região que possua uma série histórica de dados mensais de precipitação de, no mínimo, 30 anos. Nesse trabalho são analisadas as secas ocorridas desde 1988 na Região do

Atlântico Nordeste Oriental, através de dados de precipitação coletados em 30 estações pluviométricas registradas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

1.1 Objetivo Geral

Analisar as variações de armazenamento d'água a partir de series temporais na Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental

1.2 Objetivo Específico

- Utilizar dados temporais advindos dos satélites GRACE para analisar as variações de armazenamento d'água para o período em estudo;
- Comparar as observações obtidas pelo GRACE com o volume acumulado de armazenamento de água nos principais reservatórios presentes na área de estudo
- Utilizar imagens do sensor MODIS para elaboração de índice físico (NDVI) e correlacionar com observações obtidas pelo GRACE;
- Levantamento de dados meteorológicos para elaboração de índice de seca: SPI;
- Efetuar a regressão linear das observações temporais para identificar o comportamento da série e sua possível tendências para os próximos anos associando com resultados do SPI para os anos seguintes até julho de 2018.

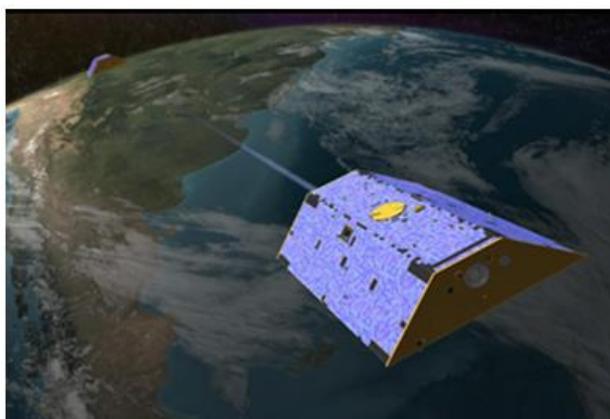
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Missão GRACE - *Gravity Recovery and Climate Experiment*

A missão GRACE teve seu lançamento em 17 de março de 2002, é uma missão espacial conjunta entre os Estados Unidos e a Alemanha dedicada ao monitoramento de variações temporais e espaciais do campo de gravidade da Terra em escala global. Emprega dois satélites em órbita terrestre de baixa altitude no mesmo plano orbital (altitude de 460 km, $89,5^\circ \pm$ inclinação) operando em uma distância de 220 km entre os dois satélites (Wahr et al., 1998; Tapley et al., 2004).

A separação dos satélites é medida por um sistema de taxa de alcance da banda *K*, suas órbitas são obtidas por dados fornecidos por um receptor GPS (*Global Positioning System*) e refletores de alcance a laser a bordo do satélite.

Figura 1: Representação dos satélites gêmeos da missão GRACE.



Fonte: NASA/JPL-Caltec.

Destaca-se que o GRACE não utiliza para o monitoramento global o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres, preceito básico do Sensoriamento Remoto (Meneses e Almeida, 2012).

As soluções que descrevem as mudanças espaciais e temporais no campo de gravidade da Terra são geradas em intervalos regulares, por exemplo a cada 30 dias, por várias instituições em todo o mundo. Cada instituição faz uso de modelos avançados diferentes para modelar algumas variáveis como: marés, dinâmicas atmosféricas e oceânicas. Portanto, é de se esperar uma certa diferença nas soluções finais.

De acordo com Sakumura et al. (2014) existem três principais centros responsáveis pelo processamento, *Science Data System* (SDS), que disponibilizam mensalmente de forma gratuita as soluções obtidas pelo GRACE sendo eles: o CSR (*Center for Space Research*) localizado na Universidade do Texas, Austin, Estados Unidos da América, o JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) em Pasadena, Estados Unidos da América e o GFZ (*Geo Forschungs Zentrum*) em Potsdam, Alemanha). Além destes centros oficiais existem soluções não oficiais independentes.

Os sensores geodésicos espaciais oferecem uma oportunidade para o monitoramento do armazenamento total de água (TWS – *Total WaterStorage*), é interpretado como a soma de águas subterrâneas, umidade do solo, águas superficiais, neve e gelo (Swenson et al., 2013), que junto com a água contida na biomassa são os principais componentes de armazenamento de água terrestre (Rodell e Famiglietti, 2001). De forma prática, os dados GRACE são apresentados como “equivalente à altura d’água” (*water equivalent thickness - wet*), em unidades de comprimento (mm, cm), que refletem no TWS.

Os produtos são apresentados na forma de malha (*grid*) e dentre suas aplicações podem ser utilizados para verificar o comportamento temporal das mudanças de massa em termos de superfície de equivalente à altura d’água (Wahr et al., 1998). Os *grids* para continente (terras emersas e da criosfera) e oceano são apresentados separadamente.

Os *mascons* (*mass concentration*), ou "concentrações de massa", tem como definição uma região onde contém uma grande anomalia gravimétrica, o termo *mascon* pode ser usado como substantivo para descrever uma distribuição de massa em excesso em cima ou abaixo da superfície do planeta. Os *mascons* GRACE são como células discretas localizadas na superfície da Terra, cada uma com seu pequeno sinal de gravidade, quando vistos como um todo, onde todos os *mascons* somam o campo de gravidade total da Terra. Visto individualmente, cada célula de representa o sinal de gravidade de uma área específica. Neste contexto, cada *mascon* comparado temporalmente mostra as mudanças locais na gravidade da célula, principalmente devido à mudança de armazenamento de água dentro e fora de cada célula.

2.2 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto (SR) compreende a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados e equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da

análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações (Novo, 2008).

Desde 1972 foram lançados satélites de monitoramento de recursos ambientais, tais como os da série *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat) e *Satellite Pour l' Observation de la Terre* (SPOT). A partir de 1986 foram lançados outros satélites entre eles o TERRA e o AQUA (Florenzano, 2007; Novo, 2008).

Estudos mais recentes (Bezerra et al., 2010; Lopes et al., 2011) comprovam que o SR apresenta potencial adequado para monitoramento e mapeamento do meio ambiente, envolvendo vários parâmetros biofísicos como albedo e temperatura da superfície, sendo os Índices de Vegetação (IV's) bastante explorados. Diversos IV's têm sido propostos na literatura com o objetivo de pesquisar as feições ambientais e detalhar o vigor da vegetação, especialmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo.

Os índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) são medidas radiométricas que são utilizadas para identificar nas imagens e determinar os tipos de informações, tais como rochas, cobertura vegetal, áreas inundadas, entre outros.

2.2.1 Sensor MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

Lançado a bordo da plataforma TERRA em dezembro de 1999 e da plataforma AQUA em maio de 2002, o MODIS é o carro-chefe do programa EOS da NASA e veio preencher essa lacuna na disponibilidade efetiva de dados de sensoriamento remoto de alta resolução temporal e espectral e moderada resolução espacial, voltados para aplicações sobre a dinâmica terrestre. Trata-se de um espectroradiômetro imageador de resolução espacial variada, entre 250m e 1000m, composto por um scanner óptico de varredura transversal e um conjunto de elementos detectores individuais capazes de fornecer imagens da superfície terrestre em 36 bandas espectrais distribuídas entre o visível e o infravermelho termal (0.4-14.3mm). As primeiras sete bandas são voltadas a aplicações ambientais, uso e ocupação da terra, e cobrem intervalos espectrais semelhantes aos dos sensores TM/ETM+. O sensor MODIS foi projetado para satisfazer os requerimentos de três campos de estudo como, atmosfera, oceano e terra com bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para tal objetivo e uma resolução temporal a cada 1-2 dias (Justice et al., 2002).

Os dados MODIS são transferidos para estações terrestres em *White Sands*, Novo México, através do Sistema de Rastreamento e Retransmissão de Dados por Satélite (TDRSS). Os dados são então enviados para o Sistema de Dados e Operações da EOS no *Goddard Space Flight Center*, onde são divididos em cinco níveis de 0 a 4 (NASA 2018), disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis.

Os produtos MODIS apresentam 11 (onze) usos primários distribuídos em suas 36 bandas, quer sejam: superfície terrestre/nuvem – bandas 1 e 2; propriedades da superfície/nuvem – bandas 3 a 7; cor dos oceanos/fitoplânctons/bioquímica – bandas 8 a 16; vapor de água atmosférico – bandas 17 a 19; temperatura das nuvens/superfície – bandas 20 a 23; temperatura atmosférica – bandas 24 e 25; cirrus – banda 26; vapor de água – bandas 27 a 29; ozônio – banda 30; temperatura das nuvens/superfície – bandas 31 e 32 e; altitude/topo da nuvem – bandas 33 e 36 (Bakker et al., 1992).

O sensor MODIS, a bordo do satélite Terra, tem seus dados disponibilizados em diferentes produtos, dentre os quais se destacam para estudos da vegetação disposta na superfície da Terra, o MOD09, que são valores de reflectância de superfície, o MOD13, que são índices de vegetação EVI e NDVI e o MOD15, que são estimativas de Índices de Área Foliar (LAI).

Tabela 1: Produtos da superfície terrestre gerados pelo sensor MODIS.

Produtos	Descrição	Resolução	
		Temporal	Espacial
MOD09	Reflectância superfície	1 e 8 dias	1 km; 250 m e 500 m
MOD13	Índices vegetação (NDVI e EVI)	16; 30 e 32 dias	1 e 28 km; 250 m e 500 m
MOD15	Índices área foliar (LAI) e FPAR	8 e 32 dias	1 e 56 km

Fonte: Justice *et al.* (2002) e Latorreet al. (2003)

Os produtos MODIS atualmente se encontram na versão 6, onde são obtidos via plataforma (<https://search.earthdata.nasa.gov>) em formato HDF (*Hierarchical Data Format*) o qual foi estabelecido como padrão para hospedar o modelo de dados implementado pela EOS

a partir de estudos realizados pela NASA. Estes arquivos se auto descrevem, facilitando entendimento de sua estrutura e do seu conteúdo (Justice et. al., 2002).

Os arquivos HDF possuem uma nomenclatura padrão, o prefixo **MOD** é o reservado para os arquivos provenientes do satélite Terra, e **MYD** trata do prefixo reservado para designar os produtos da plataforma Aqua. Este formato foi escolhido por suporta múltiplos tipos de dados, ter uma portabilidade, facilidade de uso e implementação, os programas são gratuitos e de fácil acesso para conversão, e disponibilidade de ferramentas para manipulação e visualização dos dados em HDF.

2.3 Recursos Hídricos

O Brasil possui uma área de 8.512.000 km² e cerca de 207,7 milhões de habitantes (IBGE, 2018), o país é hoje o quinto do mundo em extensão territorial e em população. Com dimensões continentais, os contrastes existentes quanto ao clima, à distribuição populacional, ao desenvolvimento econômico e social, entre outros fatores, são muito grandes, fazendo com que o país apresente os mais variados cenários. A grande disponibilidade de água em certas regiões do Brasil deve ser considerada, sem dúvida, um enorme recurso natural a ser utilizado para o desenvolvimento econômico regional, para o estímulo à economia e para a promoção de alternativas adequadas para o desenvolvimento social.

A Região Hidrográfica Brasileira foi determinada como o espaço territorial brasileiro compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, com vistas a orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (CNRH, 2003). As 12 regiões hidrográficas brasileiras são: Amazônica, Tocantins-Araguaia, São Francisco, Paraná, Parnaíba, Atlântico Nordeste Oriental, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Leste, Sudeste, Atlântico Sul, Uruguai e Paraguai.

Figura 2: As 12 Regiões Hidrográficas Brasileiras.



A bacia hidrográfica é definida como uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. É composta basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que conflua resultando em um leito único no exutório (Silveira, 2001)

Os principais componentes – solo, água, vegetação e fauna – coexistem em permanente e dinâmica interação, respondendo às interferências naturais e às de natureza antrópica, afetando os ecossistemas como um todo. Nesses compartimentos naturais – bacias hidrográficas – e os recursos hídricos constituem em indicadores das condições dos ecossistemas, no que se referem aos efeitos do desequilíbrio das interações dos respectivos componentes (Souza et al., 2002).

2.4 Regressão Linear

A regressão linear simples constitui uma tentativa de estabelecer uma equação matemática linear (linha reta) que descreva o relacionamento entre duas variáveis. A finalidade de uma equação de regressão seria então estimar valores de uma variável, com base em valores conhecidos da outra. A análise de regressão apenas indica qual relacionamento matemático pode existir. Em outras palavras, nem a regressão nem a correlação podem mostrar que uma variável tenda a “causar” certos valores de outra variável. As equações lineares (de uma linha reta) são importantes porque servem para aproximar muitas relações da vida real, e porque são relativamente fáceis de lidar e de interpretar. Outras formas da análise de regressão, tais como regressão múltipla (mais de duas variáveis) e regressão curvilínea (não-linear) envolvem extensões dos mesmos conceitos usados na regressão linear simples.

Dois importantes características da equação linear são o coeficiente angular da reta e a cota da reta em determinado ponto. Uma equação linear tem a forma:

$$y = a + bx \quad (2)$$

Onde a e b são valores determinados com base nos dados amostrais; a é a cota da reta em $x = 0$, e b é o coeficiente angular, a variável y é a variável que deve ser predita, e x é o valor preditor.

Os dados amostrais usados para calcular uma reta de regressão podem ser encarados como um número relativamente pequeno de observações possíveis provenientes de uma população infinita de pares de valores, nesse sentido, a reta de regressão calculada pode ser

encarada como uma estimativa da relação real, onde a equação 1 é completa pela dispersão (ε) na equação 3.

$$y = a + bx + \varepsilon \quad (3)$$

A dispersão existe pelo fato de não existir um relacionamento perfeito entre as duas variáveis, significando que para qualquer valor de x , haverá muitos valores possíveis de y . A análise de regressão supõe que, para cada valor possível de x , há uma distribuição de y 's potenciais que segue a lei normal. É a chamada distribuição condicional (isto é, dado x). A distribuição condicional equivale a uma fina fatia vertical da população tomada em dado valor de x . Admite-se, além disso, que todas as distribuições condicionais tenham o mesmo desvio padrão e que y seja uma variável aleatória (isto é, os x 's podem ser pré-selecionados, mas não os y 's).

2.5 Seca e Índices de Seca

A seca é um fenômeno natural desastroso, que tem um impacto significativo nas esferas socioeconômicas, agrícolas e ambiental. Por ser um processo lento, frequentemente a seca não atrai a atenção da comunidade, persistindo seu impacto mesmo depois do término do evento. As secas normalmente atingem uma vasta extensão espacial e temporal (Molina, 1999; Fernandes, 2009).

Existem diversas maneiras de se definir seca, dependendo principalmente da temática da abordagem. Essas abordagens podem ser relacionadas com a precipitação, agricultura, hidrologia e a socioeconômica. Sendo assim, vários autores (Wilhite; Glantz, 1987; Byun; Wilhite, 1999; Mckee et al., 1993) definiram quatro tipos de secas, sendo elas ameteorológica, a agrícola, a hidrológica e a socioeconômica.

Embora as secas estejam classificadas nesses quatro tipos, todas são originadas da deficiência de precipitação, que resulta na falta de água para o desenvolvimento de atividades ou para a sobrevivência dos seres vivos (Wilhite, 2003).

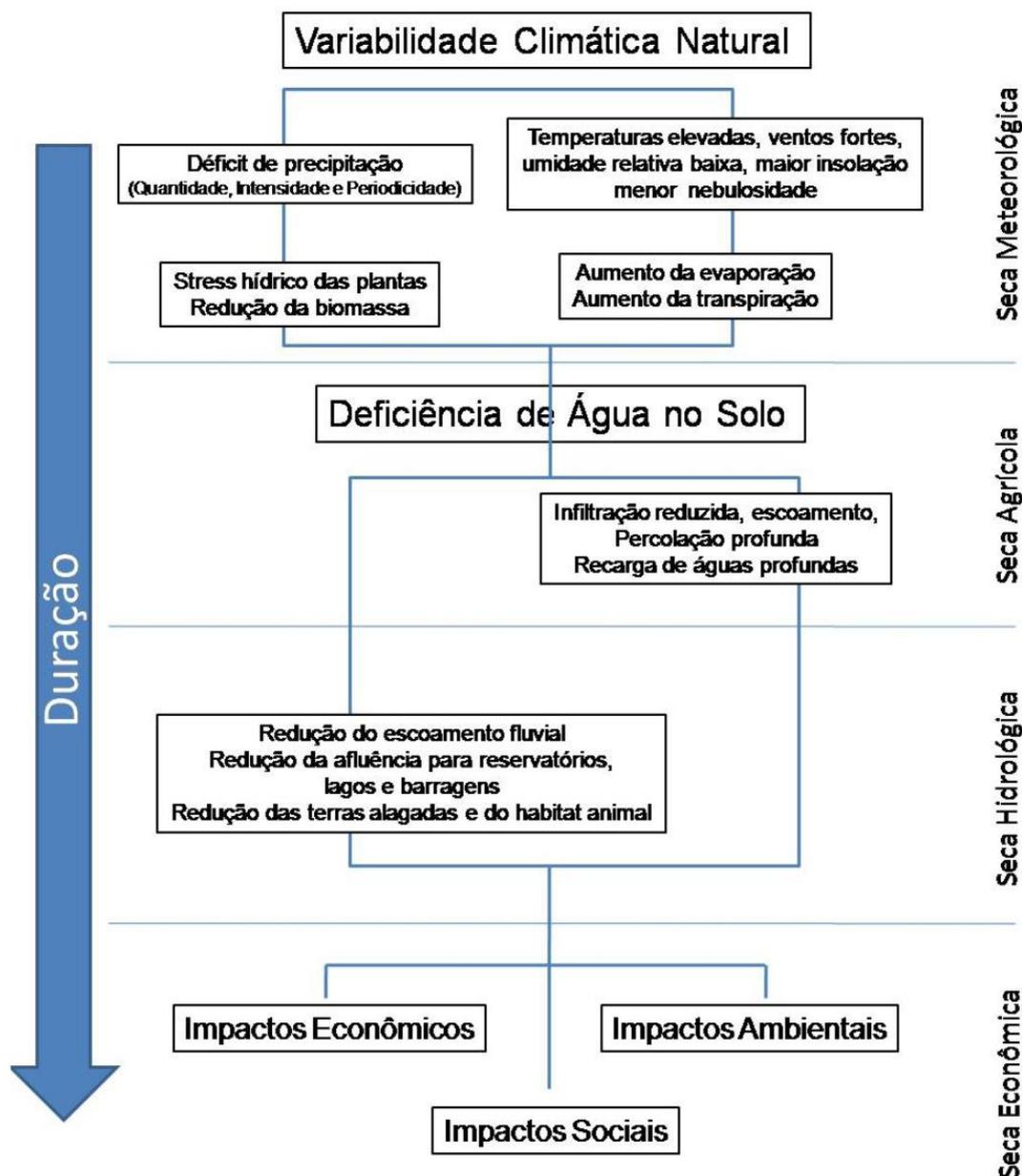
Segundo Albuquerque (2010), a seca difere das outras catástrofes naturais devido aos seguintes fatores:

- Trata-se de um fenômeno em que os efeitos se acumulam lentamente, sobre um período de tempo considerável. Geralmente requer um mínimo de dois ou três meses para começar a se estabelecer e pode se prolongar por anos, após o término do evento;

- A ausência de uma definição precisa e universalmente aceita da seca aumenta a confusão sobre a existência ou não dela e em caso afirmativo, seu grau de gravidade;
- Os impactos da seca geralmente atingem extensões maiores do que dos danos causados por outros riscos naturais.

A Figura 3 mostra o desenvolvimento da evolução temporal na cadeia de fenômenos que resultam uma seca, passando pelos tipos de seca. Tendo início pela seca meteorológica caracterizada pelo déficit da precipitação em relação ao valor normal e pela falta de água induzida no desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação, a qual desencadeia uma série de eventos que resultam em uma seca agrícola, que está associado à disponibilidade de água no solo para suportar o crescimento e desenvolvimento das plantas, onde mais tarde, em função da longa duração do período da seca, torna-se uma seca hidrológica cuja redução dos níveis médios de água em reservatórios de superfície e subterrâneos, num determinado período de tempo, podendo ser de dias, semanas, meses ou anos sucessivos. Por último, ocorre a seca socioeconômica onde está relacionada com o impacto da seca sobre as atividades humanas, incluindo os impactos diretos e indiretos na produção agrícola e outras atividades econômicas, que impactam os setores sociais, ambientais e econômicos. A dimensão e a gravidade do problema são basicamente dependentes da extensão e da duração da seca meteorológica (Fernandes, 2009).

Figura 3: Evolução das secas em função da duração e dos impactos.



Fonte: Fernandes, 2009.

A compreensão mais eficaz para investigar a seca e seus impactos, incluindo seu começo e o seu fim, está na utilização de índices criados por vários pesquisadores para medir a severidade da seca (Fernandes, 2009)

Os índices de seca analisam dados históricos, e variáveis meteorológicas como precipitação, temperatura do ar, evapotranspiração, escoamento superficial (*run off*), umidade do solo, entre outras variáveis. Tais combinações são elaboradas a fim de identificar o início de um período de seca.

Segundo Albuquerque (2010) os vários tipos de índices são classificados de acordo com o tipo de seca que eles definem:

- Índices de secas meteorológicas são associados a variáveis climatológicas como precipitação, temperatura e evaporação. Exemplos deste tipo de índices são: índice de anormalidades discretas e acumuladas de precipitação; índice de quantils (quintils, decils, percentis); índice da percentagem de precipitação média; índice de severidade de seca de Palmer (PDSI), índice padronizado de precipitação (SPI).
- Índices de secas hidrológicas incluem no seu cálculo variáveis relacionadas ao sistema de água como níveis de águas subterrâneas, vazões, armazenamento de reservatórios, umidade de solo e acúmulo de neve. Alguns índices são: índice de déficit total de água; índice hidrológico de seca de Palmer (PHDI); índice de fonte de água da superfície (SWSI).
- Índices de secas agrícolas em que no seu cálculo são considerados fatores relacionados a cultivos e propriedades do solo, como umidade, temperatura, evapotranspiração, entre outros. Exemplos destes índices são: índice de umidade de colheita (CMI); índice de anormalidade da umidade de Palmer (índice Z); balanço hídrico; índice de aridez (IA) e índice de anormalidade de umidade.

