

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

LEANDRO RODRIGO MACEDO DA SILVA

**VARIABILIDADE E TENDÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL DA
CAATINGA UTILIZANDO O IVDN E PRECIPITAÇÃO PLUVIAL
RELACIONADAS COM A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

MACEIÓ, ALAGOAS

2015

LEANDRO RODRIGO MACEDO DA SILVA

**VARIABILIDADE E TENDÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL DA
CAATINGA UTILIZANDO O IVDN E PRECIPITAÇÃO PLUVIAL
RELACIONADAS COM A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. PhD. Humberto Alves Barbosa

MACEIÓ, ALAGOAS

2015

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade

S586v Silva, Leandro Rodrigo Macedo da.
Variabilidade e tendência espaço-temporal da Caatinga utilizando o IVDN e precipitação pluvial relacionadas com a degradação ambiental no Semiárido brasileiro / Leandro Rodrigo Macedo da Silva. – Maceió, 2015.
73 f. : il.

Orientador: Humberto Alves Barbosa.
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Maceió, 2015.

Bibliografia: f. 69-72.
Apêndice: f. 73.

1. Dinâmica da vegetação. 2. Áreas degradadas. 3. Sensoriamento remoto
4. IVDN. I. Título.

CDU: 551.577.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

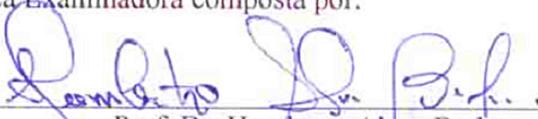
N.º de ordem: MET-UFAL-MS-128.

“Variabilidade e tendência espaço-temporal da Caatinga utilizando IVDN e precipitação pluvial relacionadas com a degradação ambiental no Semiárido brasileiro”

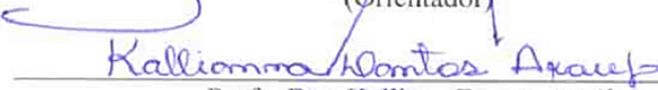
Leandro Rodrigo Macedo da Silva

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

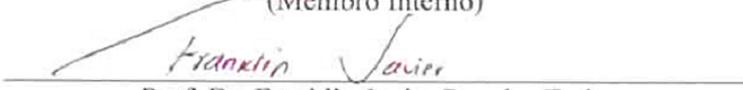
Aprovado pela Banca Examinadora composta por:



Prof. Dr. Humberto Alves Barbosa
(Orientador)



Prof. Dra. Kalliana Dantas Araújo
(Membro Interno)



Prof. Dr. Franklin Javier Paredes Trejo
(Membro Externo – Universidade Carabobo)

Setembro/2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa e minha família nuclear pela motivação, desde o início desta fase da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu amigo fiel, Jesus, que me faz entender que tudo posso naquele que me fortalece. Muito obrigado Senhor!

A minha esposa pela sua imensa paciência e amor a mim dedicado nos momentos mais difíceis durante o decorrer dessa fase.

A minha amada família nuclear, principalmente a minha mãe pelos conselhos, os quais foram fundamentais para meu caráter pessoal e profissional. Também a minha amada grande família, especialmente aos meus avós maternos pelo amor e cuidados.

Ao meu professor e orientador Humberto Alves Barbosa pelo apoio na minha formação profissional, oportunidades proporcionadas, pelos ensinamentos, a amizade e pela confiança no meu trabalho como aluno e pesquisador.

Aos meus amigos do LAPIS Anselmo Manoel dos Santos, Luiz Eduardo dos Santos Costa, Edson Matias dos Santos, Tatiana Vanessa dos Santos, Carlos Alejandro Uzcátegui Briceño, Anacleto Marito Diogo e Luis Hernan Acosta Salvatierra pela ajuda profissional e pessoal, como também pela amizade que ultrapassa as fronteiras profissionais.

Ao professor Franklin Javier Paredes Trejo por dedicar seu tempo compartilhando seus conhecimentos sobre o software R e estatística.

A professora Kalliana Dantas Araújo, pela fundamental contribuição no melhoramento do meu trabalho, assim como a parceria.

Ao PPGMet e CNPq pelo apoio e financiamento da minha pesquisa.

Agradeço.