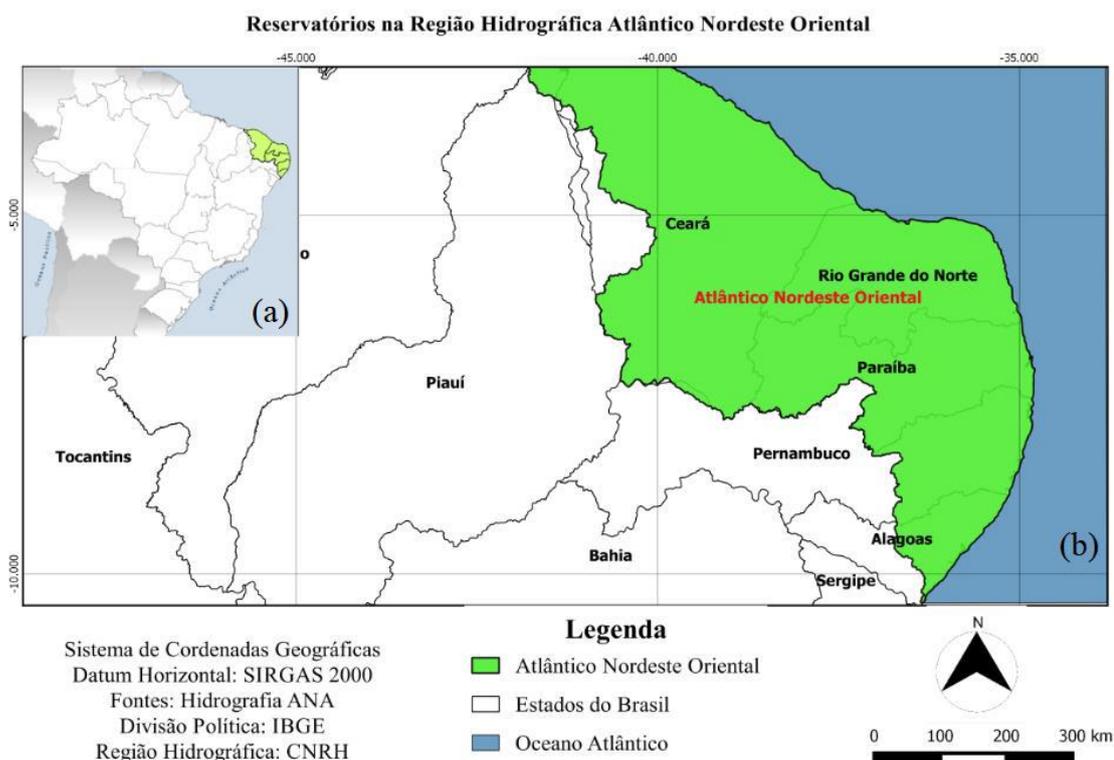
Keyantash e Dracup (2002) avaliaram multicriterialmente dezoito índices de seca, segundo os critérios de robustez, praticidade, transparência, sofisticação, dimensionalidade e extensão. O resultado apontou para o *deciles* e SPI como os melhores índices para a caracterização de seca meteorológica. Os autores destacaram o SPI como ótimo índice para estimar a severidade da seca (Albuquerque, 2010).

3 ÁREA DE ESTUDO

A Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental (RHANO) (Figura 4b) ocupa 3,4% do território nacional, uma área de aproximadamente 287 mil km², abrangendo seis estados: Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas. Quase a totalidade de sua área pertence à Região do Semiárido Brasileiro, caracterizada por apresentar períodos de estiagens prolongadas e temperaturas elevadas durante todo o ano, e com a menor disponibilidade hídrica do Brasil, porém possuindo grande importância econômica e social para região, de forma que abrange cerca de 740 municípios e as cinco importantes capitais dos estados. A densidade demográfica da região é de 21 milhões de habitantes, representando cerca de 12% da população do país (ANA 2018), disponível em: <http://www3.ana.gov.br>.

A região contempla fragmentos dos Biomas Floresta Atlântica, Caatinga, pequena área de Cerrados, e Biomas Costeiros e Insulares. É nesta bacia hidrográfica que se observa uma das maiores evoluções da ação antrópica sobre a vegetação nativa - a caatinga foi devastada pela pecuária que invadiu os sertões; a Zona da Mata foi desmatada para a implantação da cultura canavieira. Ainda hoje, o extrativismo vegetal, principalmente para exploração do potencial madeireiro, representa uma das atividades de maior impacto sobre o meio ambiente(ANA 2018), disponível em: <http://www2.ana.gov.br>.

Figura 4: (a) Localização da RH no Brasil, (b) ampliação da RH no Nordeste

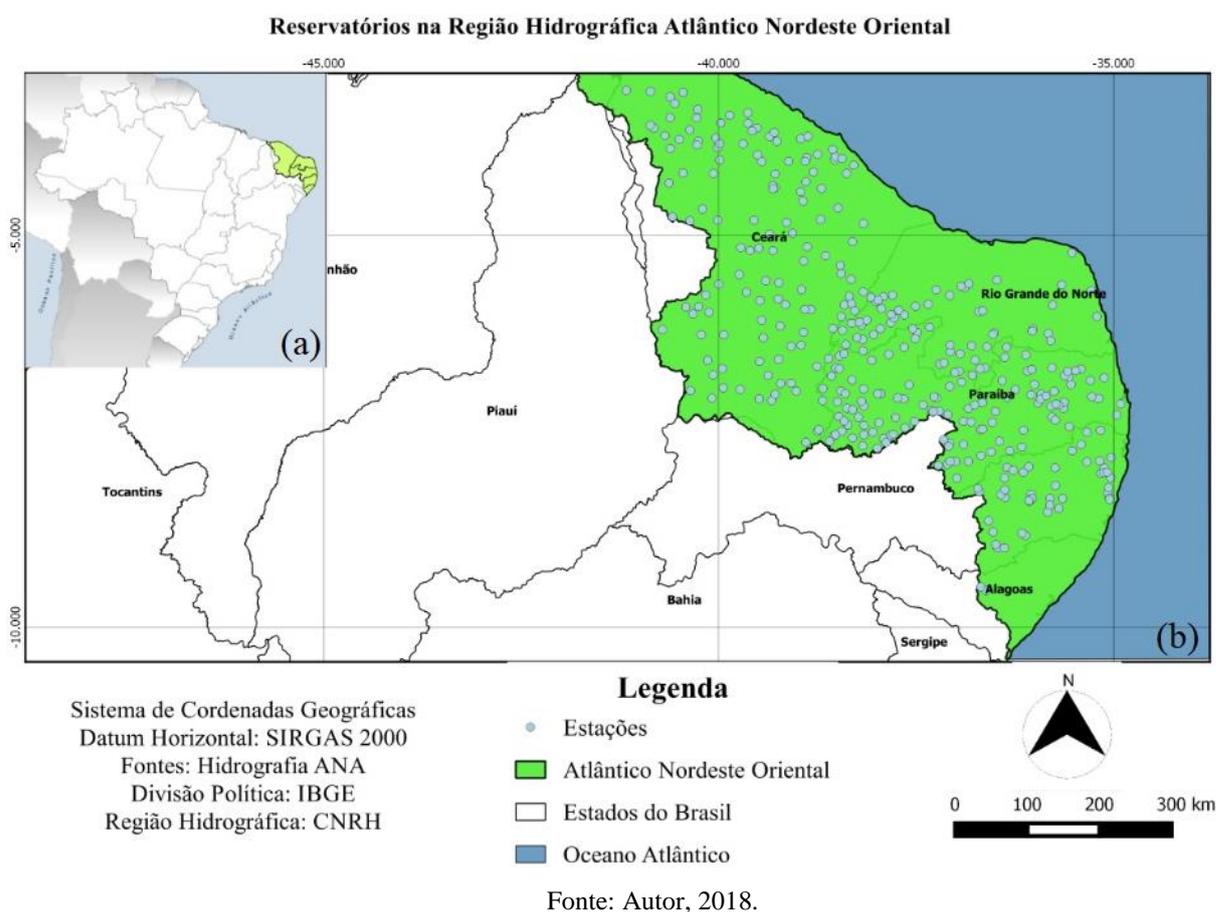


Fonte: Autor, 2018.

A região possui a maior parte dos rios de pequeno e médio porte, não apresentando grandes volumes de água, grande parte dos rios desta região tem a nascente no Planalto da Borborema e na foz no Oceano Atlântico. Os principais e maiores rios da bacia são o Paraíba, Jaguaribe, Capibaribe e Acaraú. Nas áreas desta região predomina o bioma da Caatinga. Os climas predominantes nesta bacia são: litoral úmido (faixa litorânea) e tropical semiárido (área interior).

Na área de estudo localizam-se diversos reservatórios, a Figura 5 apresenta a localização de todos os reservatórios existentes na região hidrográfica, ao todo são 357.

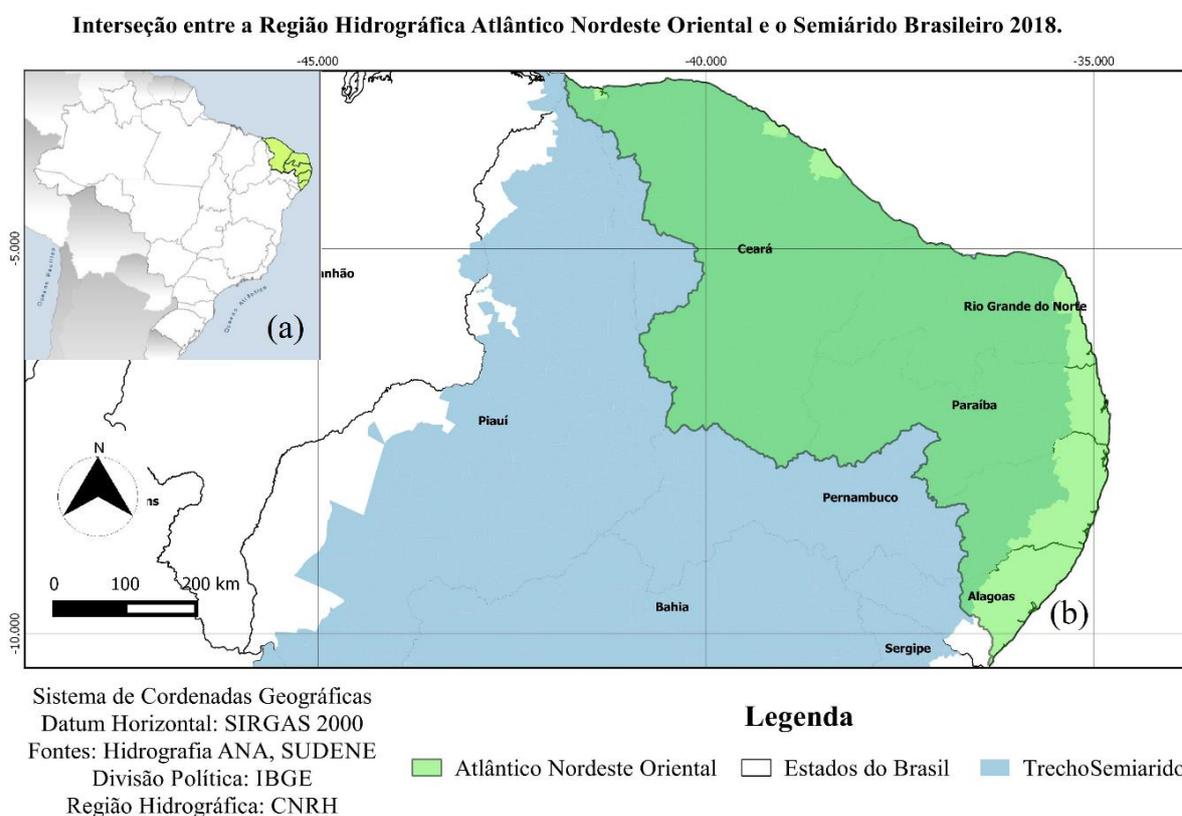
Figura 5: (a) Localização da RH no Brasil, (b) ampliação da RH no Nordeste com todas estações contidas na Região.



A RHANO tem sua área quase toda pertencente ao semiárido nordestino (Figura 6), onde apresenta períodos críticos de estiagens prolongadas, resultando assim uma baixa pluviosidade e alta evaporação. De acordo com a Tabela 2, pode se obter uma perspectiva desatualizada da disponibilidade hídrica per capita da região no ano de 2005, de acordo com o

Caderno da Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental publicado em novembro de 2006.

Figura 6:(a) Localização da RH no Brasil, (b) Interseção entre a Região Hidrográfica e o Semiárido Brasileiro.



Fonte: Autor, 2018

Tabela 2: Disponibilidade Hídrica per capita na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental

Sub-Região Hidrográfica	População (hab)	Q (m ³ /s)	q (m ³ /hab.ano)
Norte CE	5.046.781	234,7	1.467
Jaguaribe	2.162.960	197,5	2.880
Piranhas – Apodi	1.963.969	120,3	1.931
Litoral RN – PB	2.385.602	89,3	1.180
Paraíba	1.801.091	26,85	470
Litoral AL - PE - PB	8.246.478	110,4	422
Total	21.606.881	779	1.137

Fonte: Brasil(2005a); ANA(2006)

Segundo a Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil (2014), a precipitação média anual na RH é de 1.052 mm, abaixo da média nacional, de 1.761 mm. A disponibilidade hídrica superficial, considerando a vazão regularizada pelos reservatórios da região, é de 91,5 m³/s, o que corresponde a 0,1% da disponibilidade superficial do país (91.071 m³/s). A vazão média da RH é de 774 m³/s, correspondendo a 0,43% da vazão média nacional (179.516 m³/s).

Na tabela 2 são apresentados os maiores e principais reservatórios de cada estado, que estão contidos na região hidrográfica em estudo, ressaltando a inexistência de reservatórios no estado do Piauí (PI) para a área de estudo.

Tabela 3: Capacidade dos Reservatórios

Reservatório	UF	Hm ³
Castanhão	CE	6.700,00
Orós	CE	1.940,00
Araras	CE	891,00
Jucazinho	PE	327,00
Carpina	PE	270,00
Coremas/Mãe D'água	PB	1.358,00
Epitácio Pessoa	PB	411,69
Eng. Armando Ribeiro Gonçalves	RN	2.400,00
Santa Cruz do Apodi	RN	599,71
Palmeira dos Índios	AL	3,74

Fonte: ANA, 2018.

4 MATERIAIS E METODOS

4.1 Materiais

A seguir são listados os materiais utilizados neste trabalho:

- Banco de dados histórico fluviais dos 346 reservatórios em formato (.xls), fornecidos pela ANA;
- Banco de dados histórico do *mascons* solução referente a região hidrográfica em estudo do laboratório GSFC (*Goddard Space Flight Center*) em formato (.xls), dados GRACE;
- *Shapefile* dos pontos de localização dos reservatórios em estudo em formato (.shp) no sistema de referência SIRGAS 2000, dados SAR – ANA;
- Imagens do Sensor MODIS a bordo do satélite Terra, ao todo 56 imagens do produto MOD13em formato (.hdf) no período de 2003 a 2016, dados fornecidos pela USGS;
- Banco de dados histórico das 26estações pluviométricas em formato (.xls), fornecidos pelo INMET.

4.2 Recursos tecnológicos e *hardware*

Para elaboração deste trabalho, os recursos tecnológicos empregados foram:

- Download do software livre *QGIS Desktop 2.16.1 versões português 64bits;
- Download do software *ModisTool para reprojeção de dados MODIS;
- Download do executável *SPIGenerator versão 1.7.1 64bits;
- Software Microsoft Office Excel 2013 para geração de gráficos e tabelas;
- O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Cartografia Costeira (LACOST. <https://www.ufpe.br/laccost>) do Departamento de Engenharia Cartográfica.

**Softwares* de livre acesso.

4.3 Procedimentos Metodológicos

Foram levantados dados gratuitos da missão GRACE, via pagina da CCAR (*Colorado Center For Astrodynamics Research*), da Universidade do Colorado dos Estados Unidos da América, (<http://ccar.colorado.edu/grace/>), dados históricos gratuitos do SAR (Sistema de Acompanhamento de Reservatórios) da ANA via pagina (<http://sar.ana.gov.br/Medicao>), dados históricos gratuitos do sensor MODIS via pagina (<https://search.earthdata.nasa.gov>), dados

históricos gratuitos de precipitação de estações pluviométricas via página (<http://www.inmet.gov.br/portal/>).

Com posse dos dados, foram elaboradas com auxílio do *software* Excel, médias mensais e anuais dos volumes de todos os reservatórios em estudo, e médias anuais dos valores do *wet* (espessura da variação da lamina d'água procedente das observações GRACE), e foram identificados os meses com maiores e menores valores do volume total dos reservatórios e da espessura equivalente d'água. De acordo com as médias anuais foram gerados gráficos de dispersão entre o intervalo temporal de 2003 a 2016. Foi utilizada uma função existente no *Excel*, onde foi plotado a linha de tendência (item 2.4) a partir da regressão linear em ambos gráficos. Com posse dos produtos finais (gráficos de análise temporal), foram feitas análises comparativas para extração informações conclusivas sobre os objetivos específicos propostos (item 1.2).

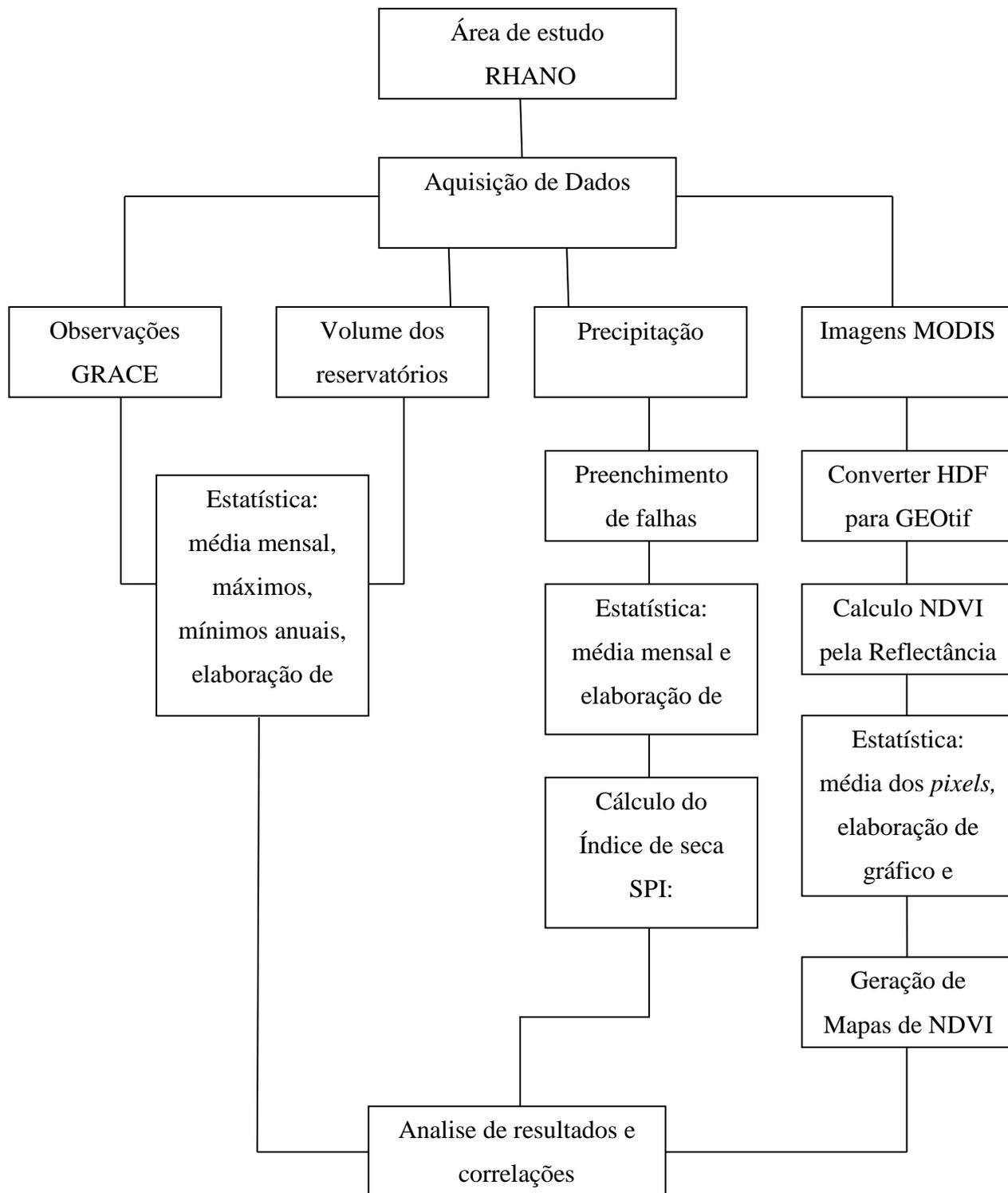
Com posse dos valores de máximos e mínimos anuais do *wet*, foram elaborados mapas dos índices de vegetação (Apêndice A - AB), a partir das imagens do sensor MODIS, referente a cada mês de cheia e estiagem identificado a partir do estudo do *wet*. De acordo com os meses estudados foram gerados gráficos de dispersão no intervalo temporal de 13 anos, tanto com as informações dos valores médios dos NDVI's calculados quanto informações da espessura equivalente d'água, com posse destes produtos finais (gráficos de análise temporal) foram feitas análises comparativas para extração informações conclusivas sobre os objetivos propostos.

Para elaboração da análise de seca da região, foram selecionados dados históricos mensais de 26 estações pluviométricas num intervalo de 1988 a 2018, totalizando um estudo temporal de 30 anos. Foi utilizado o Índice de Precipitação Padronizada (SPI), que se fez necessário a utilização do *software* executável *SPIGenerator*, desenvolvido pelo Centro Nacional de Mitigação das Secas dos Estados Unidos (NDMC).

Os dados obtidos das estações pluviométricas do INMET possuem falhas em suas séries históricas mais especificadamente no período de 1988 até meados de 1992. Essas falhas foram preenchidas a partir de fusões de outras fontes como a rede hidroclimatológica da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) via *site* (<http://www.sudene.gov.br/area-de-atuacao/regiao-nordeste-estatisticas/rede-hidroclimatologica-do-nordeste>), Sistema de Geoinformação Hidrometeorológico de Pernambuco SIGHPE gerido pela APAC (Agencia Pernambucana de Águas e Clima) via *site* (<http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/>), Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME via *site* (<http://www.funceme.br/>), e Secretaria do Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas – SEMARH via *site* (<http://meteorologia.semarh.al.gov.br/>).

A metodologia é apresentada simplificada a partir do fluxograma da Figura 7 a seguir:

Figura 7: Fluxograma esquemático dos procedimentos metodológicos.



Fonte: Autor, 2018

4.4 Dados GRACE (*water equivalent thickness*)

A solução GSFC fornece variações mensais do campo de gravidade a partir de 41.168 células de *mascon* com área igual a 1 grau de arco. Desde o início da missão GRACE, tem sido prática padrão aplicar produtos de desalinhamento de atmosfera e oceano ao processar os dados de Nível 1B para remover diretamente esses sinais de alta frequência das medições entre satélites e as soluções de gravidade distribuída (Luthcke, et al., 2013).

A resolução GSFC proporciona dados agrupados de todas as regiões hidrográficas, não só do Brasil, como também do mundo. Esses dados agrupam informações de todos os *mascons* que compõe a região hidrográfica em análise. Neste trabalho foram utilizadas as observações com os seguintes metadados, “*Location: EastBrazil, Region: 80, Basin: 3009, #ofmascon: 31*”.