*“Combati o bom combate, terminei a corrida,
guardei a fé”. (2 Timóteo: 4:7)*

*Ser vitorioso em pequenas lutas é tornar-se capaz de
grandes vitórias. (O autor)*

RESUMO

O objetivo desse trabalho é analisar variabilidade e tendência espaço-temporal da Caatinga, utilizando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada e a precipitação pluvial relacionadas com a degradação ambiental no semiárido brasileiro. Foram utilizados dados do SPOT, na resolução temporal de 10 dias e espacial de 1 quilômetro, nos períodos de 1998-2012 e 2007-2014. Também foram utilizados dados de precipitação pluvial, com resolução espacial de 0,25° (10 dias) e 0,05° (mensal), para os períodos de 1998-2012 e 1981-2014. O trabalho foi dividido em duas metodologias. A primeira metodologia foi baseada na análise da tendência da dinâmica da vegetação, através da correlação dos índices SDVI e SPI-1 para o período de 1998 a 2012. A segunda metodologia foi a análise interanual da vegetação para o período de 2007 a 2012, correlacionando o IVDN com a precipitação pluvial para o mesmo período, relacionando ao índice de risco de secas e os subíndices de propensão socioeconômica. Na análise da primeira metodologia, a correlação foi positiva em quase todo SAB com melhores defasagens no período de 3-6 meses. O SDVI apresentou tendências positivas ao norte e áreas isoladas do SAB, por outro lado o SPI-1 demonstrou em algumas áreas fracas e positivas e na maior parte nula. Na árvore de decisões destacaram-se duas áreas ao norte do SAB com tendências a degradação e verdejamento. Na análise da segunda metodologia, o IVDN apresentou áreas com sinais de degradação em algumas áreas da região central e nordeste do SAB. Enquanto na correlação interanual entre o IVDN e a precipitação mostrou uma distribuição da correlação positiva e significativa que se estendeu da região central ao norte do SAB, enquanto a correlação negativa esteve mais ao sul. Relacionando as variáveis com os subíndices de propensão socioeconômica, a precipitação e o IVDN tiveram correlação positiva em todos os níveis de propensão, com alto grau de correlação no nível 3 (alto) observado para os três subíndices. A metodologia de tendência é sugestiva para outras análises por contribuir agregando valores às novas técnicas de monitoramento de áreas degradadas atribuindo novos dados com melhor resolução espacial e temporal, como também indicadores, no intuito de melhorar as análises e obter resultados mais eficientes.

Palavras-chave: Dinâmica da vegetação. Áreas degradadas. Sensoriamento remoto. IVDN.

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze variability and trend spatiotemporal Caatinga using the Normalized Difference Vegetation Index and rainfall related to environmental degradation in the Brazilian semiarid region. The SPOT data were used in the temporal resolution of 10 days and space of 1 kilometer, in the periods of 1998-2012 and 2007-2014. Also of rainfall data were used, with spatial resolution of 0,25° (10 days) and 0,05° (monthly) for the periods 1998-2012 and 1981-2014. The work was divided into two methodologies. The first methodology was based on analysis of vegetation dynamics trend, by correlating SDVI and SPI-1 indices for the period 1998 to 2012. The second methodology was the interannual analysis of vegetation for the period 2007 to 2012, correlating NDVI with rainfall for the same period, relating to drought risk index and sub-indices of socioeconomic bias. In the first methodology analysis, the correlation was positive in almost all SAB with better lags in the period of 3-6 months. The SDVI showed positive tendencies north and isolated areas of BSA, on the other hand the SPI-1 showed weak in some areas and positive and greater void part. In the decision tree stood out two areas north of the SAB with degradation trends and greening. In the analysis of the second method, the NDVI showed areas with signs of degradation in some areas of central and northeastern SAB. While the inter-correlation between NDVI and precipitation showed a distribution of positive and significant correlation that extended from the central region north of the SAB, while the negative correlation was further south. Relating the variables with the sub-indices of socioeconomic bias, precipitation and the NDVI had positive correlation at all likely levels with a high degree of correlation in the level 3 (high) observed for the three sub-indices. The trend methodology is suggestive for further analysis to contribute adding value to the new monitoring of degraded areas of technical assigning new data with better spatial and temporal resolution, as well as indicators in order to improve analysis and more efficient results.