Ao todo foram analisadas as informações mensais desde janeiro de 2003 a julho de 2016, gerando assim uma média anual das referências do “*water equivalente thickness*”, foram detectados meses faltantes (Tabela 4), a condição que ocasionou esses meses faltantes é recorrente a ajustes de orbitas e ao envelhecimento das baterias.

Tabela 4: Meses faltantes de dados da missão GRACE.

ANO	MESES FALTANTES
2003	Junho;
2011*	Janeiro, junho;
2012	Maio, outubro;
2013	Março, agosto, setembro;
2014	Fevereiro, julho, dezembro;
2015**	Maio, junho, outubro, novembro.

* Dois processamentos em outubro.

** Dois processamentos em abril.

Fonte: <http://ccar.colorado.edu/grace/gsf.html>

A pesquisa promoveu estatísticas contendo valores de máximos e mínimos e média aritmética além da regressão linear apresentando a tendência equivalente à altura d’água, referentes ao conjunto de *pixels* que se inserem na delimitação da área de estudo.

4.5 Dados dos reservatórios da ANA – Agência Nacional de Águas

A ANA define as regras de operação dos reservatórios do país e monitora, por meio do acompanhamento do nível da água, das vazões diárias de afluentes (o volume de água que entra por dia no reservatório) e defluentes (o volume de água que sai). Mensalmente, são preparados boletins de monitoramento dos principais reservatórios do Brasil. O Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) é outra ferramenta usada pela ANA, que permite acompanhar dados sobre a operação de alguns dos principais reservatórios do país, como os do Nordeste brasileiro.

A região hidrográfica em estudo é composta pelo Ceará, o estado com maior participação de reservatório e total de volume dos mesmos, seguido do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e por fim Alagoas. (Tabela 5). No levantamento dos dados no *site* da ANA, alguns reservatórios não existiam dados históricos, sendo 10 do estado de Pernambuco e 1 no estado da Paraíba.

Tabela 5: Composição percentual referentes ao número de reservatórios de cada estado na Região Hidrográfica do Atlântico Oriental.

RHANO				
Estado	Número de Reservatórios	Capacidade Total (hm ³)	Participação em (%)	
Ceará	131	1.149,32	4,23	
Rio Grande do Norte	54	3,74	0,01	
Paraíba	123	3.934,88	14,47	
Pernambuco	36	17.655,74	64,93	
Alagoas	2	4.445,02	16,35	

Fonte: ANA, 2018.

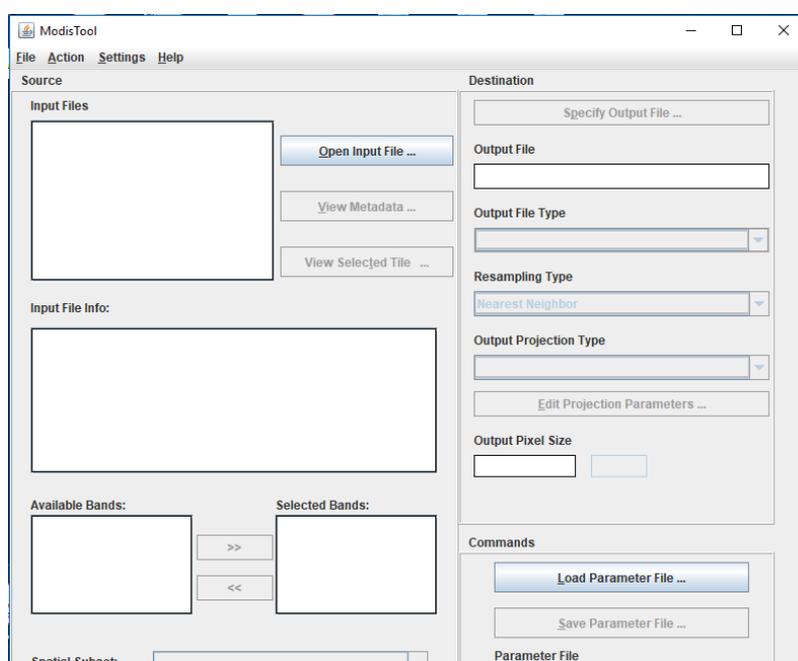
O banco de dados existente no *site* (<http://sar.ana.gov.br/Medicao>) é incompleto, nenhum reservatório possui informações completas tanto mensais quanto anuais sobre o nível de volume útil do mesmo, os reservatórios de Pernambuco só mostraram informações a partir de 2005, já os reservatórios de Alagoas a partir de 2004. A pesquisa promoveu estatísticas contendo valores de máximos, mínimos e média aritmética, além de plotar a linha de tendência dos 346 reservatórios que se insere na delimitação da área de estudo.

4.6. Processamento Digital de Imagens

As características gerais do MODIS permitem a geração de 44 produtos para diferentes tipos de pesquisas. Esses dados possuem alta resolução temporal, sendo georreferenciados e corrigidos dos efeitos atmosféricos, contribuindo para melhor compreensão sobre os sistemas globais (Wolf et al., 2002; Justice et al., 2002).

O tratamento dos dados MODIS é realizado em programas específicos desenvolvidos pela NASA, disponíveis gratuitamente, um exemplo é o MRT (*MODIS Reprojection Tool*) mostrado na Figura 8.

Figura 8: Interface do Modis Tools.



Fonte Autor, 2018.

O MOD13 foi desenvolvido para fornecer informações consistentes sobre condições da vegetação a partir de comparações espaciais e temporais, contendo bandas do azul, do vermelho e infravermelho próximo, seus dados são disponibilizados a cada 16 dias com uma resolução espacial de até 1000m.

A resposta espectral da vegetação é determinada não somente por suas características mais comuns, mas também pela interferência de diversos fatores como: radiação solar, espalhamento atmosférico, características de folha e dossel, teores de umidade refletância do solo, entre outros (Hueite et al., 2002). Portanto, o monitoramento da cobertura vegetal é resultado de um processo complexo que abrange parâmetros e fatores ambientais (Ponzoni, 2001).

O NDVI é obtido por meio de combinações das bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, está relacionado à absorção da radiação na região espectral do vermelho pelas clorofilas presentes nas células vegetais e ao espalhamento ou refletância pelas folhas da radiação na região do infravermelho próximo, por esse motivo é um índice que melhor destaca a vegetação. E segundo Viganó et al. (2011), o índice possui um intervalo de - 1 a +1, onde os valores negativos representam as nuvens e a água, os próximos de zero representam solo exposto ou superfície não vegetada e para os próximos de 1, mais densa é a vegetação, com um alto grau demonstrando a presença de vegetação na superfície.

$$NDVI = \frac{\rho_{ipv^-} - \rho_v}{\rho_{ipv^+} + \rho_v} \quad (4)$$

Onde:

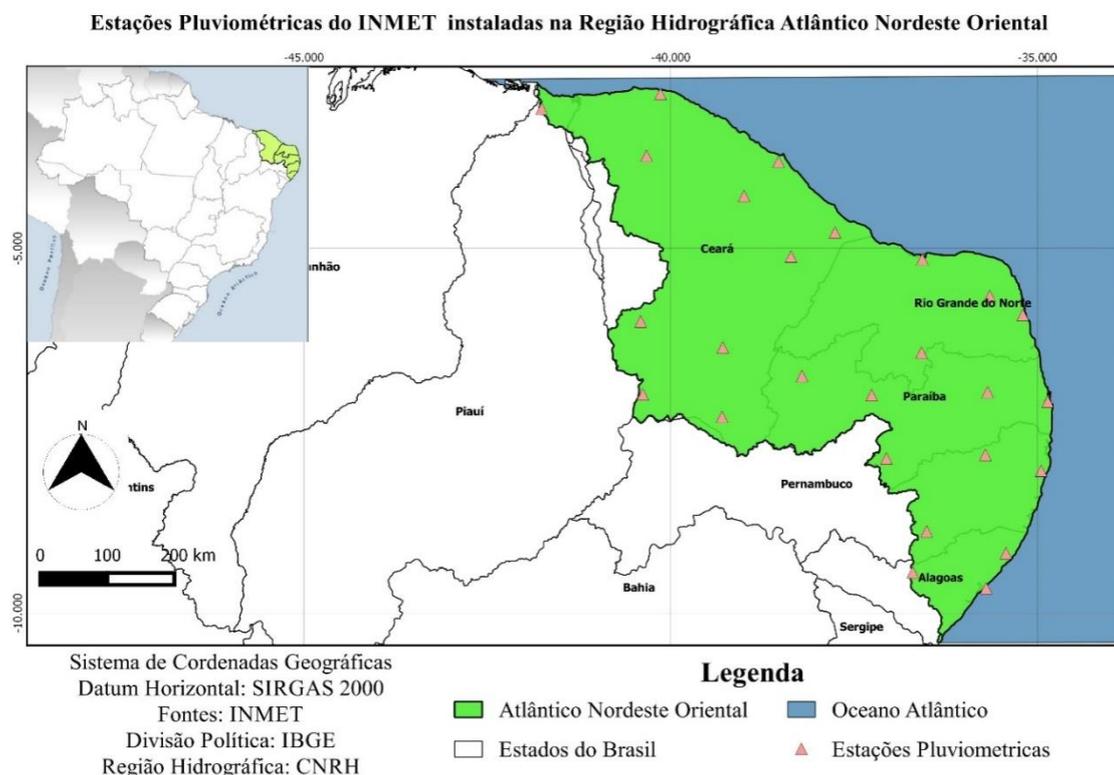
- ρ_v = reflectância da banda do infravermelho próximo;
- ρ_{ipv} = reflectância da banda do vermelho.

O NDVI permite que estudos sobre a cobertura vegetal sejam realizados com mais eficiência, pois com análises multi-temporais destes dados leva a avaliação da variação de área verde em um determinado período de tempo, sendo este, portanto o índice de vegetação mais amplamente utilizado em aplicações de sensoriamento remoto voltado para área agrícola.

4.7 Dados de precipitação

Ao todo, a pesquisa utilizou de 26 estações pluviométricas como mostra a Tabela 6, e sua localização espacial conforme estado representados na Figura 9.

Figura 9:(a) Localização da RH no Brasil, (b) estações pluviométricas do INMET contidas na Região.



Fonte: Autor, 2018

Tabela 6: Estações pluviométricas utilizadas para obtenção de dados históricos de precipitação.

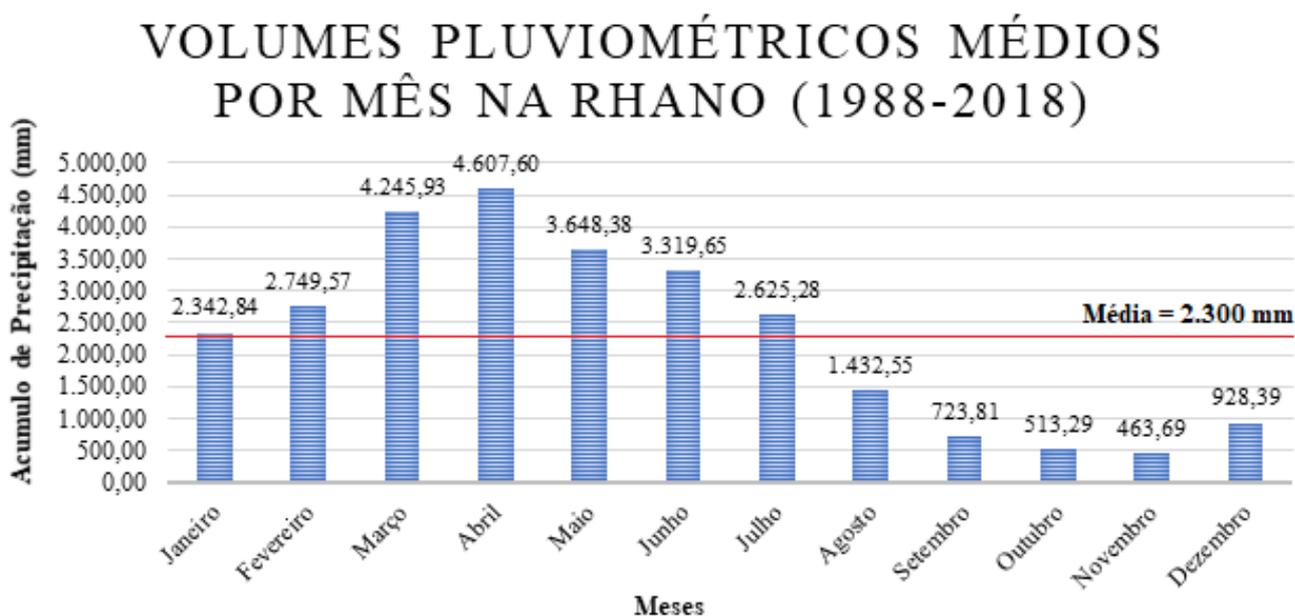
Estação	Estado	Latitude (°)	Longitude (°)	Estação	Estado	Latitude (°)	Longitude (°)
Maceió	AL	-9,66	-35,70	AREIA	PB	-6,97	-35,68
PALMEIRA DOS INDIOS	AL	-9,44	-36,70	JOAO PESSOA	PB	-7,10	-34,86
PORTO DE PEDRAS	AL	-9,18	-35,43	MONTEIRO	PB	-7,88	-37,06
ACARAU	CE	-2,88	-40,14	PATOS	PB	-7,01	-37,26
BARBALHA	CE	-7,31	-39,30	SAO GONCALO	PB	-6,75	-38,21
CAMPOS SALES	CE	-7,00	-40,38	GARANHUNS	PE	-8,88	-36,51
FORTALEZA	CE	-3,81	-38,53	RECIFE	PE	-8,05	-34,95
GUARAMIRANGA	CE	-4,28	-39,00	CURADO	PE	-8,05	-34,95
IGUATU	CE	-6,36	-39,29	SURUBIM	PE	-7,83	-35,71
				PARNAIBA	PI	-3,08	-41,76

JAGUARUANA	CE	-4,78	-37,76	CEARA MIRIM	RN	-5,65	-35,65
MORADA NOVA	CE	-5,11	-38,36	CRUZETA	RN	-6,43	-36,58
SOBRAL	CE	-3,73	-40,33	MACAU	RN	-5,15	-36,57
TAUA	CE	-6,00	-40,41	NATAL	RN	-5,91	-35,20

Fonte: INMET, 2018.

O estudo levantou dados de precipitação no período de janeiro de 1988 até julho de 2018, sendo utilizadas informações de precipitação acumulada de cada mês. De acordo com a Figura 10 observa-se uma concentração das chuvas no primeiro semestre do ano, chovendo acima da média mensal. Destacam-se os meses de março, abril, maio e junho que juntos representam 55% de toda chuva esperada para o ano todo, sendo o mês de abril o mais chuvoso. Por outro lado, de acordo com a Figura 10, o segundo semestre é bastante seco, sendo os meses de outubro e novembro os meses mais secos. Pode-se observar que os níveis de precipitação são crescentes de dezembro a abril e decrescentes de maio a novembro.

Figura 10: Volumes pluviométricos médios por mês na região hidrográfica (1988-2018).



Fonte: Autor, 2018.

4.8 Índice de Precipitação Padronizada - SPI

O déficit de precipitação possui diferentes impactos na água subterrânea, no armazenamento do reservatório, na umidade do solo e nos escoamentos dos rios. Isso fez com que McKee et al. (1993) desenvolvessem o Índice de Precipitação Padronizado (SPI). Esse índice quantifica o déficit de precipitação para múltiplas escalas de tempo que refletem o impacto da seca na disponibilidade de fontes de água. As condições de umidade de solo respondem às anomalias de precipitação em uma escala de tempo relativamente curta. O armazenamento de água subterrânea, dos fluxos de rios e do reservatório refletem as anomalias de precipitação a longo prazo. Por essa razão, McKee et al. (1993) originalmente calcularam o índice em escalas de tempo de três, seis, doze, vinte e quatro e quarenta e oito meses.

O cálculo do índice SPI para qualquer local é baseado no registro de precipitação de longo prazo ajustado a uma distribuição de probabilidade. Essa distribuição é então transformada para uma distribuição normal, de modo que permite a análise dos déficits e excessos de precipitação em diversas escalas tempo e provê informações de frequência e probabilidade de ocorrência. Os valores positivos de SPI indicam a0 excesso de água e negativos, escassez. Devido ao fato do SPI ser normalizado, climas mais secos ou úmidos podem ser representados no mesmo modo. Assim, períodos úmidos podem também ser monitorados usando o SPI (Fernandes, 2009).

Para o cálculo do SPI, deve-se utilizar uma base de dados de precipitação com pelo menos 30 anos, sendo ajustado por meio da distribuição gama, que posteriormente é transformada em uma distribuição normal, que por definição, apresenta sua média com valor zero e variância unitária.

O cálculo do SPI consiste inicialmente em ajustar a função densidade de probabilidade gama, a uma dada distribuição de frequência do total de precipitação para uma estação. A distribuição gama é dada por:

$$g(x) = \frac{1}{\beta\alpha\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (5)$$

Onde:

- $\alpha > 0$ é o parâmetro de forma (adimensional);
- $\beta > 0$ é o parâmetro de escala (mm);
- $x > 0$ é a quantidade de precipitação (mm);

- $\Gamma(\alpha)$ função Gama, equação 3.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (6)$$

Os parâmetros α e β da função densidade de probabilidade gama, são estimados para cada estação para as escalas de tempo que interessam estudar e para cada mês do ano. Utilizam-se as soluções de máxima verosimilhança para estimar α e β :

$$a = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (8)$$

$$A = Ln(x) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N Ln(x) \quad (9)$$

Onde:

- \bar{x} , é a média aritmética da precipitação pluvial (mm);
- Ln, logaritmo neperiano;
- N, número de observações de precipitação.

Os parâmetros resultantes são utilizados para determinar a probabilidade cumulativa de um evento de precipitação observado para um determinado mês e para a escala de tempo desejada para uma certa estação. A probabilidade cumulativa é dada por G(x), equação 7.

$$G(x) = \int_0^x g(x) = \frac{1}{\beta\alpha\Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (10)$$

Substituindo $t = \frac{x}{\beta}$, a equação 7 transforma-se na função gama incompleta, equação 8:

$$G(x) = \frac{1}{\beta\alpha\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (11)$$

Desde que a função gama é indeterminada para $x = 0$ e uma distribuição de precipitação pode conter zeros, a probabilidade cumulativa toma o seguinte aspecto, equação 9:

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (12)$$

Onde:

- $H(x)$ = distribuição de probabilidade cumulativa;
- q = probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros);
- $G(x)$ = distribuição cumulativa teórica.

Se m é o número de zeros em uma série temporal de precipitação, q pode ser estimado por $m/n + 1$. Utilizando tabelas da função gama incompleta para determinar a probabilidade cumulativa $G(x)$. McKee et al. (1993) usam um método analítico junto com um código de software sugerido por Press et al. (1988) para determinar a probabilidade cumulativa (Fernandes, 2009)

A distribuição de probabilidade cumulativa $H(x)$ é então transformada em uma variável aleatória normalizada (Z) com média zero e desvio padrão 1, onde a variável (Z) corresponderá ao valor de SPI. Essa é uma transformação equiprobabilística definiram como uma característica essencial para transformar uma variável de distribuição gama para uma variável com uma distribuição normal, onde a probabilidade de ser menor que um valor dado será igual à probabilidade de ser menor que o valor correspondente da variável transformada.

As probabilidades cumulativas empíricas dos dados de precipitação são ordenadas em ordem crescente de magnitude, de forma que os valores são baixos e onde o tamanho da amostra é dado pela equação 10:

$$q = \frac{m}{n+1} \quad (13)$$

Onde:

- m , número de ordem dos valores de zero em uma série climatológica;
- n , tamanho da amostra.

Visto que seria desnecessário reproduzir vários gráficos para cada localidade e em todas as escalas temporais possíveis e para cada mês do ano, o valor de (Z) ou SPI é obtido mais

facilmente pela aproximação matemática que converte a probabilidade cumulativa em uma distribuição normal a variável (Z) (Fernandes, 2009).

$$Z = \text{SPI} = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t^2 + c_2 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right); \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5. \quad (14)$$

$$Z = \text{SPI} = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t^2 + c_2 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right); \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1,0. \quad (15)$$

$$t = \sqrt{\text{Ln} \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad : \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5. \quad (16)$$

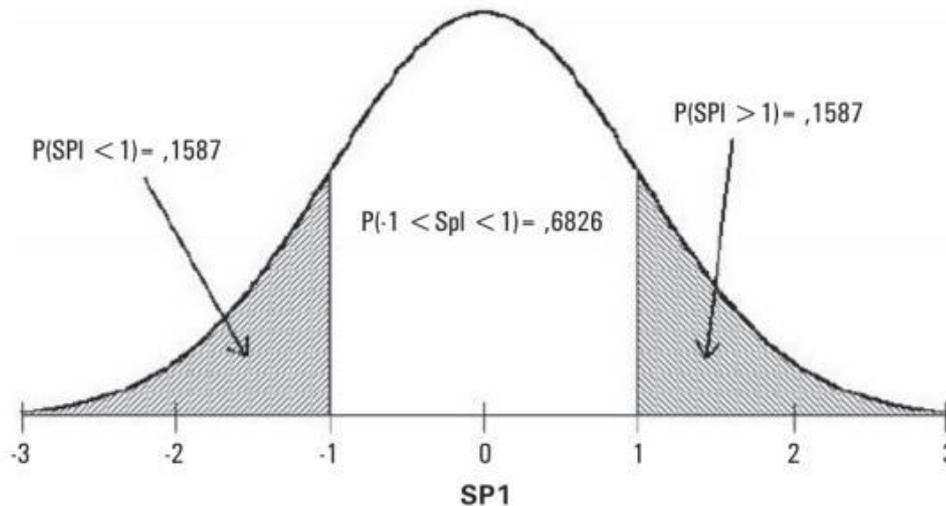
$$t = \sqrt{\text{Ln} \left[\frac{1}{1 - (H(x))^2} \right]} \quad : \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1,0. \quad (17)$$

Onde:

- $C_0 = 2,515517$;
- $C_1 = 0,802853$;
- $C_2 = 0,010328$;
- $d_1 = 1,432788$;
- $d_2 = 0,189269$;
- $d_3 = 0,001308$.

Conceitualmente, o SPI representa o z-score, ou seja, o número de desvios padrão acima e abaixo do qual um evento (valor) se encontra em relação à média. Entretanto, isso não é totalmente correto para escalas curtas de tempo, visto que a distribuição original da precipitação original não é assimétrica. No entanto, a Figura 11 ilustra que durante o período base, no qual os parâmetros gama são estimados, o SPI terá uma distribuição normal com valor esperado 0 e variância 1. Um índice com essas características é desejável de modo a permitir comparações de valores do índice para diferentes localidades e regiões significantes (Fernandes, 2009).