Key-words: Vegetation dynamics. Degraded areas. Remote sensing. NDVI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Áreas susceptíveis a desertificação e núcleos de desertificação na região do SAB.	20
Figura 2 - Delimitação dos biomas (a) e tipo de cobertura vegetal (b), conforme o período sazonal do SAB.	23
Figura 3 - Resposta espectral de cada banda, vegetação e solo.....	26
Figura 4 - Representação da síntese de 10 dias de acordo com o princípio máximo valor composto do IVDN.....	27
Figura 5 - Procedimento de correção da para separação da água e solo	28
Figura 6 - Localização do semiárido no espaço geográfico brasileiro	33
Figura 7 - Fluxograma metodológico do processamento do IVDN SPOT.....	38
Figura 8 - Representação gráfica da criação dos mapas estatísticos de precipitação pluvial. ...	39
Figura 9 - Representação gráfica da correlação entre o IVDN e precipitação pluvial	41
Figura 10 - Representação metodológica do cálculo do MDSI. Análise dos quantis da série observada (a), aplicação do algoritmo de classificação de Fisher-Jenks (b), análise espaço-temporal dos limites de seca otimizada mensal (c), cálculo do MDSI (d) e exemplo da probabilidade de eventos de secas (e).....	43
Figura 11 - Comparação da correlação ponto campos entre SDVI mensal e valores SPI-1 mensais sobre o SAB para o período 1998-2012. Coeficientes de regressão (coeficientes beta) entre SDVI e SPI-1 maior ou menor que 0,6 (um). Os coeficientes de correlação de Pearson (A) entre SDVI e SPI-1 desfasado de um atraso de 0-11 meses (B).....	50
Figura 12 - Comparação dos campos de tendência de inclinação SDVI (A) e SPI-1 (B) À diferença do SAB para o período 1998-2012.	52
Figura 13 - Distribuição geográfica da abordagem de árvore de decisão sobre o SAB para o período 1998-2012.....	54
Figura 14 - Produto da média interanual do IVDN (A) e o desvio padrão (B) para o período de 2007 a 2014.	56
Figura 15 - Representação da precipitação interanual média (A) e desvio padrão da precipitação pluvial (B) e coeficiente de variação (C) para o período de 1981 a 2014.....	58
Figura 16 - Distribuição geográfica da correlação entre o IVDN e precipitação pluvial para o período de 2007 a 2014.	60
Figura 17 - Distribuição geográfica do índice de risco de secas.	61
Figura 18 - Distribuição espacial dos subíndices de propensão socioeconômica, quanto ao nível e condição econômica (A), social (B) e agropecuária (C).....	64

Figura 19 - Correlação da precipitação, índice de risco de secas e IVDN, para os subíndices de propensão da condição econômica (SIPe), social (SIPs) e agropecuária (SIPap), nos níveis 1, 2 e 3.66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comportamento espectral da vegetação fotossinteticamente ativa.....	24
Tabela 2 - Bandas espectrais SPOTVGT.	26
Tabela 3 - Classificação de secas do SPI e correspondentes eventos de probabilidade.....	31
Tabela 4 - Representação quantitativa dos municípios quanto à condição e o nível de propensão.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CHG	Climate Hazards Group
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENOS	El Niño Oscilação Sul
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
HDF5	Hierarchical Data Format version 5
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
ILWIS	Integrated Land and Water Information System
INSA	Instituto Nacional do Semiárido
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IVDN	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN)
JRC	Joint Resarch Centre
MSDI	Meteorological Severity Drought Index
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OSGeo	Open Source Geospatial Foundation
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
QGIS	Quantum GIS
S10	Syntesis 10
SAB	Semiárido brasileiro
SDVI	Standardized Difference Vegetation Index
SIPap	Subíndice de Propensão da condição agropecuária
SIPe	Subíndice de Propensão da condição econômica
SIPs	Subíndice de Propensão da condição social
SPI-1	Standardized Precipitation Index 1 month
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification
USAID	U.S. Agency for International Development
USGS	United State Geological Survey
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
VEGT	VEGETATION
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Geral	17
1.1.2	Específicos	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	O Semiárido do Nordeste brasileiro	19
2.2	Sistemas atmosféricos que atuam no SAB	21
2.3	Classificação da vegetação no SAB	23
2.4	Sensoriamento remoto: características espectrais da vegetação	24
2.5	O sistema VEGETATION	25
2.5.1	Visão geral	25
2.5.2	Bandas espectrais	25
2.5.3	O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada SPOTVGT/PROBA-V	27
2.6	Índice de Vegetação por Diferença Padronizada	29
2.7	Índice de Precipitação Padronizada	30
2.8	Climate Hazard InfraRed Precipitation (CHIRP)	31
2.9	Geotecnologias para processamento de dados	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1	Caracterização da área de estudo.....	33
3.2	Aquisição dos dados de IVDN SPOT-S10 e precipitação pluvial	33
3.3	Aquisição dos dados do índice de risco de secas	34
3.4	Aquisição dos dados dos subíndices de propensão socioeconômica	34

3.5	Análise da tendência da dinâmica da vegetação para o SAB no período de 1998 a 2002	34
3.6	Análise da dinâmica interanual da vegetação por meio dos dados do IVDN para o período de 2007 a 2014	36
3.6.1	Processamento dos dados IVDN	37
3.6.2	Análise estatística dos dados de precipitação	38
3.6.3	Relação entre a variabilidade da precipitação pluvial com os dados de IVDN	40
3.7	Análise do IVDN e precipitação pluvial com fatores biofísicos e socioeconômicos	41
3.7.1	Índice de risco de secas	41
3.7.2	Índices de propensão social, econômica e agropecuária	44
3.7.3	Análises estatísticas entre os índices, IVDN e precipitação	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Análise da tendência da dinâmica da vegetação para o SAB no período de 1998 a 2002	49
4.2	Análise da dinâmica interanual da vegetação por meio dos dados do IVDN para o período de 2007 a 2014	55
4.3	Relação entre a variabilidade da precipitação pluvial com os dados de IVDN	57
4.4	Análise do IVDN e precipitação pluvial com fatores biofísicos e socioeconômicos	61
4.4.1	Análise do índice de risco de secas	61
4.4.2	Análise dos aspectos socioeconômicos	62
4.4.3	Análises estatísticas entre os índices, IVDN e precipitação pluvial	65
5	CONCLUSÕES	68
6	REFERÊNCIAS	69
7	APÊNDICE	73

2 INTRODUÇÃO

De acordo com Matallo Junior (2001) os sinais de degradação podem ser evidentes quantitativamente em vários indicadores de degradação. Porém não fornecem resultados consistentes com as observações e o único indicador mais aceito é a baixa cobertura vegetal, como um sinalizador do início do processo de degradação. Desse modo, é necessário a realização de pesquisas que analisem e identifique sua variabilidade associada à precipitação pluvial, utilizando métodos estatísticos e relacionando-os com fatores de condição ambiental e socioeconômicos, visando a identificação de áreas propensas a ocorrência de degradação ambiental.

No Brasil, o Semiárido brasileiro (SAB) é uma das regiões mais afetadas pela ocorrência de secas, registrando efeitos danosos principalmente na agricultura, pecuária e suprimento hídrico para populações rurais e urbanas. Alguns fatores biofísicos, tais como temperaturas anuais médias elevadas, má distribuição da precipitação pluviométrica, insolação elevada, altas taxas de evapotranspiração e outros, podem agravar a situação do SAB, contribuindo como o processo de desertificação (NEVES, 2010).

Os regimes de precipitação na região são influenciados por sistemas atmosféricos, de diferentes escalas. Alguns desses ganham destaque por sua frequente atuação como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), ENOS (El Niño/La Niña) e frentes frias. A ZCIT é o principal mecanismo causador de chuva na região norte do SAB, devido ao deslocamento mais ao sul proveniente do enfraquecimento do anticiclone do Atlântico Sul. O ENOS, na sua fase positiva, influencia diretamente no regime de chuvas na região do SAB, causando diminuição do índice pluviométrico e contribuindo para a intensificação da seca. Quanto aos sistemas frontais, são importantes mecanismos de influência nos regimes de pluviométricos ao sul do SAB, produzindo chuvas na entrada ou pelo resquício deixado pela passagem (MOLION, 2002). Outro sistema que afeta a região é o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), com ocorrência geralmente no período de novembro a fevereiro, podendo causar chuvas em áreas das periferias do sistema, assim como estiagens nas áreas ao centro do sistema.

A região Semiárida do Brasil tem um aspecto peculiar em termos de vegetação. O bioma Caatinga é uma vegetação predominante neste ambiente é tipicamente brasileiro, com uma área de 844.453 km² (IBGE, 2004). As plantas são adaptadas ao clima, geralmente, xeromórfica (espinhosas) e resistentes a períodos de estiagem, devido ao mecanismo desenvolvido para reter/armazenar água. Outra característica é uma vegetação arbórea,

arbustiva, em sua maior parte, decíduais, além de muitas cactáceas.