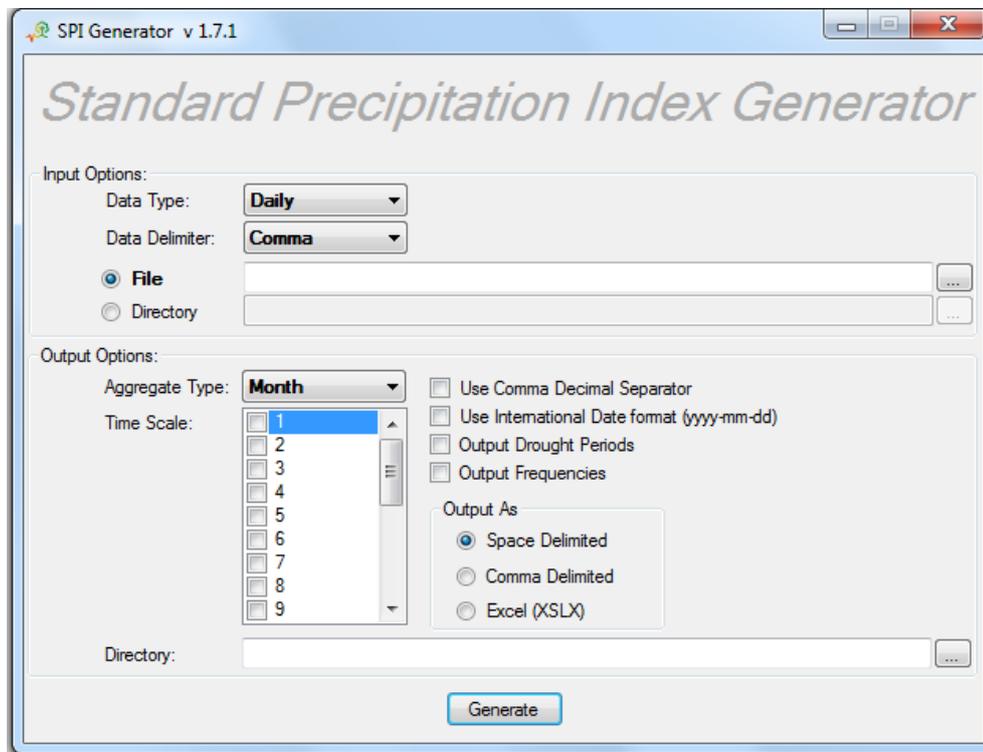
Figura 11: Distribuição normal com o SPI



Fonte: Fernandes, (2009)

O cálculo do SPI foi efetuado com um *script* desenvolvido pelo Centro Nacional de Mitigação das Secas dos Estados Unidos (NDMC), cuja interface está mostrada na Figura 12.

Figura 12: Interface do executável SPI Generator 1.7.1.



Fonte: Autor, 2018.

No programa deve informar as configurações do dado de entrada que devem estar em formato (*.txt), informar o diretório do dado de entrada, selecionar o intervalo SPI desejado, seja ela de 12,18,24 ou 36 meses e por fim informar o diretório do dado de saída.

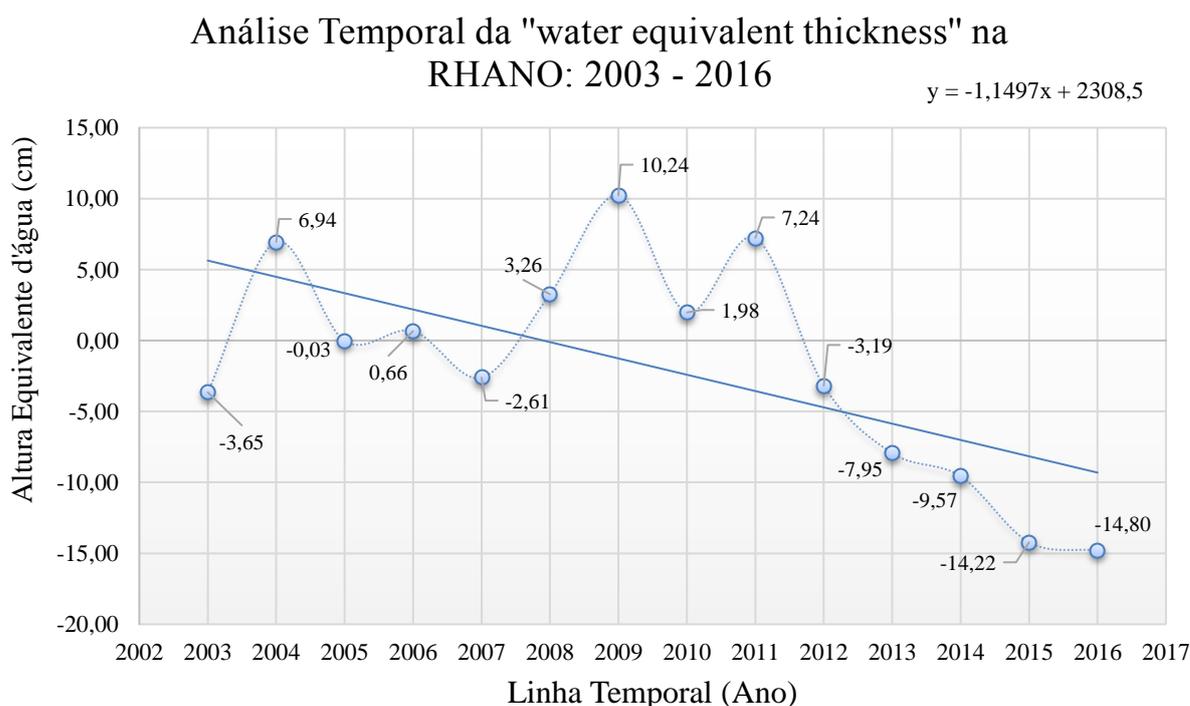
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 13 apresenta o gráfico a partir das médias anuais da equivalência total d'água, onde foi calculada a reta de tendência junto com sua equação e o coeficiente de determinação.

O gráfico apresenta variações anuais da altura equivalente de água em centímetros (cm) da região hidrográfica.

A região possui grandes picos referentes aos anos de 2004 resultante de vários fenômenos atmosféricos, o ano de 2009 foi considerado o ano mais chuvoso da década, o ano de 2011 se destaca devido ao evento do fenômeno *La niña*, onde teve a configuração chamada de Modoki (denominação do segundo modo de variabilidade da TSM do Pacífico Tropical) (Martins e Vasconcelos Junior, 2017). A partir do ano de 2012 os valores são cada vez mais negativos, e segue em declínio até a data final do período de estudo em 2016, esse evento é associado a mais uma grande seca no Nordeste que começou em 2012. A linha de tendência indica no decorrer dos anos um declínio, acarretado na falta de água para a região.

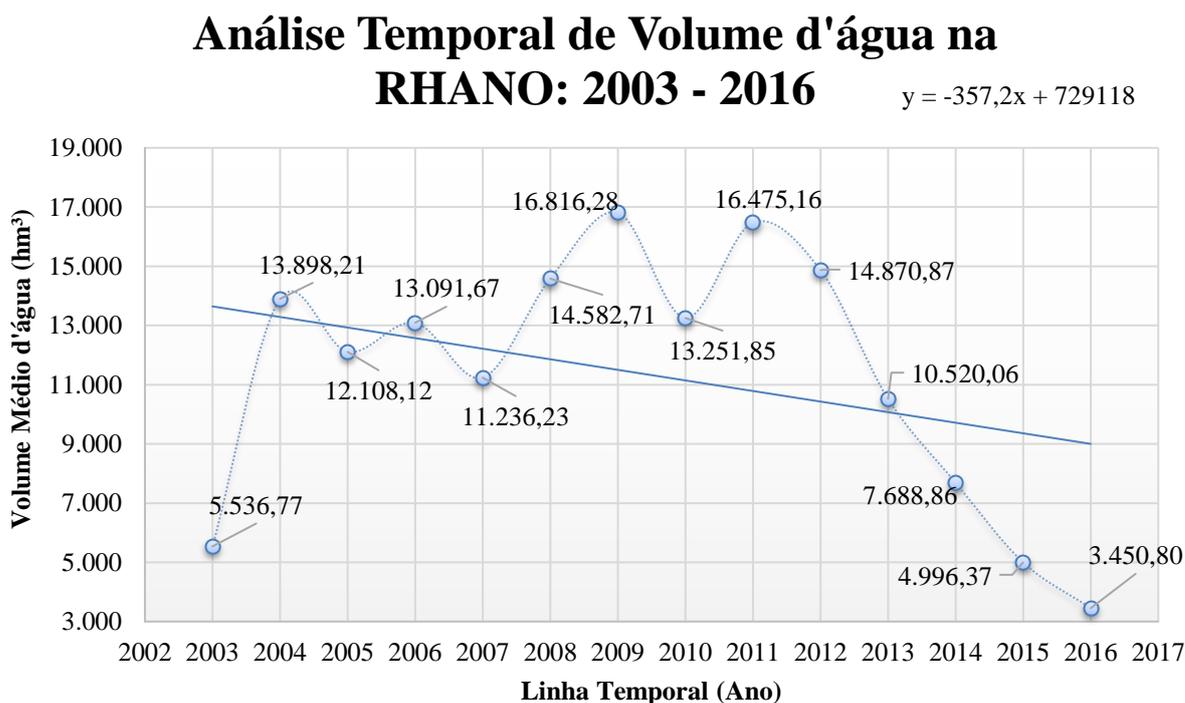
Figura 13: Gráfico de análise temporal a partir de dados da solução GRACE – GSFC.



Fonte: Autor, 2018.

A Figura 14 apresenta um gráfico a partir das médias anuais do volume total equivalência total d'água, onde foi calculada reta de tendência junto com sua equação e o coeficiente de determinação. Onde o gráfico adquire o mesmo comportamento da Figura 13, tendo seus picos e declínios nos mesmos anos.

Figura 14: Gráfico de análise temporal a partir de dados da SAR-ANA.

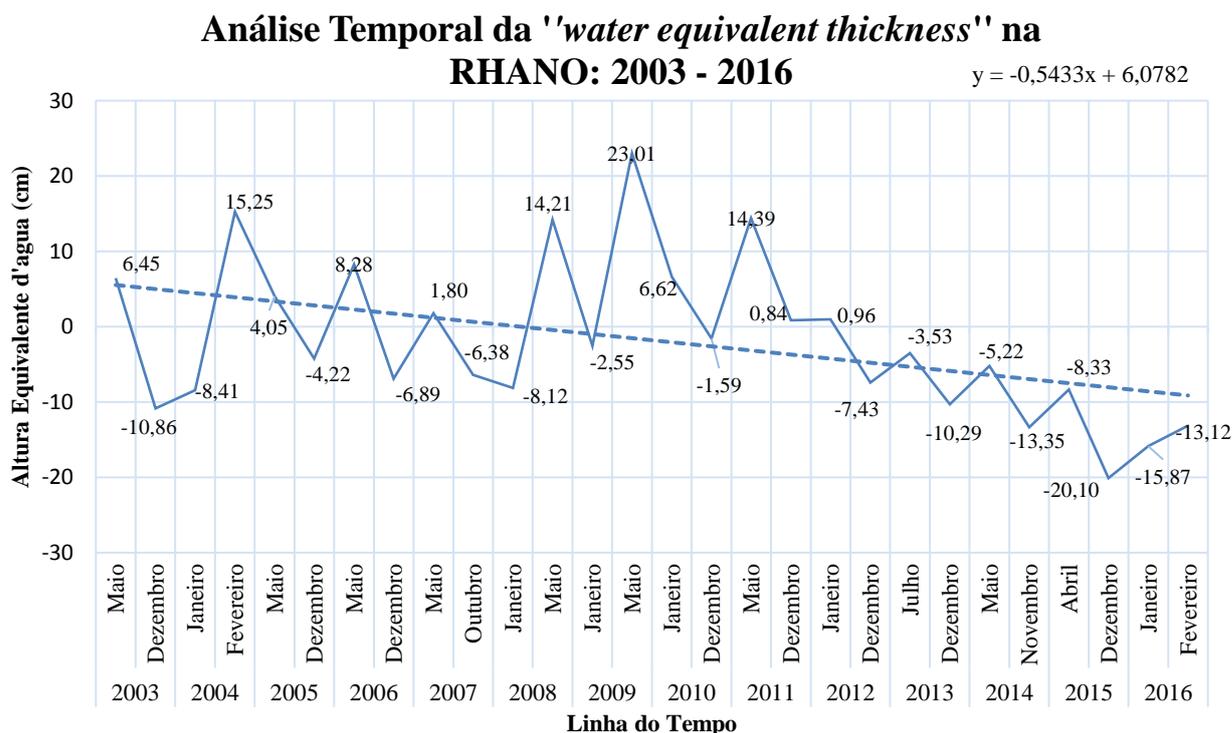


Fonte: Autor, 2018.

A solução GSFC, informa a variação total de água, onde se inclui as águas superficiais e subterrâneas, impossibilitando uma comparação volumétrica com os dados obtidos apenas dos reservatórios que equivale a uma parte das águas superficiais da região, deve-se observar as unidades dos gráficos das Figuras 13 e 14, onde o gráfico dos dados GRACE a unidade do eixo y é em centímetros, que remete ao valor total de equivalência d'água, e o gráfico dos dados dos reservatórios a unidade do eixo y é em hm³, ou seja, uma unidade de volume.

A Figura 15 apresenta um gráfico a partir dos valores de máximos e mínimo da altura equivalente d'água de cada ano em estudo, tais dados foram extraídos a partir da série mensais de dados da missão GRACE.

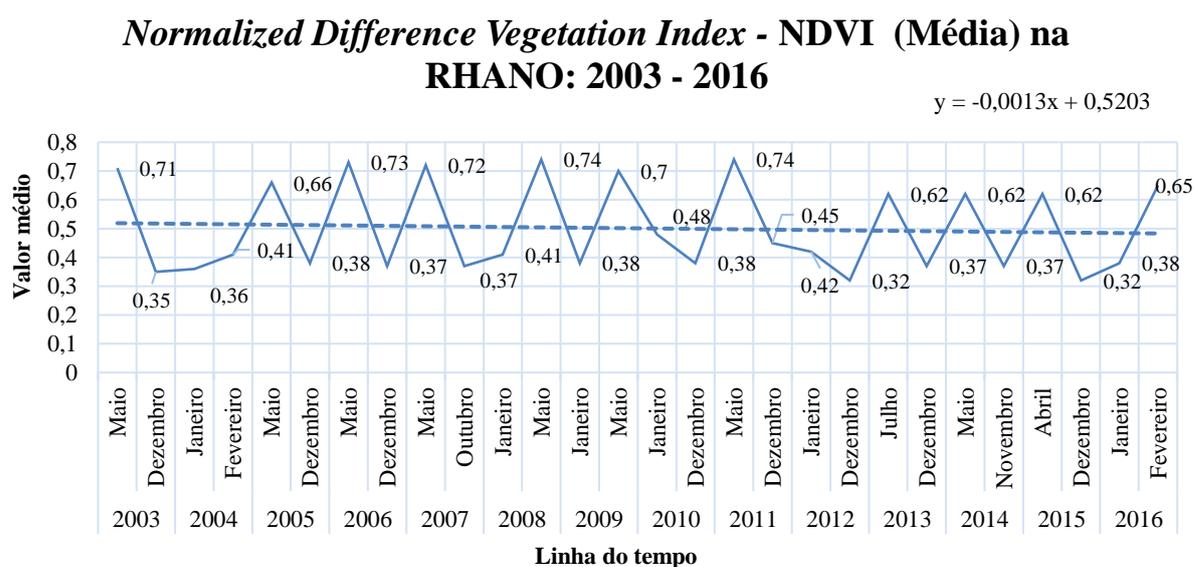
Figura 15: Valores de máximos de mínimos anuais das observações GRACE.



Fonte: Autor, 2018.

A Figura 16 apresenta um gráfico a partir dos valores médios de NDVI de determinados meses em cada ano de estudo. A escolha das datas para elaboração dos índices de vegetação foi coincidente com os meses de maior e menor valores do *wet*.

Figura 16: Valores do NDVI correspondentes aos meses de máximos e mínimos das observações GRACE.



Fonte: Autor, 2018.

5.1 Comparação entre valores GRACE e valores NDVI-MODIS

Como pode ser observado pelas Figuras 15 e 16, ambos gráficos possuem o mesmo comportamento, de acordo com as equações de reta resultantes da regressão linear, os coeficientes angulares possuem valores negativos (-0,5433 para os dados do GRACE e -0,0013 para os dados de NDVI), indicando um comportamento de declínio dos dados.

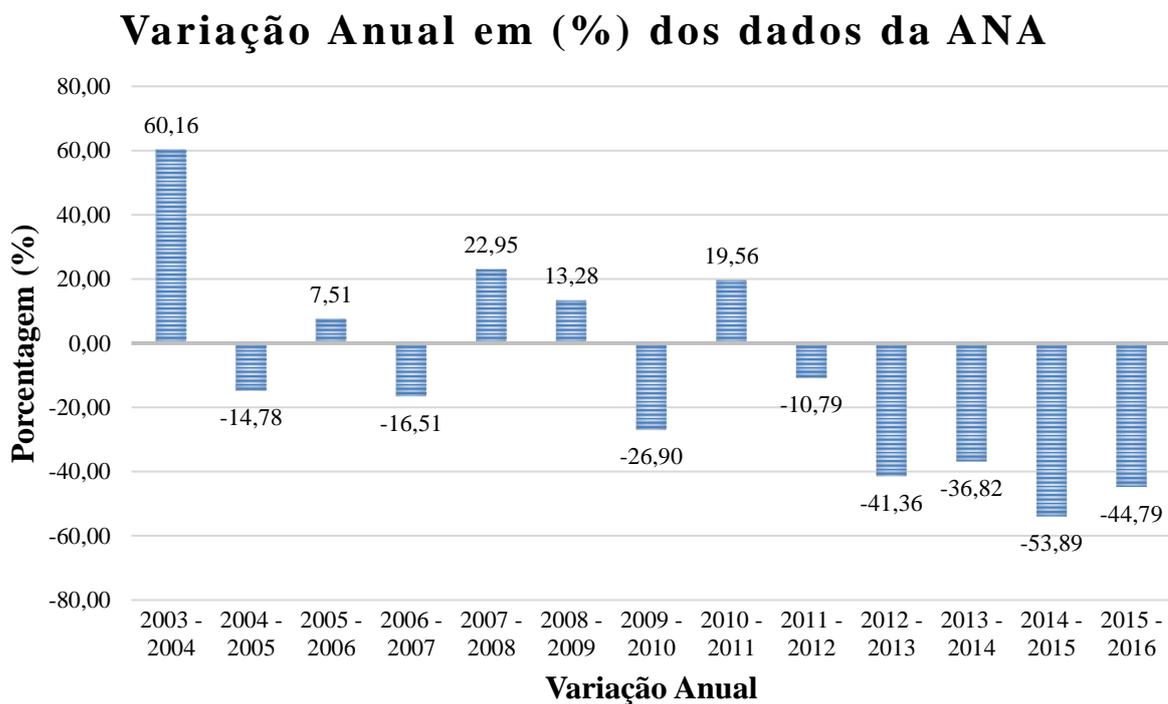
De acordo com a Figura 16 os valores médios do NDVI variam de 0,32 (menor valor na série) até 0,74 (maior valor na série) onde os valores mais próximos de 1,0 indicam grande quantidade de vegetação, fotossíntese ativa e os valores mais próximos de 0,0 indicam pouca ou nenhuma atividade de clorofila, e é dessa forma que os dados interagem com a variação do clima. Os dados apresentam variações referentes a duas épocas do ano, de acordo com o clima da região, o primeiro semestre do ano é considerado um período de mais chuvas, e o segundo semestre considerado um período de estiagem, porém existindo algumas inconsistências onde os anos de 2004, 2008, 2009 os valores de maior e menor lamina d'água são apresentados no primeiro semestre, onde coincidentemente os anos de 2004 e 2009 são considerados os anos de maior volume de água nos reservatórios e maior valor de lamina d'água.

Como pode ser visto nos gráficos da Figura 15 e 16, existe coerência em ambos os dados. Além disso, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson, que a partir dos dados GRACE sendo a variável independente e dos dados NDVI a variável dependente, onde foi obtido um valor de 0,61. Esse coeficiente de correlação de Pearson varia de -1,0 (perfeita correlação negativa, - inversamente proporcional) a 1,0 (perfeita correlação positiva, - diretamente proporcional).

5.2 Comparação entre dados GRACE e dados SAR-ANA

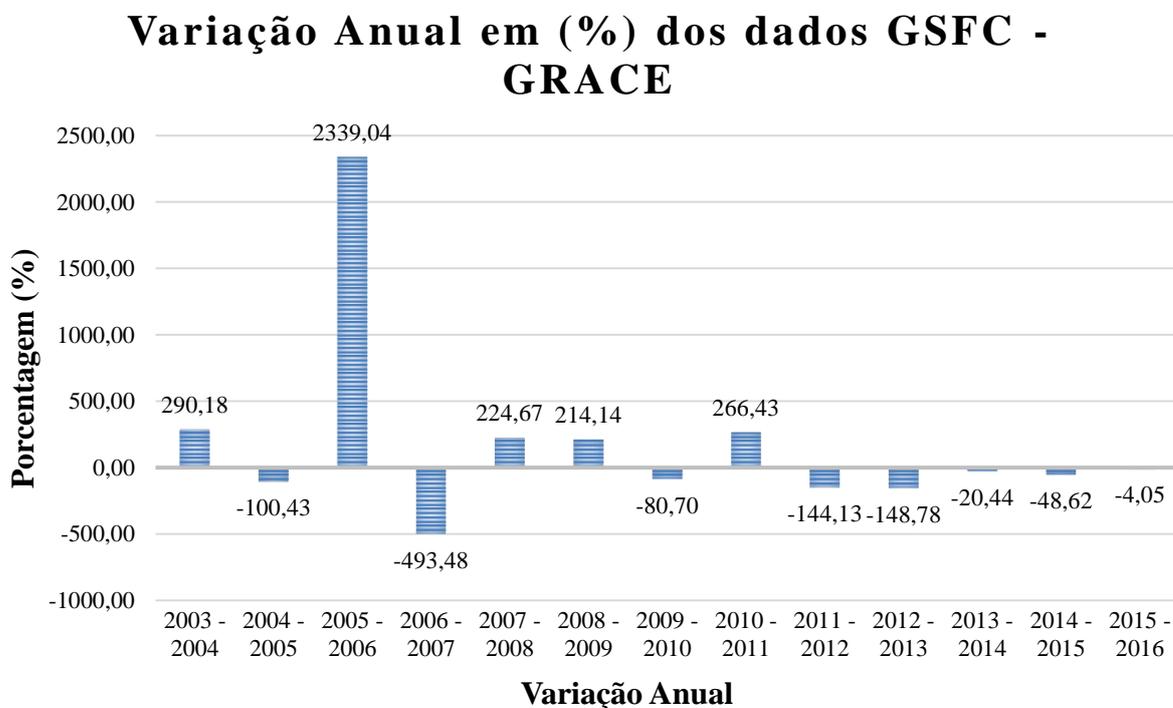
As Figuras 17 e 18 apresentam gráficos comparativos de diminuição ou aumento em porcentagem com relação de um ano para o outro dos valores de volume de água dos reservatórios da ANA, e da equivalência total de água do GRACE. De acordo com os gráficos, é possível observar as uniformidades e coesão entres os gráficos, onde ambos mostram um aumento na variação nos anos de 2003-2004, 2005-2006, 2007-2008, 2008-2009, 2010-2011 e uma diminuição de variação nos demais anos.

Figura 17: Gráfico de análise da variação anual em porcentagem dos dados ANA.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 18: Gráfico de análise da variação anual em porcentagem dos dados GRACE.



Fonte: Autor, 2018.

Como pode ser visto nos gráficos da Figuras 17 e 18, existe coerência em ambos os bancos de dados, tanto da ANA como do GRACE. Onde podem ser observados os anos de declínio e ápice da região, podendo verificar que a partir de 2011 a região entra em declínio constante até 2016, coincidentemente data da última publicação dos dados GRACE no (<http://ccar.colorado.edu/grace/>). Além disso, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson, que a partir dos dados GRACE sendo a variável independente e dos dados ANA a variável dependente, onde foi obtido um valor de 0,88 resultando uma quase perfeita correlação diretamente proporcional.

As Tabelas 7 e 8 são representados meses com maiores e menores volumes d'água de cada ano de estudo proposto. O setor Norte do Nordeste do Brasil, climatologicamente apresenta o seu período chuvoso centrado no quadrimestre fevereiro a maio (Alves e Repelli, 1992). As informações condizem com clima da região nordeste do Brasil, como pode ser visto os meses de maior volume d'água está no primeiro semestre de cada ano, que condiz com a estação chuvosa durante os meses de janeiro a julho, entretanto em 2011 foi um ano atípico, chuvoso devido ao fenômeno *La Niña*. Na maioria dos anos 80% do total anual da precipitação se concentram nos seis primeiros meses do ano, enquanto os 20% restantes se distribuem ao longo dos últimos seis meses (Alves et al., 1993).

Tabela 7: Análise de máximos e mínimos dos dados GRACE.

Ano	Maior Volume Anual		Menor Volume Anual	
	Mês	Variação de Lâmina d'água (cm)	Mês	Variação de Lâmina d'água (cm)
2003	Maio	6,45	Dezembro	-10,86
2004	Fevereiro	15,25	Janeiro	-8,41
2005	Maio	4,05	Dezembro	-4,22
2006	Maio	8,28	Dezembro	-6,89
2007	Maio	1,8	Outubro	-6,38
2008	Maio	14,21	Outubro	-8,12
2009	Maio	23,01	Janeiro	-2,55
2010	Janeiro	6,62	Dezembro	-1,59
2011	Maio	14,39	Dezembro	0,84
2012	Janeiro	0,96	Dezembro	-7,43
2013	Julho	-3,53	Dezembro	-10,29
2014	Maio	-5,22	Novembro	-13,35
2015	Abril	-8,33	Dezembro	-20,1
2016	Fevereiro	-13,12	Janeiro	-15,87

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 8: Análise de máximos e mínimos dos dados ANA.

Ano	Maior Volume Anual		Menor Volume Anual	
	Mês	Volume (hm ³)	Mês	Volume (hm ³)
2002	Maio	6.631,97	Dezembro	3.261,88
2003	Maio	6.468,34	Dezembro	2.189,84
2004	Junho	16.452,17	Dezembro	4.023,69
2005	Janeiro	14.034,41	Novembro	8.038,57
2006	Junho	15.225,26	Fevereiro	10.878,15
2007	Maio	13.316,03	Dezembro	3.603,38
2008	Julho	17.534,04	Janeiro	3.695,83
2009	Maio	18.331,59	Fevereiro	14.420,37
2010	Fevereiro	15.727,14	Janeiro	11.517,83
2011	Setembro	18.774,78	Janeiro	12.439,16
2012	Janeiro	16.555,03	Dezembro	11.877,30
2013	Junho	11.837,51	Dezembro	8.466,38
2014	Maio	8.999,96	Dezembro	6.217,42
2015	Janeiro	5.636,05	Dezembro	3.739,33
2016	Abril	4.076,83	Julho	2.818,59

Fonte: Autor, 2018.

5.3 Análise dos resultados do SPI

McKee et al. (1993) usaram os valores de SPI para definirem a existência ou não de seca e o seu grau de intensidade. Segundo os autores, a seca ocorre sempre que o valor do SPI é continuamente negativo, atingindo uma intensidade igual ou menor que menos um (-1,0). A seca termina quando o valor do SPI se torna positivo. A classificação é feita com base nos limites indicados na Tabela 9, permitindo caracterizar não somente as secas, mas também os períodos mais úmidos. Esse método tem a grande vantagem de padronizar a análise, permitindo comparar regiões totalmente distintas, como por exemplo regiões com climas mais úmidos e chuvosos com regiões mais áridas e secas. As secas ocorrem com valor de SPI menor que -0,5.

O SPI foi desenvolvido de modo a ser um indicador de seca, que reconhece a importância das escalas de tempo que afetam vários tipos de necessidades de água. Deste modo,

é calculado considerando séries e períodos médios, selecionados de modo a se determinar séries de escalas de tempo de i meses, $i = 1, 2, 3, \dots, 12, \dots, 24, \dots$ meses. O número de meses (i) é arbitrário, mas os valores escolhidos representam escalas de tempo de déficit de precipitação importantes (Domingos, 2006).

Tabela 9: Classificação do Índice de Precipitação Padronizada

SPI	Classificação
$\geq 2,00$	Chuva extrema
1,99 a 1,50	Chuva severa
1,49 a 1,00	Chuva moderada
0,99 a 0,50	Chuva fraca
0,49 a -0,49	Normal
- 0,50 a -0,99	Seca fraca
-1,00 a -1,49	Seca moderada
-1,50 a -1,99	Seca severa
≤ -2.00	Seca extrema

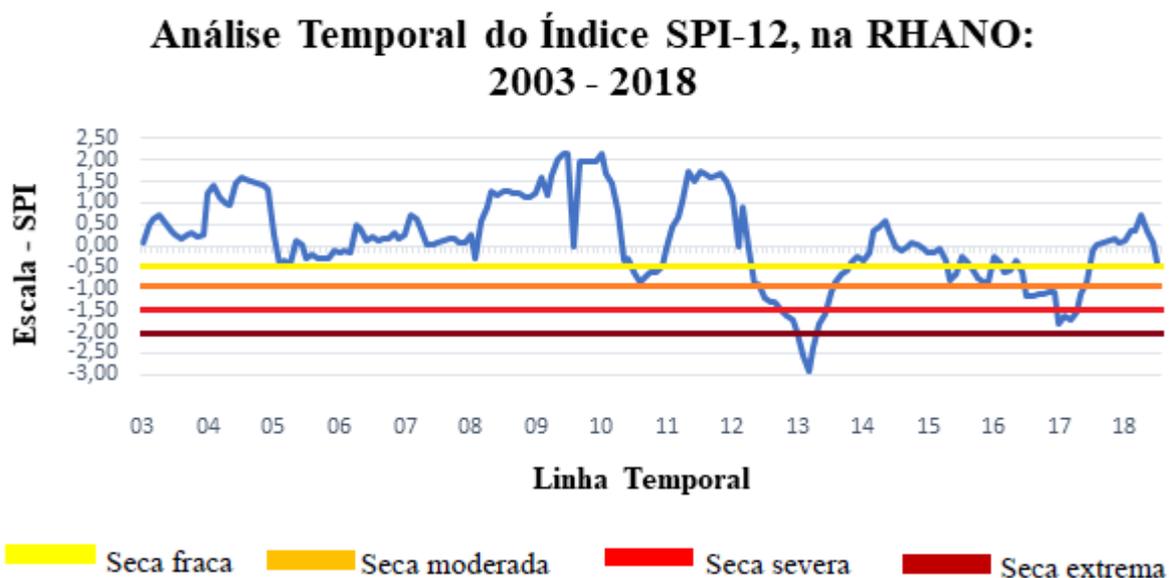
Fonte: Mckee e Domingos (2006)

Para a aplicação do índice, se faz necessário 30 anos de dados históricos, porém só será analisado os valores do SPI no período de 2003 a 2018, apresentado a Figura 19. Essa seleção temporal é devido ao período das observações do GRACE, que vai de 2003 a 2016.

Como visto antes, o índice pode ser aplicado em series de escala de tempos diferentes, neste trabalho foi utilizado uma escala temporal de 12 meses, o SPI12.

O SPI-12 meses está diretamente associado a falta de água em reservas de água, caudais e níveis de água subterrânea, os quais correspondem a escalas de tempo longas. Valores negativos deste índice podem estar, no entanto, associados a valores positivos em períodos inferiores a 12 meses, o que pode num determinado momento mascarar os efeitos acumulados de um período longo com tendência para quantidades de precipitação reduzidas (Domingos, 2006).

Figura 19:Gráfico SPI na escala de 12 meses.



Fonte: Autor, 2018.

O SPI nestas escalas de tempo reflete padrões de precipitação de longo prazo. Um SPI-12 meses efetua a comparação da precipitação de 12 meses consecutivos com os mesmos 12 meses dos anos anteriores da série histórica. Como esta escala de tempo é o resultado cumulativo de períodos mais curtos que podem estar acima ou abaixo do normal, o SPI mais longo vai tender para zero, exceto quando uma tendência específica está a ocorrer (período seco ou chuvoso prolongado).

Como pode ser observado na Figura 19, o período de seca se apresenta nos anos de 2010, 2012, 2013, 2015, 2016 e 2017.

É apresentado na Tabela 10, o detalhamento dos valores do índice, demarcado cada mês dos determinados anos que são considerados como seca na análise do SPI.

Tabela 10: Análise mensal dos valores SPI nos anos de seca.

(Amarelo – seca fraca; Laranja – seca moderada; Vermelho claro – seca severa; Vermelho escuro – seca extrema)

Ano	Mês	SPI_12	Ano	Mês	SPI_12	Ano	Mês	SPI_12
2010	Janeiro	2,13	2013	Janeiro	-1,98	2016	Janeiro	-0,24
	Fevereiro	1,68		Fevereiro	-2,53		Fevereiro	-0,40
	Março	1,43		Março	-2,92		Março	-0,64
	Abril	0,81		Abril	-2,35		Abril	-0,57
	Maio	-0,36		Maio	-1,80		Maio	-0,33
	Junho	-0,31		Junho	-1,60		Junho	-0,62
	Julho	-0,62		Julho	-1,07		Julho	-1,18
	Agosto	-0,83		Agosto	-0,86		Agosto	-1,17
	Setembro	-0,76		Setembro	-0,67		Setembro	-1,11
	Outubro	-0,63		Outubro	-0,57		Outubro	-1,13
	Novembro	-0,64		Novembro	-0,40		Novembro	-1,09
	Dezembro	-0,46		Dezembro	-0,27		Dezembro	-1,09
2012	Janeiro	1,13	2015	Janeiro	-0,15	2017	Janeiro	-1,83
	Fevereiro	1		Fevereiro	-0,14		Fevereiro	-1,61
	Março	0,90		Março	-0,08		Março	-1,71
	Abril	-0,06		Abril	-0,36		Abril	-1,55
	Maio	-0,96		Maio	-0,81		Maio	-1,12
	Junho	-0,88		Junho	-0,67		Junho	-0,84
	Julho	-1,20		Julho	-0,27		Julho	-0,10
	Agosto	-1,29		Agosto	-0,32		Agosto	0,01
	Setembro	-1,31		Setembro	-0,52		Setembro	0,08
	Outubro	-1,47		Outubro	-0,74		Outubro	0,14
	Novembro	-1,61		Novembro	-0,85		Novembro	0,16
	Dezembro	-1,70		Dezembro	-0,83		Dezembro	0,05

Fonte: Autor, 2018.

O SPI calculado na escala de tempo de 12 meses, tem seu valor, para um dado mensal, assim indicando a severidade correspondente ao déficit da precipitação acumulada nos últimos 12 meses relativamente à precipitação histórica correspondente aos meses em causa.

A partir da metodologia aplicada a este trabalho, se pode obter informações mais detalhadas sobre a região hidrográfica, e detectar ao longo da sua série temporal, momentos sazonais de disponibilidade hídrica, podendo verificar as conformidades relacionadas às circunstâncias dos primeiros e segundos semestres de cada ano, e assim constatar normalidades e distúrbios da região. O monitoramento se faz necessário para qualquer região hidrográfica existente, é partir do monitoramento que informações são extraídas para melhoria da gestão hídrica.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo empregado de análise dos dados da missão GRACE, mostrou ser uma alternativa para a avaliação qualitativa e quantitativa da disponibilidade de recursos hídricos. A partir das séries temporais apresentadas foi possível identificar os momentos sazonais de maior disponibilidade hídrica da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, sendo 2009 o ano com maior volume de água nos reservatórios sendo um total de 16.816,28Hm³ de acordo com a ANA, e espessura equivalente de água de 10,24cm de acordo com o GRACE respectivamente, onde o mês de maio teve uma maior contribuição mostrando um volume de 18.331,59Hm³ e uma espessura d'água de 23,01 cm.

A série temporal elaborada e o gráfico anual dos dados processados da missão GRACE foram comparadas aos dados da ANA, mostrando sua equivalência qualitativa aos dados GRACE com dados obtidos *in loco*.

O NDVI estudado nos meses com maior e menor valor da variação de lamina d'água das observações GRACE, indicam a situação da vegetação no período estudando, onde, quanto menor é o valor da espessura de lamina d'água obtidas pelo GRACE, a resposta do NDVI se aproxima do valor 0, indicando seca, e quando maior é o valor da espessura de lamina d'água, a resposta do NDVI se aproxima de 1, indicando presença de vegetação.

A partir da regressão linear verificou-se um comportamento de declínio de volume de água tanto nos dados do GRACE quanto da ANA, estimando uma baixa de volume para os próximos anos. O índice SPI calculado mostra a situação hídrica da região para os anos seguintes, a seca identificada no ano de 2012, onde os dados GRACE apresentam grande declínio de espessura de lâmina d'água se estende até o segundo de 2017, e obtendo uma recuperação em 2018.

As informações dos satélites da missão GRACE vêm a auxiliar na gestão dos recursos hídricos do Brasil e sua potencialidade e divulgação para estudos, onde sua principal vantagem é sua aplicação em locais inacessíveis para levantamento de *in situ*. Já como desvantagens, têm-se que a série temporal ainda pequena para estudos hidrológicos, pois sua operação, iniciou-se a partir de 2002. Outra limitação é a resolução espacial não sendo adequada quando se pretende estudar uma pequena bacia hidrográfica ou mesmo um reservatório específico. A missão GRACE foi tão bem-sucedida que seu sucessor, o *Gravity Recovery e Climate Experiment Follow-On* (GRACE-FO), foi lançado em 22 de maio de 2018.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2005.

AHMED, M.; SULTAN, M; WHAR, J.; YAN, E. The use of GRACE data to monitor natural and anthropogenic induced variations in water availability across Africa. **Earth-Science Reviews**. v. 136, p. 289-300. 2014.

ALBUQUERQUE, Tatiana Máximo Almeida. **Estudo dos processos de gestão de seca: aplicação no estado do Rio Grande do Sul**. 2010. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, dezembro de 2010.

ALVES, J. M. B.; REPELLI, C.A: Variabilidade pluviométrica no setor norte do Nordeste e os eventos El-Niño Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Vol.7(2), 583-592. 1992.

ALVES, J. M. B., C. A. REPELLI, and N. G. Mello. A pré-estação chuvosa do setor norte do Nordeste Brasileiro e sua relação com a temperatura dos oceanos adjacentes. **Revista Brasileira de Meteorologia**. vol. 8, 22-30. 1993.

AWANGE, J.L.; GEBREMICHAEL, M.; FOROOTAN, E.; WAKBULCHO, G.; ANYAH, R.; FERREIRA, V.G., ALEMAYEHU, T. Characterization of Ethiopi an mega hydrogeological regimes using GRACE, TRMM and GLDAS datasets. **Advances in Water Resources**. v. 74, p. 64-78. 2014.

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

BARKER, J.L.; HARDEN, M.K.; ANUTA, E.A.; SMID, J. E HOUGT, D. MODIS spectral sensivity study: requirements and characterization. **Washington: Nasa**, 84p., 1992.

BEZERRA, J. R. C.; AZEVEDO, P. V. DE; SILVA, B. B. DA; DIAS, J. M. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BRS-200 marrom, irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.6, p.625-632, 2010.

BYUN, H. R.; WILHITE, D. A. Objective quantification of drought severity and duration. **Journal of Climate**, Boston, v. 12, n. 9, p. 2747-2756, Sept. 1999.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; TAPLEY, B.D.; SCANLON, B.; GUNTNER, A. Long-term groundwater storage change in Victoria, Australia from satellite gravity and in situ observations. **Global and Planetary Change**. v. 139, p. 56-65. 2016.

CHRISTOFARO, C.; LEÃO, M.M.D. Caracterização temporal do arsênio nos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, MG, Brasil, ao longo de uma década (1998-2007). **Revista Ambiente e Água: an Interdisciplinar Journal of Applied Science**. v. 4, n. 3, p. 54-66. 2009.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS – CNRH (Brasil). **Resolução nº. 32**, de 15 de outubro de 2003. Divisão Hidrográfica Nacional. Diário Oficial da União 17 dez. 2003.

DOMINGOS, Sónia Izabel Sequeira. **Análise do índice de seca Standardized Precipitation Index (SPI) em Portugal Continental e sua comparação com o Palmer Drought Severity Index (PDSI)**. Tese de licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica Interna –variante Meteorologia. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, julho de 2006.

FERNANDES, Diego Simão. et al. **Índices para Quantificação da Seca**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Santo Antônio, do Goiás, 2009.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto. Imagens de satélite para estudos ambientais**. Oficina de Textos, 101p., 2007.

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

HEUTE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. **Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices**. In: Remote Sensing of environment, Vol. 83, p. 195-213. 2002.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro. 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br>>.

JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C. Avaliação do desenvolvimento das culturas de cereais de inverno no Rio Grande do Sul por meio de perfis temporais do índice de vegetação por diferença normalizada. **Ciência Rural**, v.39, p.1 15. 2009.

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.

KEYANTASH, J.; DRACUP, J.A. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v.83, p.1167-1180, 2002.

LATORRE, M. L.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; CARVALHO JÚNIOR O. A. Sensor MODIS: características gerais e aplicações. **Espaço & Geografia**, v.6, n.1, p.97-126, 2003.

LOPES, H. L.; ACCIOLY, L. J. DE O.; SILVA, F. H. B. B. DA; SOBRAL, M. DO. ESTUDO DA C. M.; ARAÚJO FILHO, J. C. DE; CANDEIAS, A. L. B. Espacialização da umidade do solo por meio da temperatura da superfície e índice de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.9, p.973-980, 2011.

LUTHCKE, S.B.; SABAKA, T.J.; LOOMIS, B.D.; ARENDT, A.A.; McCARTHY, J.J.; CAMP, J. Antarctica, Greenland and Gulf of Alaska land ice evolution from an iterated GRACE global mascon solution. **Journal of Glaciology**. V. 59, Nº 216, p. 613-631. 2013.

MARTINS, E. P. R.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C. O clima da Região Nordeste entre 2009 e 2017: monitoramento e previsão. **Parcerias Estratégicas**. Brasília. v. 22, p.63-80. 2017.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to the time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY. Anaheim, CA. **Proceedings**. Boston: American Meteorological Society. p. 179-184.1993.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. D. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012. 266 p.

MOLINA, P. A.; LIMA, L. C. T. M. Estudo de secas agrícolas no Nordeste Brasileiro. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**. Belo Horizonte. Água em quantidade e qualidade: o desafio do próximo milênio: anais. Belo Horizonte: ABHR, 1999.

MOLODTSOVA, T.; MOLODTSOV, S.; KIRILENKO, A.; ZHANG, X.; VANLOOY, J. Evaluating flood potential with GRACE in the United States. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, Discussion. v. 3: p. 6977-6996. 2015.

MONTECINO, H.C.; STAUB, G.; FERREIRA, V.G.; PARRA, L.B. Monitoring Groundwater Storage in Northern Chile Based on Satellite Observations and Data Simulation. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v. 22 (nº1): p. 1-15. 2016.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa: Ed. UFV, 2003.

NASA - National Aeronautics and Space Administration – **Modis website**. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis. Acesso em: 01/10/2018

NDEHEDEBE, C.; AWANGE, J.; AGUTU, N.; KUHN, M.; HECK, B. Understanding changes in terrestrial water storage over West Africa between 2002 and 2014. **Advances in Water Resources**. v. 88: p. 211-230. 2016.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo, 2008.

PONZONI, F.J. **Comportamento espectral da vegetação**. In: Meneses, P.R.; Madeira Neto, J.S. **Sensoriamento Remoto: reflectância de alvos naturais**. Brasília, DF: UNB Planaltina Embrapa Cerrados. P.261. 2001.

RAMILLIEN, G.; FAMIGLIETTI, J. S.; WAHR, J. Detection of Continental Hydrology and Glaciology Signals from GRACE: A Review. **Surveys in Geophysics**. v. 29, n. 4-5, p. 361-374. 2008.

RODELL M.; FAMIGLIETTI, J. An Analysis of Terrestrial Water Storage Variations in Illinois with implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). **Water Resources Research**. v. 37, Nº 5, p. 1327-1339. 2001.

SAKUMURA, C.; BETTADPUR, S.; BRUINSMA, S. Ensemble prediction and intercomparison analysis of GRACE time-variable gravity field models. **Geophysical Research Letters**. v. 41, Issue 5: p. 1389-1397. 2014.

SILVEIRA, A.L.L. **Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica**. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação São Paulo: EDUSP. p. 35-51. 2001.

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

SUN, T.; FERREIRA, V.G.; HE, X.; ANDAM-AKORFUL, S.A. Water Availability of São Francisco River Basin Based on a Space-Borne Geodetic Sensor. **Water**. v. 8, p. 20. 2016.

SWENSON, S; NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH STAFF. **GRACE: Gravity Recovery and Climate Experiment: Surface mass, total water storage, and derived variables**. 2013.

TAPLEY, B. D.; BETTADPUR, S.; WATKINS, M.; REIGBER, C. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results. **Geophys. Res. Lett.** v. 31. p.6. 2004.

VIANA, D.T. **Construção e tratamento do banco de dados de qualidade da água da UHE Nova Ponte**. 48 f. Monografia (Especialização em Saneamento e Meio Ambiente) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2011.

VIGANÓ, H. A. et al. Análise do desempenho dos Índices de Vegetação NDVI e SAVI a partir de imagem Aster. **In Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, Paraná, 2011.

XIANG, L.; WANG, H.; STEFFEN, H.; WU, P.; JIA, L.; JIANG, L.; SHEN, Q. Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data. **Earth and Planetary Science Letters**. v. 449, p. 228-230. 2016.