Estudos na região Nordeste brasileiro sobre a variabilidade da vegetação a partir do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN), foram utilizados para a identificação de áreas degradadas, conforme pesquisa realizada por Barbosa et al. (2006) durante a série temporal de 1982 a 1999, cujos resultados obtidos mostraram tendências de quedas do IVDN devido a impactos espaço-temporais das condições meteorológicas e períodos de secas prolongados. Analisando a dinâmica da vegetação e a relação com a precipitação pluvial na América do Sul, para o período de 1998 a 2012, Barbosa et al. (2015) identificaram em que 46% da área, os processos de degradação e verdejamento significativos, e não estão ligados a mudanças na precipitação pluvial ao longo do tempo, indicando que o impacto humano ou outros fatores climáticos estão influenciando direta ou indiretamente nesse processo.

Diante deste contexto elaborou-se o seguinte questionamento: é possível avaliar a degradação ambiental por meio de dados e técnicas de sensoriamento remoto na região de Caatinga do Semiárido brasileiro? Para responder este questionamento foi elaborada a seguinte hipótese: O IVDN é considerado um indicador biofísico capaz de identificar áreas de degradação ambiental fornecendo subsídios para avaliação da variabilidade e tendência espaço-temporal da caatinga do Semiárido brasileiro.

2.1 Objetivos

2.1.1 Geral

Analisar a dinâmica da vegetação na região do Semiárido brasileiro (SAB), utilizando o IVDN e a precipitação pluvial como principais indicadores de degradação ambiental relacionando-os com informações da condição ambiental e socioeconômica da região.

2.1.2 Específicos

- Analisar a tendência da dinâmica da vegetação para o SAB no período de 1998 a 2012;
- Analisar a dinâmica interanual da vegetação por meio de dados de IVDN, para o período de 2007 a 2014;
- Relacionar a variabilidade da precipitação pluvial com dados de IVDN, utilizando métodos estatísticos;
- Avaliar estatisticamente a relação do IVDN e precipitação pluvial com fatores de condição ambiental e socioeconômica.

No primeiro capítulo encontra-se o item a introdução, na qual foram apresentadas a contextualização e motivação da pesquisa, e/ou importância, além dos objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo diz respeito ao item revisão de literatura no qual foi realizada uma revisão teórica do Semiárido do Nordeste brasileiro, quanto as suas características biofísicas e socioeconômicas. No seguinte a vegetação, como um parâmetro alvo do sensoriamento remoto e o sensor VEGETATION. Logo após os índices de SDVI e SPI-1, como também os dados de precipitação pluvial e desenvolvedores. E por fim os programas de geoprocessamento e cálculo estatístico.

No terceiro capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados nesse trabalho. No primeiro item são mostrados os dados da pesquisa. Logo após é apresentada a metodologia de tendência da dinâmica da vegetação utilizada por Barbosa et al. (2015). No seguinte a metodologia referente à análise interanual da dinâmica da vegetação e precipitação, assim como a correlação entre IVDN e precipitação. Seguindo são abordados os métodos de criação do índice de risco de secas e índice de propensão socioeconômica. E por fim, é abordada a metodologia aplicada para relacionar os dados de IVDN e precipitação com fatores de condição ambiental e socioeconômica.

No quarto capítulo é apresentado o item resultados e discussão, no que se referem à análise da tendência da vegetação no SAB, no período de 1998 a 2012, utilizando análises estatísticas entre SDVI com o SPI-1, como também as combinações das respostas dos índices SPI-1 e SDVI, representada por uma árvore de decisões. Logo é analisada a dinâmica interanual da vegetação, do período de 2007 a 2014, juntamente com as análises de precipitação e correlação entre IVDN versus precipitação. Em seguida é visto o mapa do índice de risco de seca que provém mostrar um índice de ocorrência de secas. Logo após serão abordadas as análises dos subíndices de propensão socioeconômica. E por fim, as análises estatísticas das relações entre o IVDN, precipitação e índice de risco de secas, tomando como base de a quantidade de municípios e seus respectivos níveis de propensão.

No capítulo cinco, encontra-se o item conclusões e sugestões para trabalhos futuros. E no capítulo seis as referências bibliográficas utilizadas no trabalho. E no capítulo sete apresenta o apêndice que disponibiliza o artigo científico publicado relacionado à pesquisa.