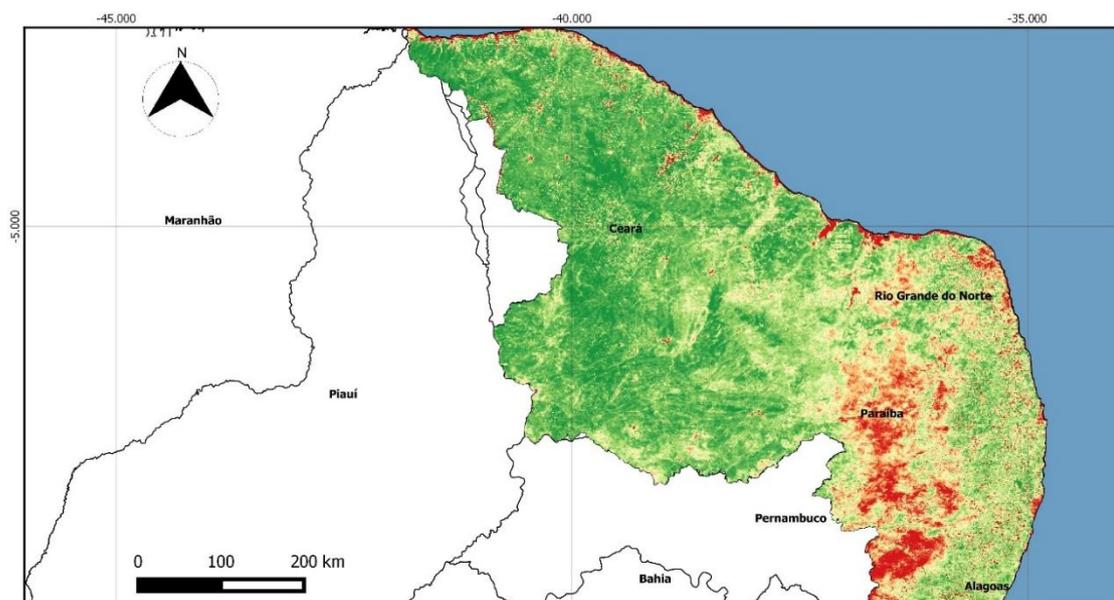
WAHR, J.; MOLENARR, M.; BRUAN, F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. **J. Geophys. Res.** v. 103 (B12). p.30. 1998.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M.H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. In: WILHITE, D. A.; EASTERLING, W. E. (Ed.). **Planning for drought: toward a reduction of societal vulnerability**. Boulder: Westview Press. p. 11-27. 1987.

WILHITE, D. A. Drought. In: HOLTON, J. R.; PYLE, J. A.; CURRY, J. A. (Ed.). **Encyclopedia of atmospheric sciences**. New York: Elsevier. p. 650-658. 2003.

WOLFE RE, NISHIHAMA M, FLEIG AJ, KUYPER JA, ROY DP, STOREY JC, PATT FS. Achieving Sub-Pixel Geolocation Accuracy in Support of Modis Land Science. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n.1-2, p.31-49, 2002.

APÊNDICE A – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2003

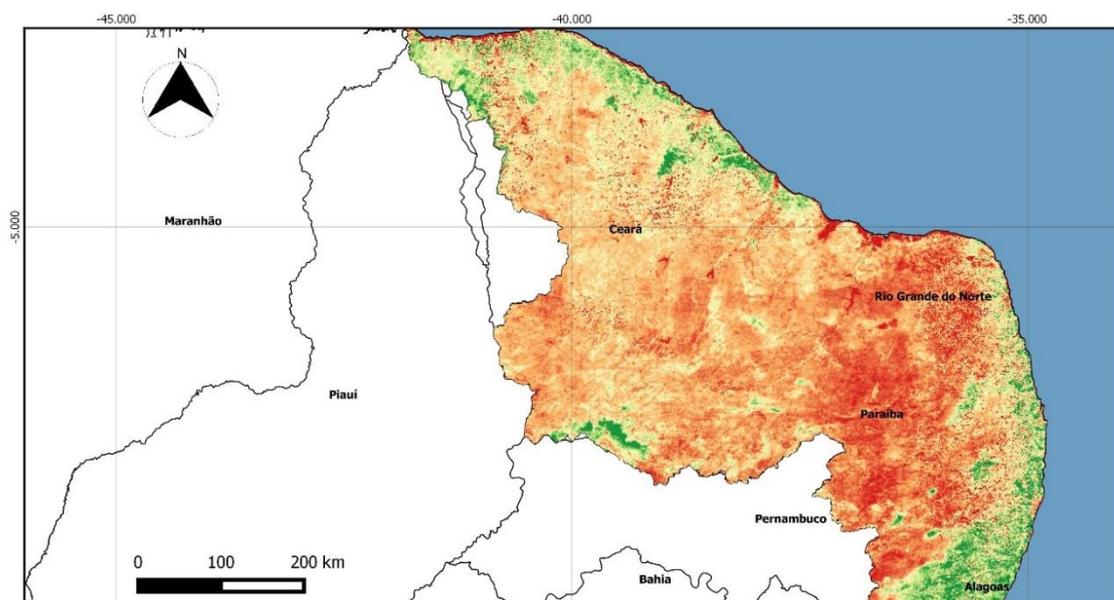


Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Maio de 2003



APÊNDICE B – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2003

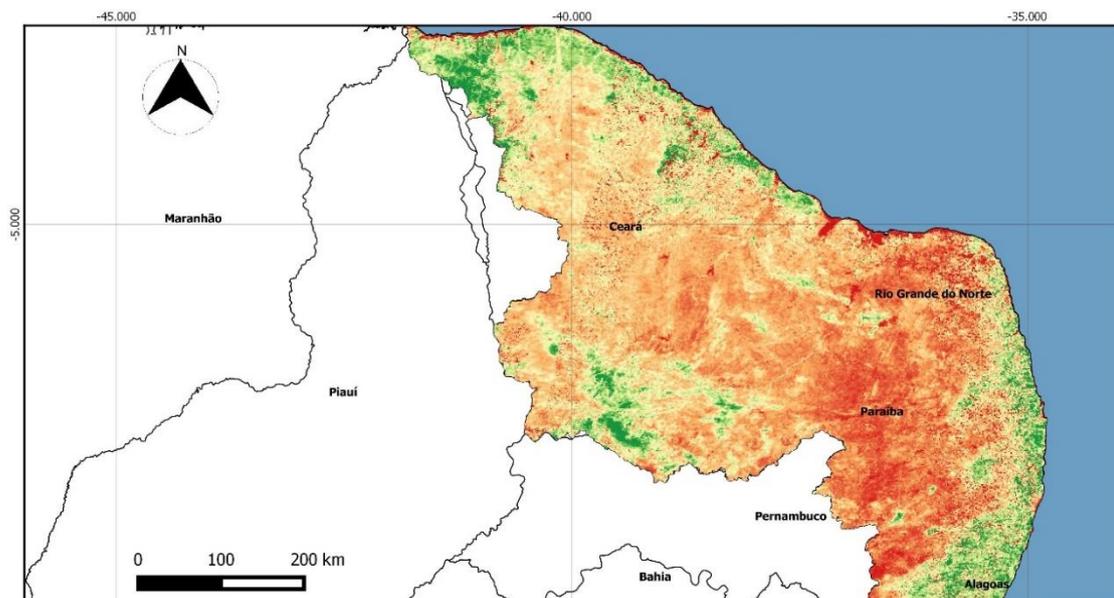


Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Dezembro de 2003



APÊNDICE C – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2004



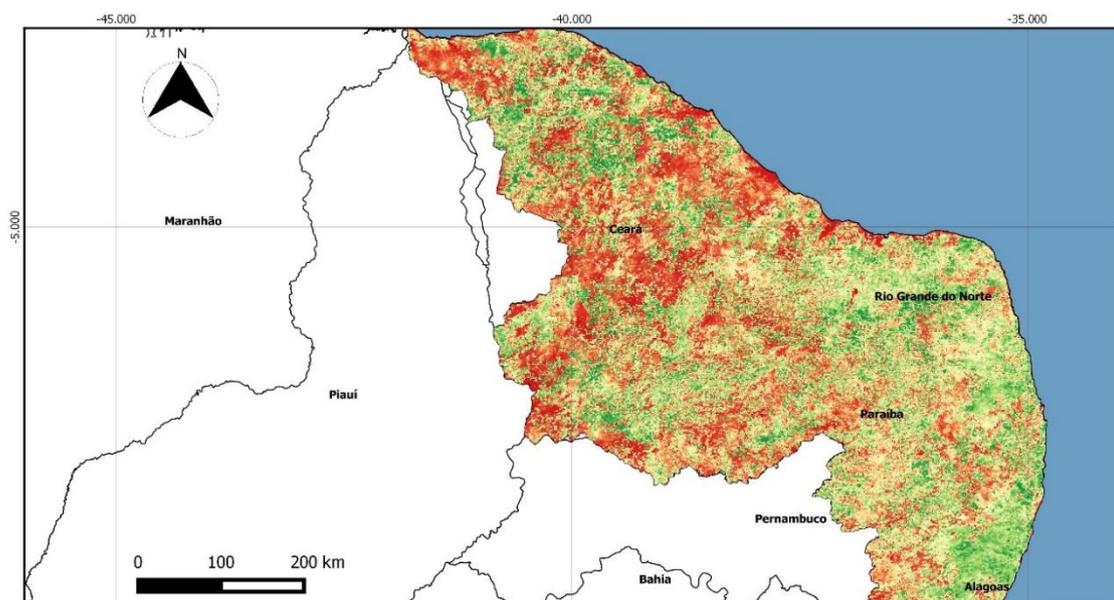
Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Janeiro de 2004

LEGENDA

	NDVI
	Atlântico Nordeste Oriental
	Estados do Brasil
	Oceano Atlântico
	< 0,29
	0,30 - 0,42
	0,43 - 0,54
	0,55 - 0,67
	> 0,68

APÊNDICE D – MAPA NDVI PARA A RHANO FEVEREIRO DE 2004



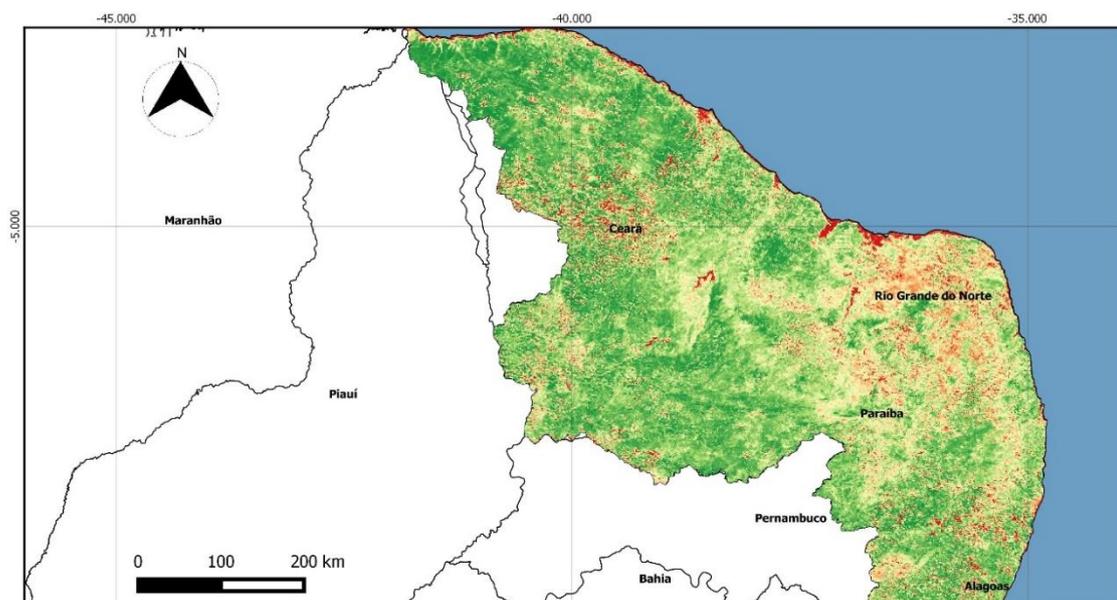
Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Fevereiro de 2004

LEGENDA

	NDVI
	Atlântico Nordeste Oriental
	Estados do Brasil
	Oceano Atlântico
	< 0,23
	0,24 - 0,42
	0,43 - 0,61
	0,62 - 0,80
	> 0,81

APÊNDICE E – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2005

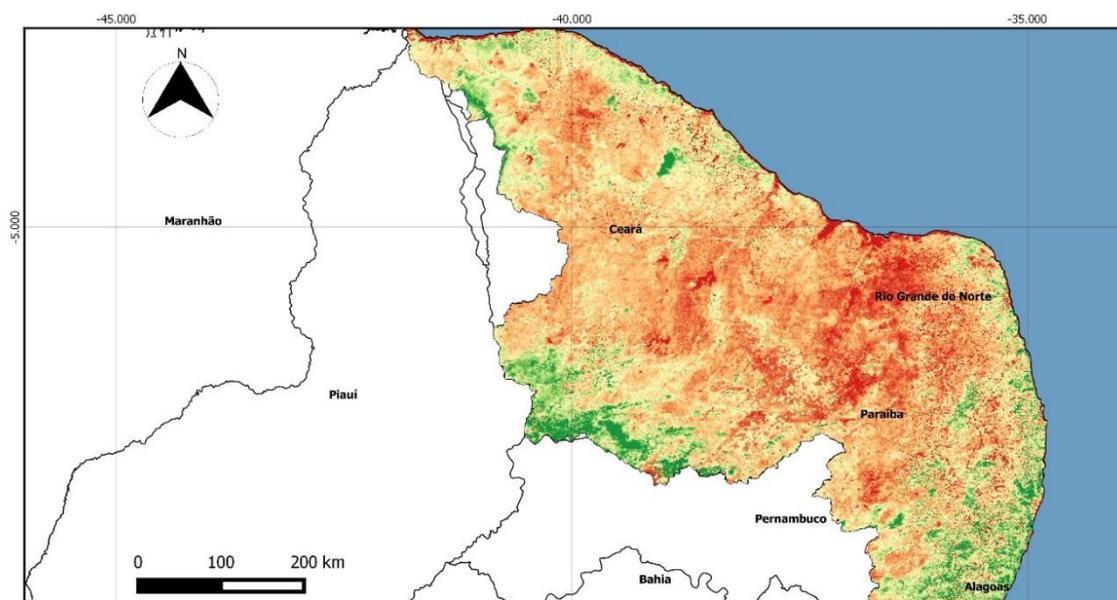


Sistema de Cordenadas
Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS
2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Maio de 2005

LEGENDA		NDVI
	Atlântico Nordeste Oriental	> 0,65
	Estados do Brasil	0,36 - 0,52
	Oceano Atlântico	0,53 - 0,69
		0,70 - 0,86
		> 0,87

APÊNDICE F – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2005

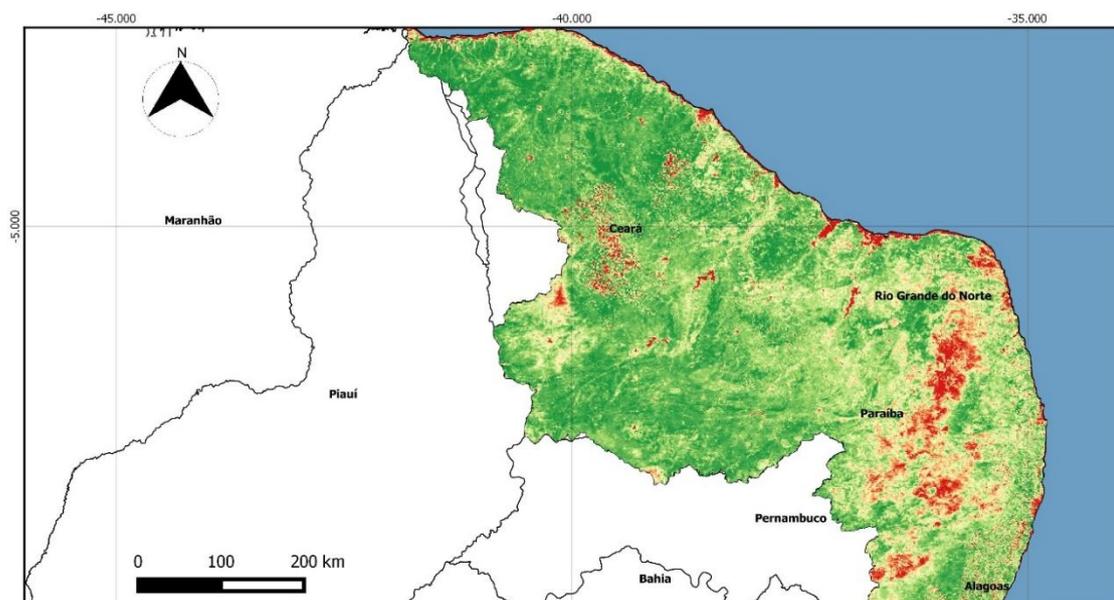


Sistema de Cordenadas
Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS
2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Dezembro de 2005

LEGENDA		NDVI
	Atlântico Nordeste Oriental	> 0,31
	Estados do Brasil	0,32 - 0,42
	Oceano Atlântico	0,43 - 0,54
		0,55 - 0,66
		> 0,67

APÊNDICE G – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2006

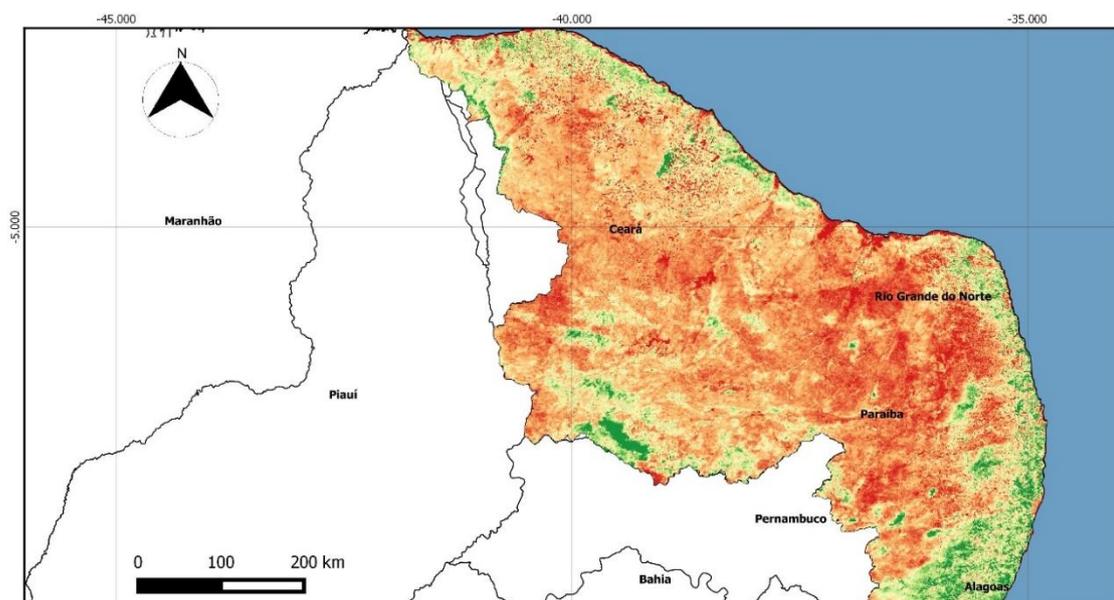


Sistema de Cordenadas
Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS
2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Maio de 2006



APÊNDICE H – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2006

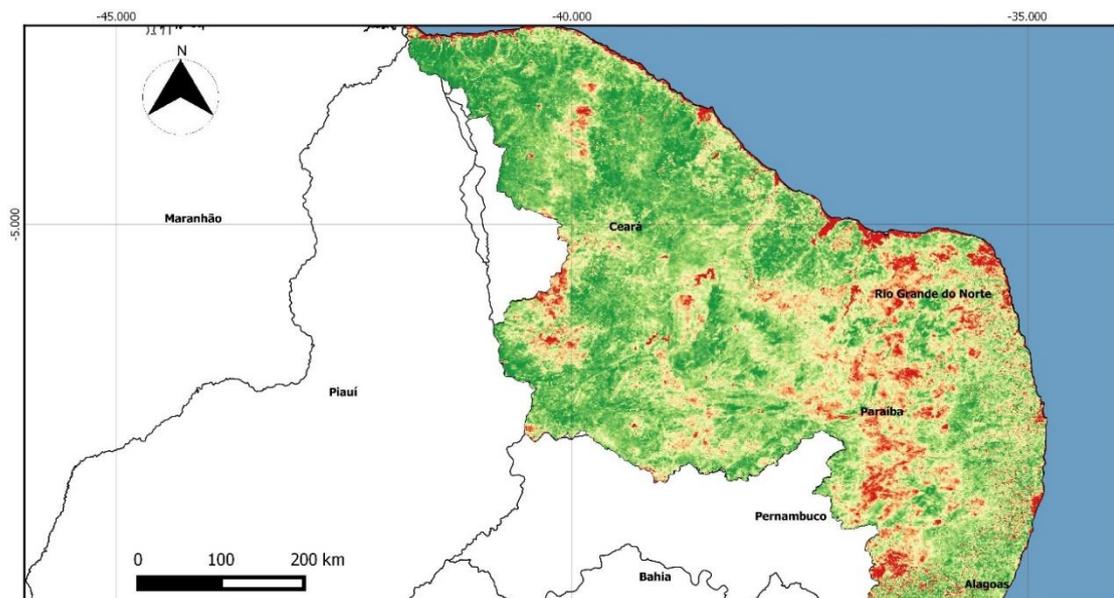


Sistema de Cordenadas
Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS
2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Dezembro de 2006



APÊNDICE I – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2007

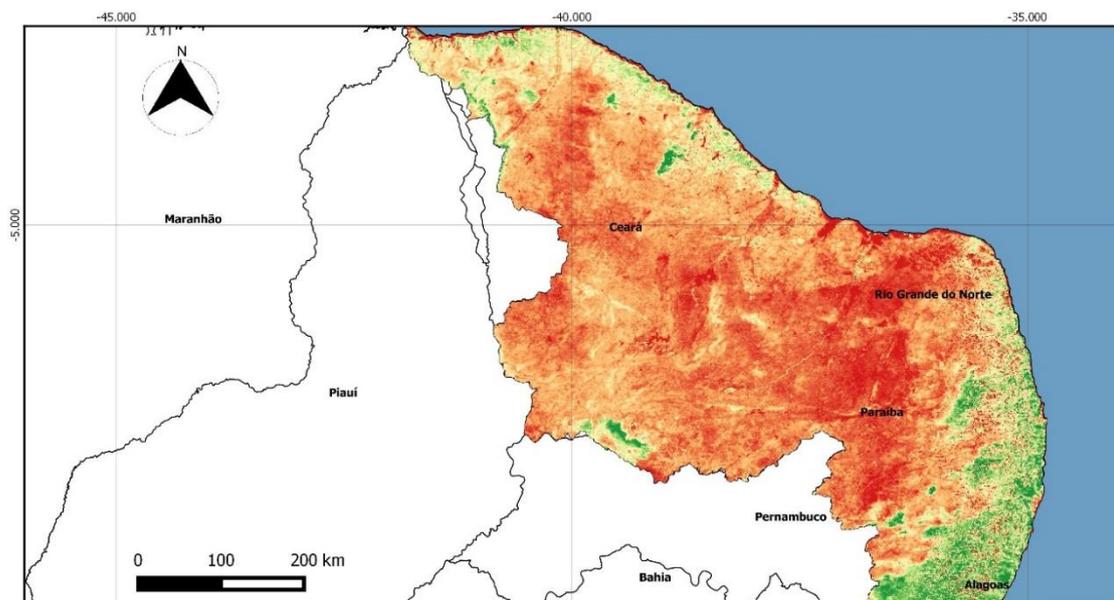


Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Maio de 2007



APÊNDICE J – MAPA NDVI PARA A RHANO OUTUBRO DE 2007

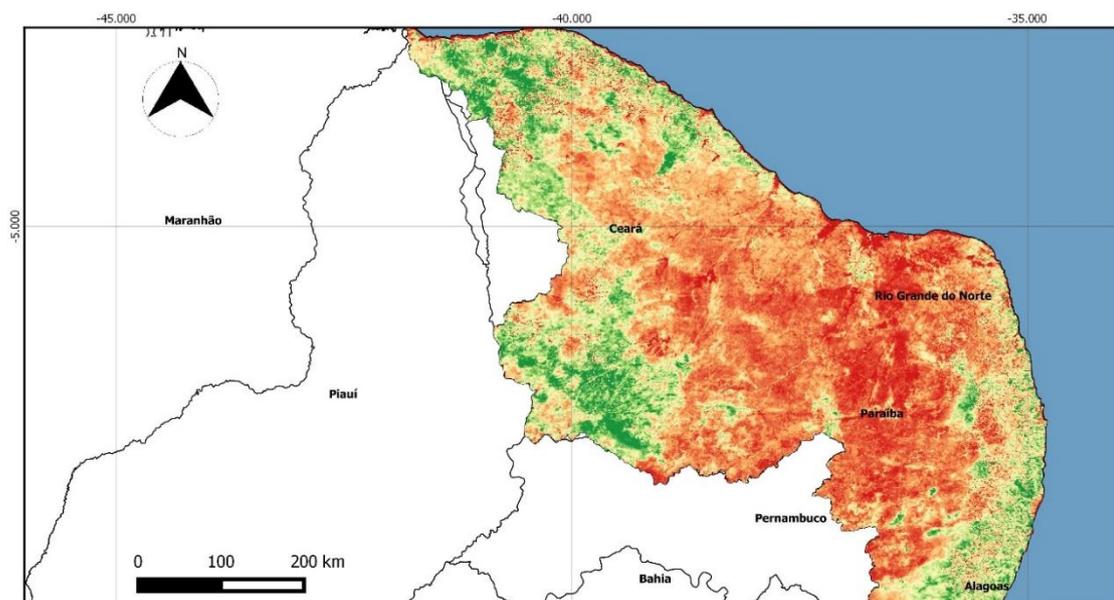


Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Outubro de 2007



APÊNDICE K – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2008



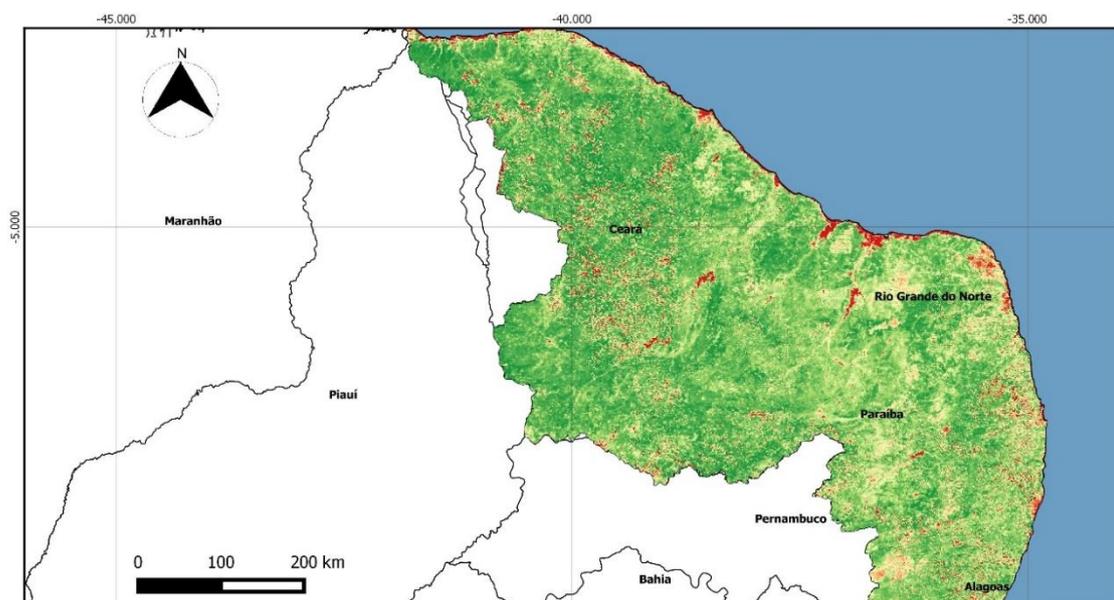
Sistema de Cordenadas
Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS
2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Janeiro de 2008

LEGENDA

	NDVI
■ Atlântico Nordeste Oriental	■ < 0,34
□ Estados do Brasil	■ 0,35 - 0,47
■ Oceano Atlântico	■ 0,48 - 0,60
	■ 0,61 - 0,74
	■ > 0,75

APÊNDICE L – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2008



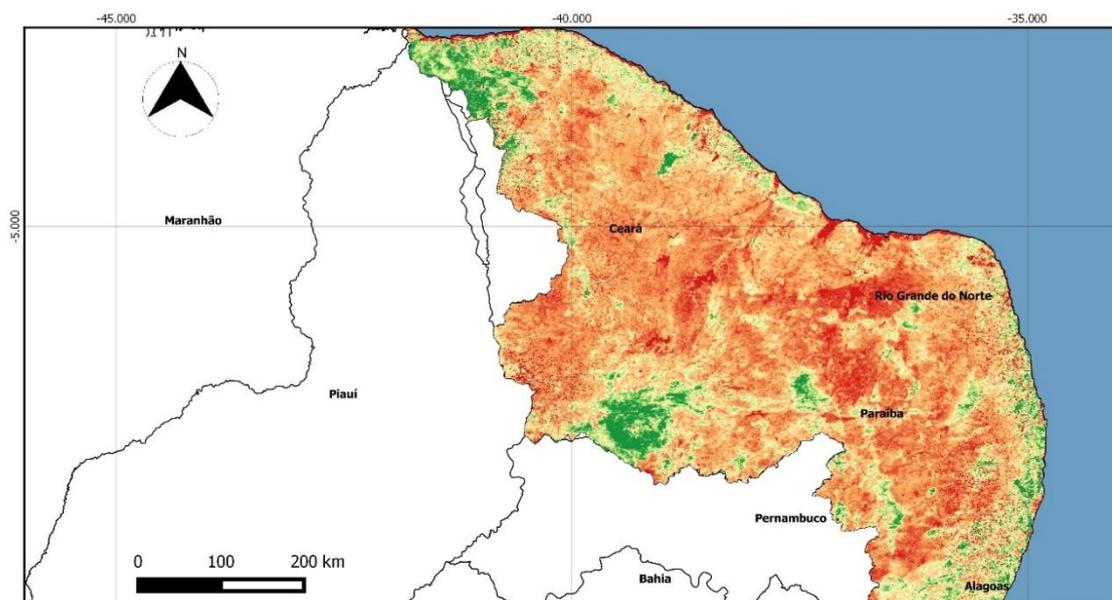
Sistema de Cordenadas
Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS
2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Maio de 2008

LEGENDA

	NDVI
■ Atlântico Nordeste Oriental	■ < 0,44
□ Estados do Brasil	■ 0,45 - 0,58
■ Oceano Atlântico	■ 0,59 - 0,74
	■ 0,75 - 0,88
	■ > 0,89

APÊNDICE M – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2009



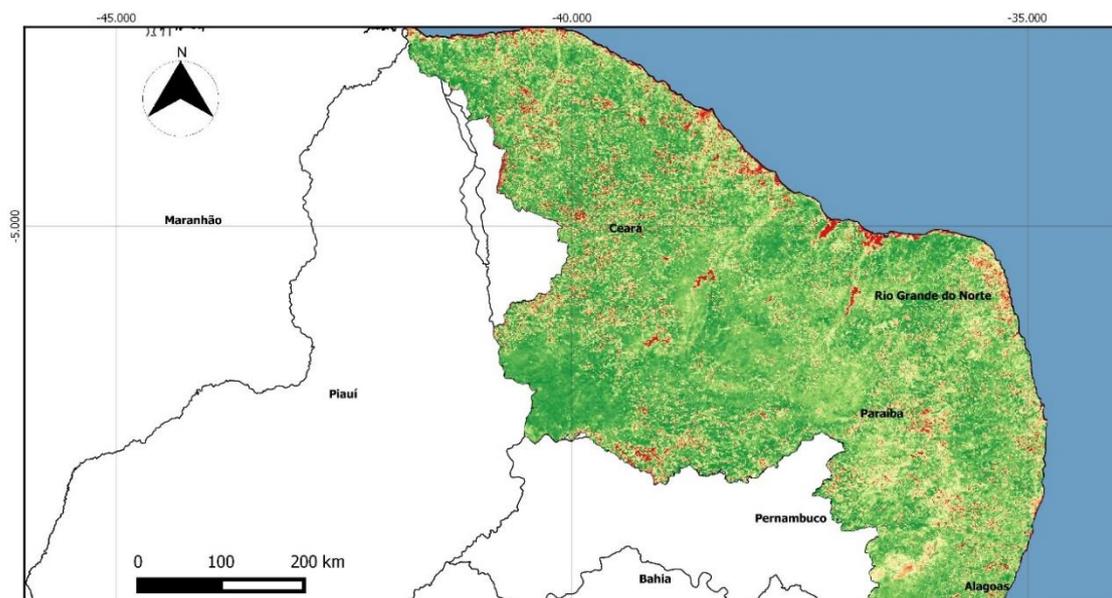
Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Janeiro de 2009

LEGENDA

	NDVI
Atlântico Nordeste Oriental	< 0,33
Estados do Brasil	0,34 - 0,45
Oceano Atlântico	0,46 - 0,57
	0,58 - 0,69
	> 0,70

APÊNDICE N – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2009



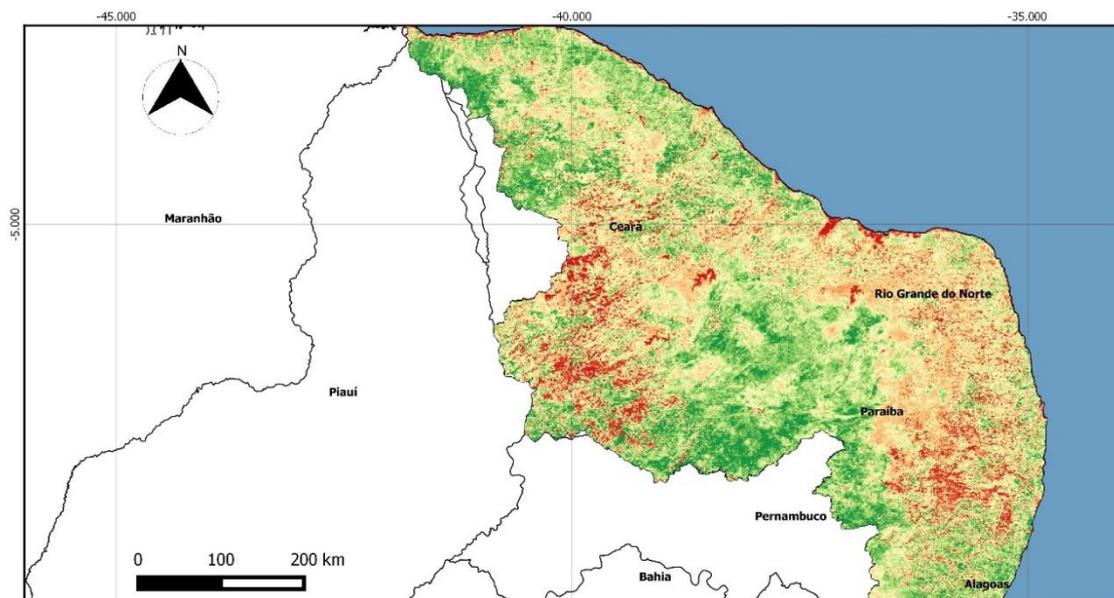
Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Maio de 2009

LEGENDA

	NDVI
Atlântico Nordeste Oriental	< 0,35
Estados do Brasil	0,36 - 0,52
Oceano Atlântico	0,53 - 0,70
	0,71 - 0,88
	> 0,89

APÊNDICE O – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2010



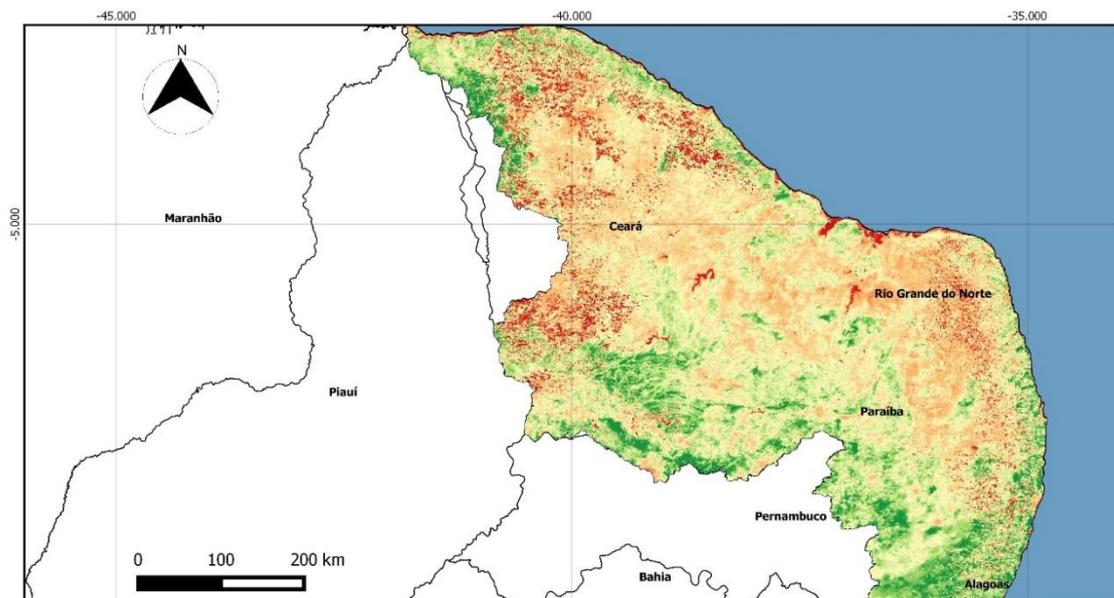
Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Janeiro de 2010

LEGENDA

	NDVI
	Atlântico Nordeste Oriental
	Estados do Brasil
	Oceano Atlântico
	< 0,25
	0,26 - 0,43
	0,44 - 0,61
	0,62 - 0,79
	> 0,80

APÊNDICE P – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2010



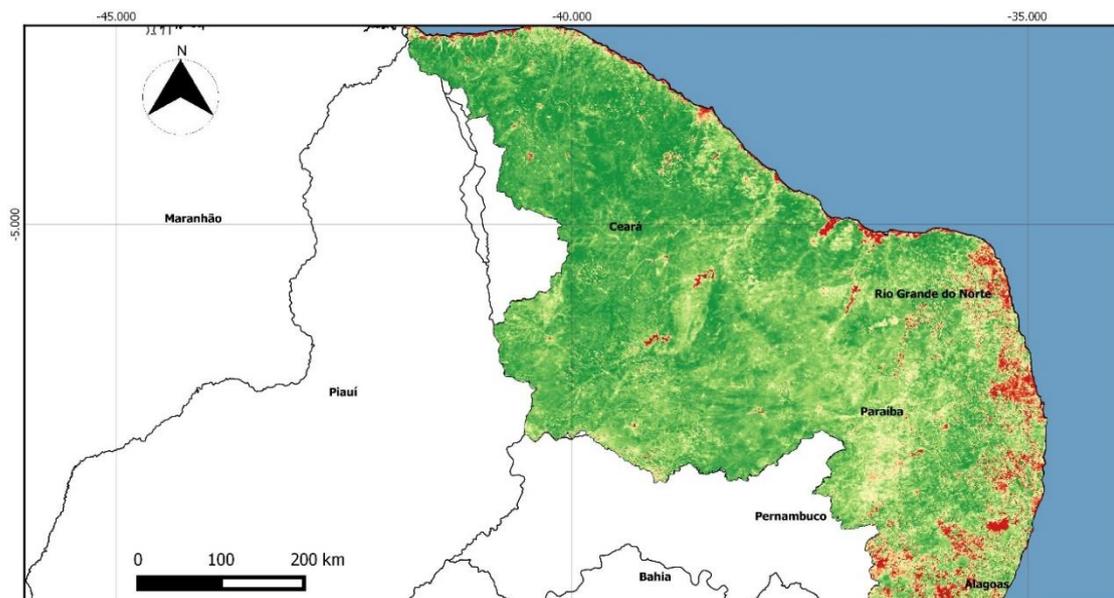
Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Dezembro de 2010

LEGENDA

	NDVI
	Atlântico Nordeste Oriental
	Estados do Brasil
	Oceano Atlântico
	< 0,22
	0,23 - 0,37
	0,38 - 0,52
	0,53 - 0,67
	> 0,68

APÊNDICE Q – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2011

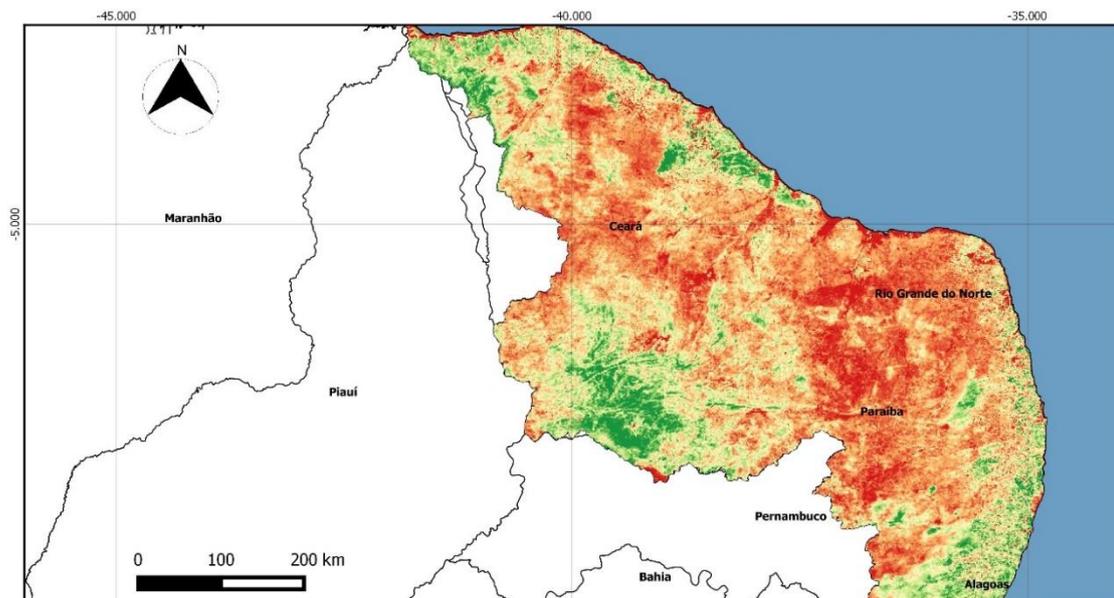


Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Maio de 2011



APÊNDICE R – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2011

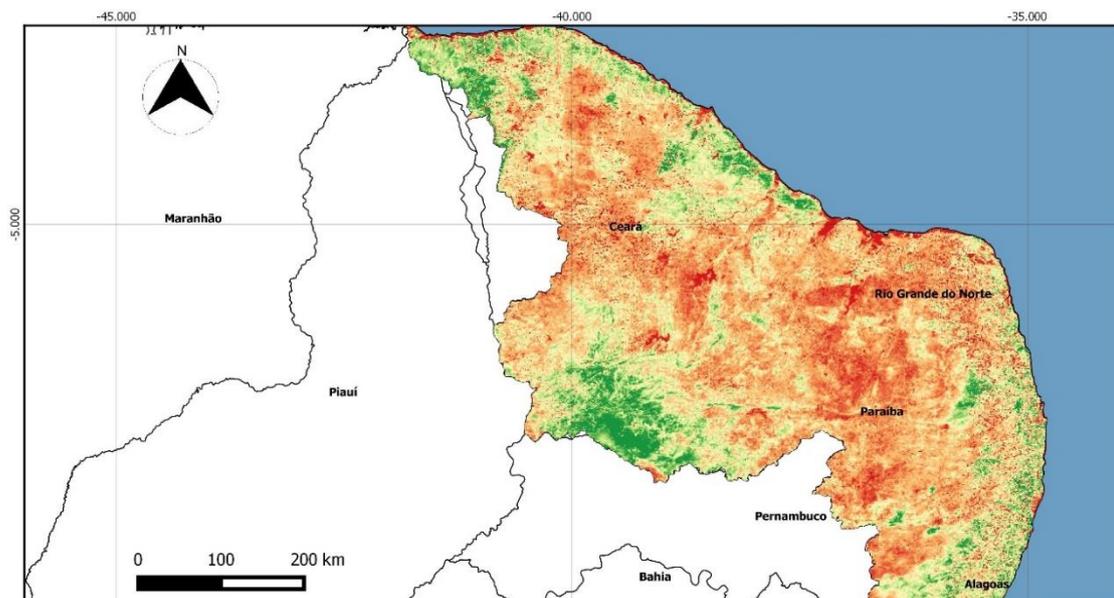


Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Dezembro de 2011



APÊNDICE S – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2012



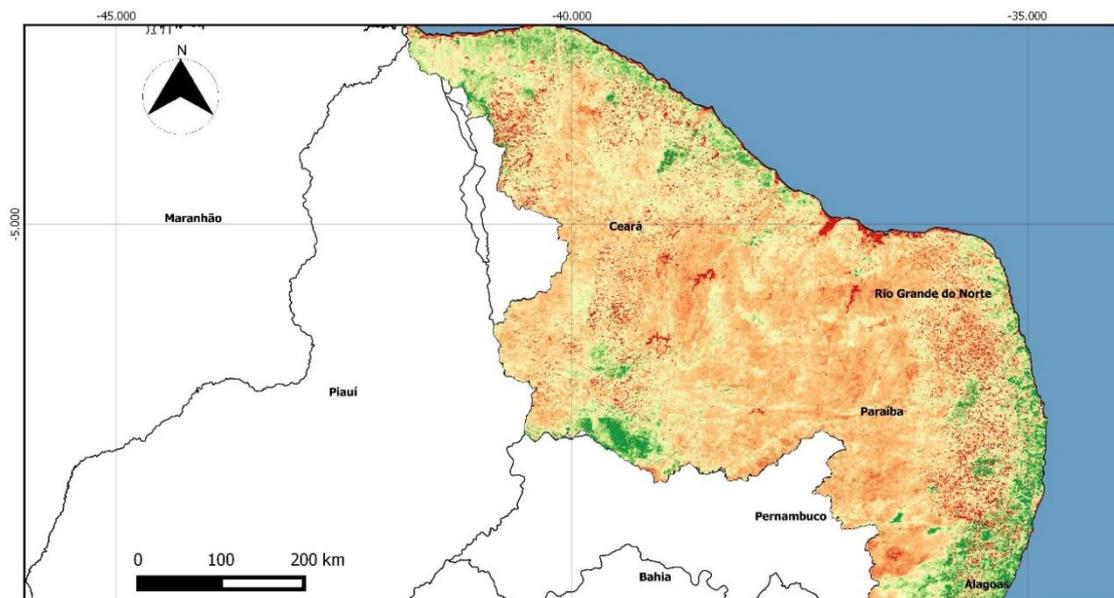
Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Janeiro de 2012

LEGENDA

	Atlântico Nordeste Oriental		< 0,22
	Estados do Brasil		0,23 - 0,47
	Oceano Atlântico		0,48 - 0,61
			0,62 - 0,73
			> 0,74

APÊNDICE T – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2012



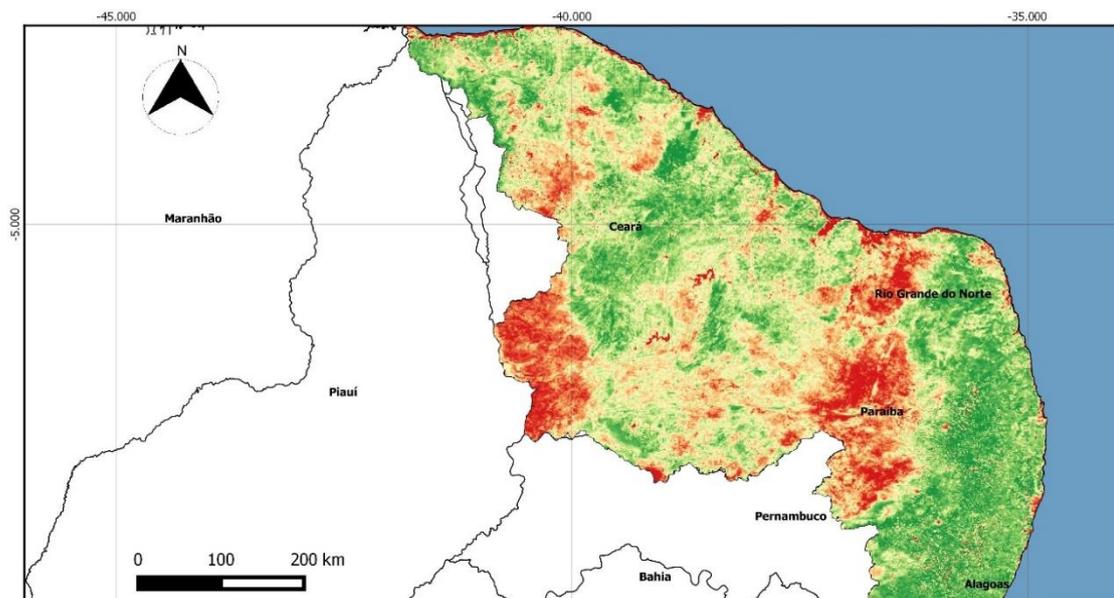
Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Dezembro de 2012

LEGENDA

	Atlântico Nordeste Oriental		< 0,12
	Estados do Brasil		0,13 - 0,35
	Oceano Atlântico		0,36 - 0,48
			0,49 - 0,60
			> 0,61

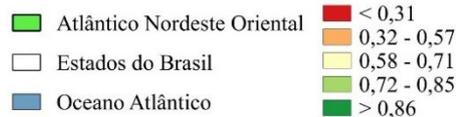
APÊNDICE U – MAPA NDVI PARA A RHANO JULHO DE 2013



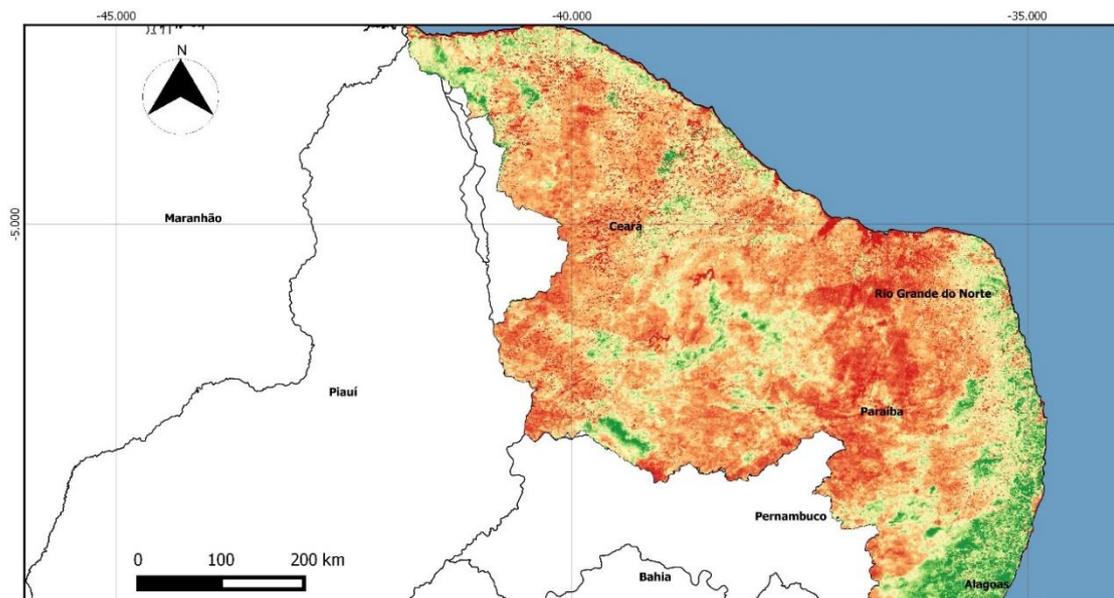
Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Julho de 2013

LEGENDA



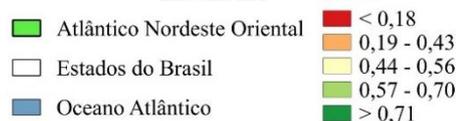
APÊNDICE V – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2013



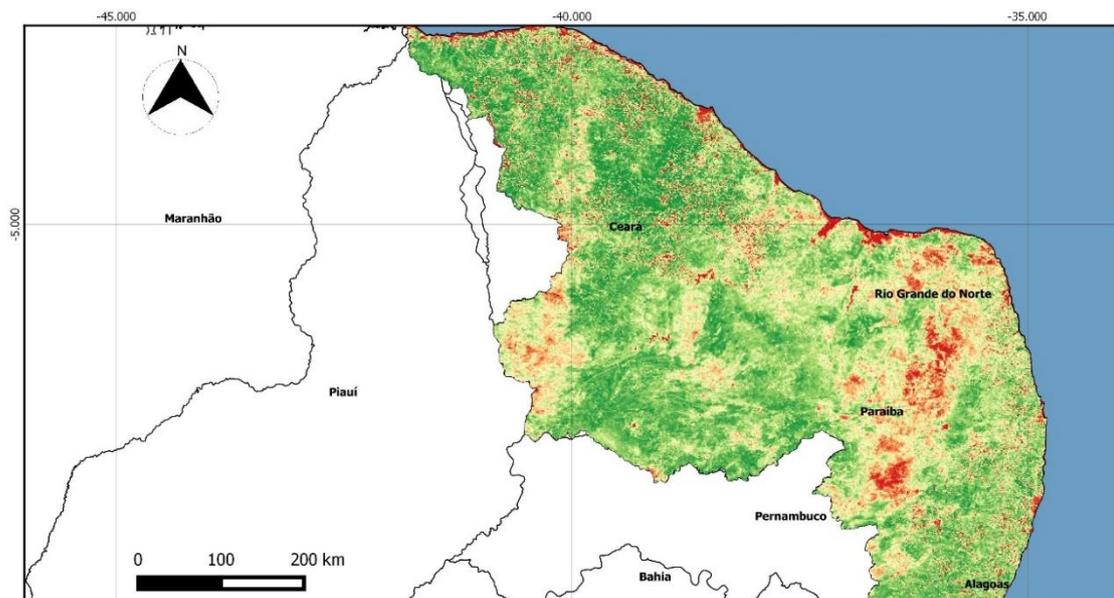
Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Dezembro de 2013

LEGENDA



APÊNDICE W – MAPA NDVI PARA A RHANO MAIO DE 2014

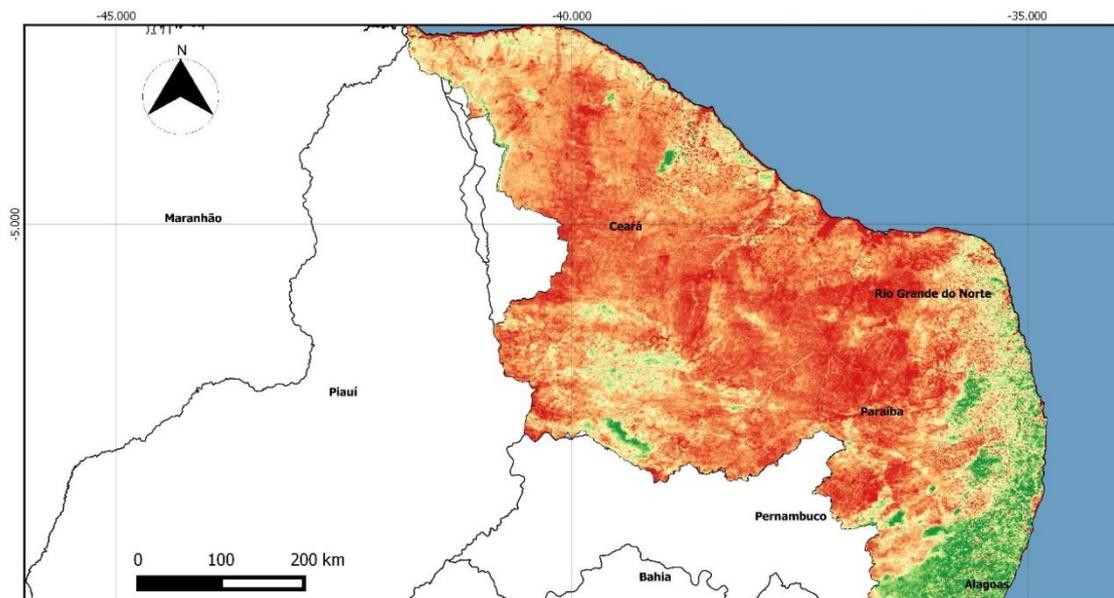


Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Maio de 2014



APÊNDICE X – MAPA NDVI PARA A RHANO NOVEMBRO DE 2014

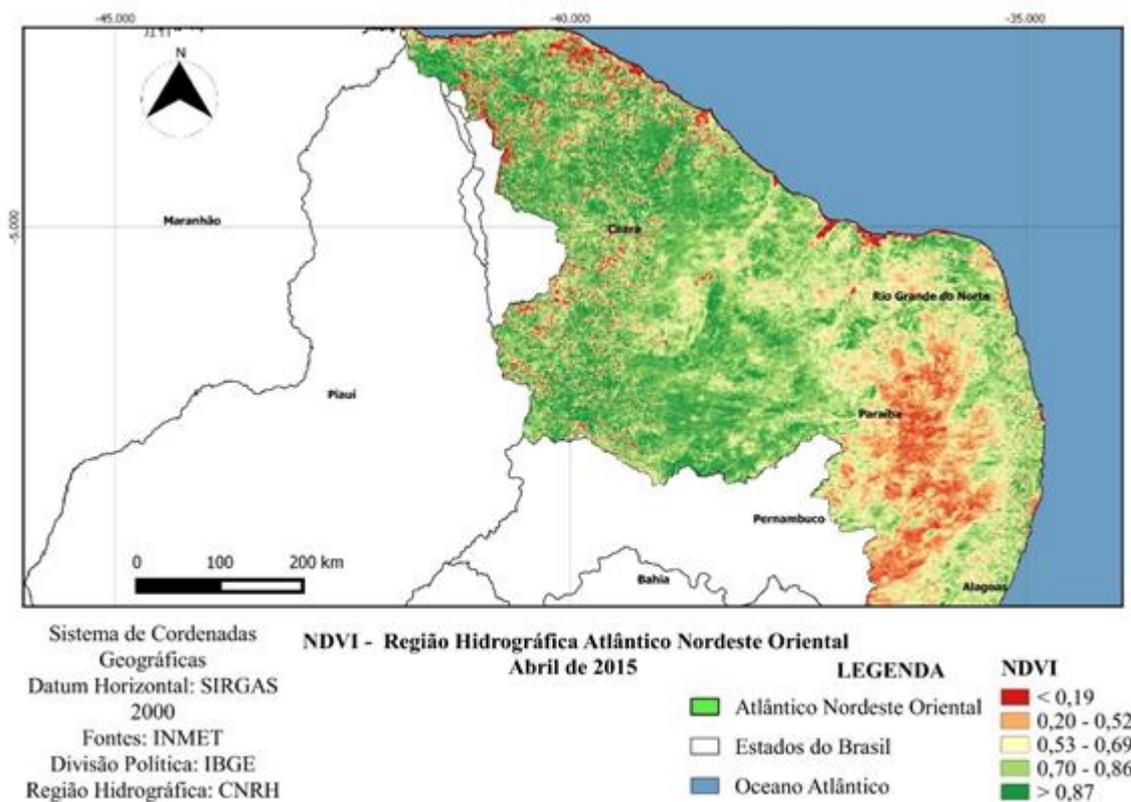


Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

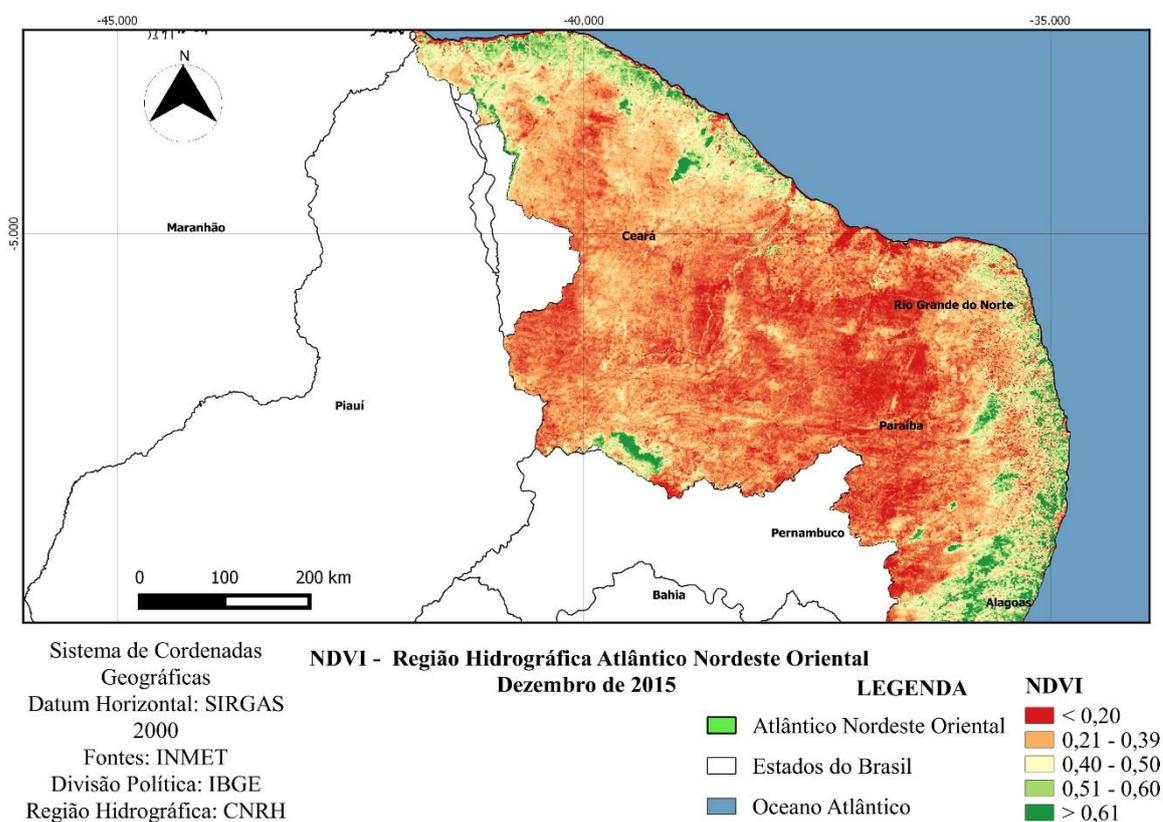
NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Novembro de 2014



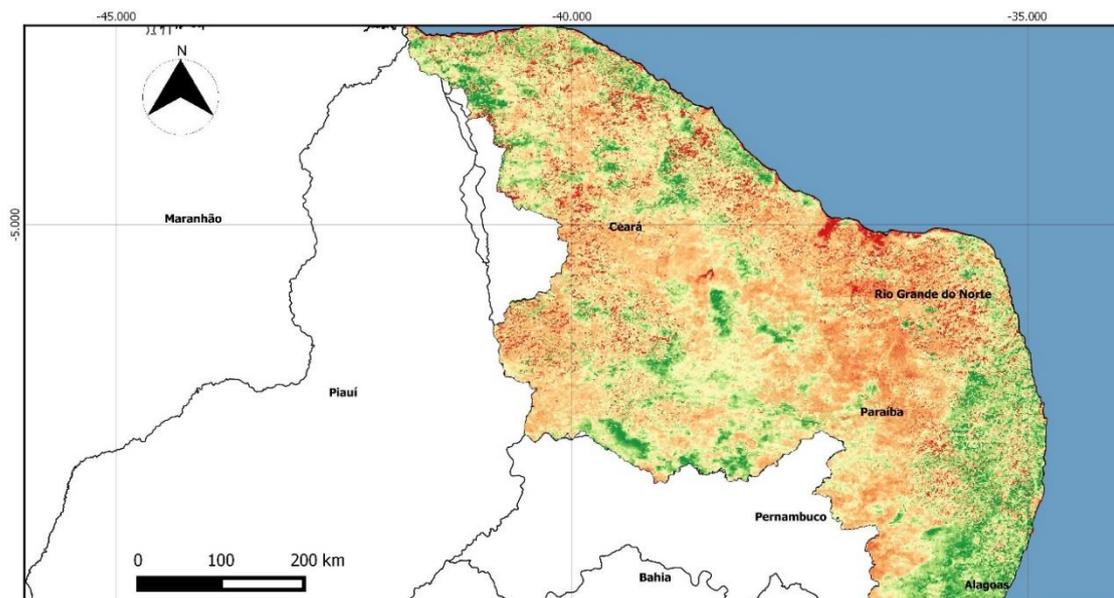
APÊNDICE Y – MAPA NDVI PARA A RHANO ABRIL DE 2015



APÊNDICE Z – MAPA NDVI PARA A RHANO DEZEMBRO DE 2015



APÊNDICE AA – MAPA NDVI PARA A RHANO JANEIRO DE 2016



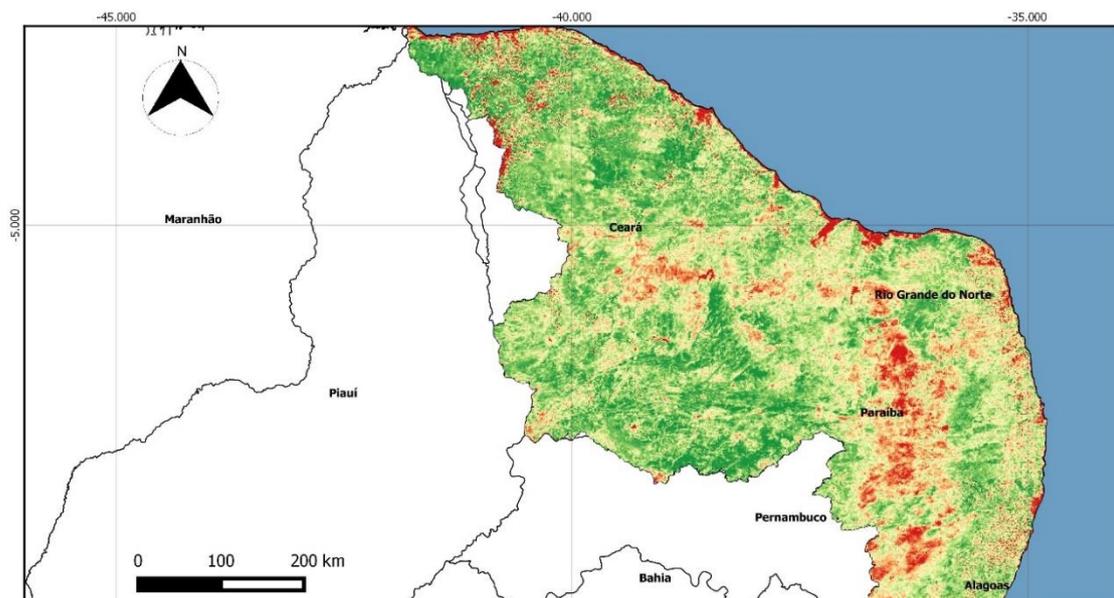
Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Janeiro de 2016

LEGENDA

LEGENDA		NDVI
	Atlântico Nordeste Oriental	< 0,10
	Estados do Brasil	0,25 - 0,39
	Oceano Atlântico	0,40 - 0,55
		0,56 - 0,71
		> 0,72

APÊNDICE AB – MAPA NDVI PARA A RHANO FEVEREIRO DE 2016



Sistema de Cordenadas Geográficas
Datum Horizontal: SIRGAS 2000
Fontes: INMET
Divisão Política: IBGE
Região Hidrográfica: CNRH

NDVI - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
Fevereiro de 2016

LEGENDA

LEGENDA		NDVI
	Atlântico Nordeste Oriental	< 0,32
	Estados do Brasil	0,33 - 0,58
	Oceano Atlântico	0,59 - 0,71
		0,72 - 0,85
		> 0,86