3 REVISÃO DE LITERATURA

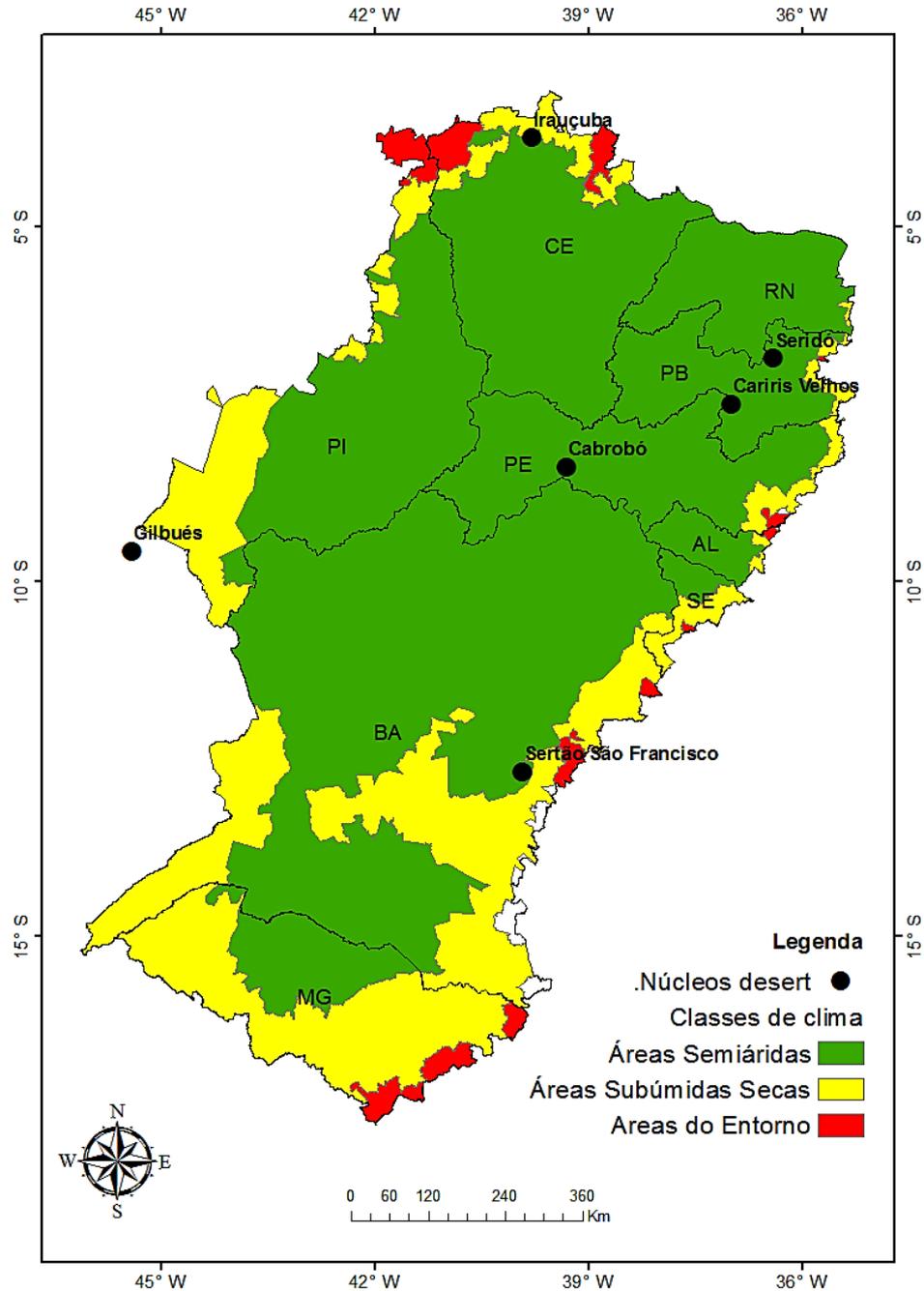
3.1 O Semiárido do Nordeste brasileiro

A região do Semiárido brasileiro (SAB) abrange uma área de 969.589,4 km² (MI, 2005). Nela estão contidos 1.135 municípios, com uma população maior que 23 milhões de habitantes, densidade demográfica cerca de 24 habitantes/km², sendo considerada mais populosa, assim como uma das maiores áreas do mundo susceptível ao processo de desertificação (INSA, 2014)

No Brasil, a região que se enquadra na definição da UNCCD sobre desertificação é o Nordeste e o Norte de Minas Gerais. Esse processo pode ocorrer em outras regiões do Brasil. No entanto, não podem ser denominados de desertificação e não se enquadram na Convenção. As características dessas regiões são baixa precipitação anual, alta evapotranspiração, alta concentração populacional e alto índice de pobreza. No Semiárido brasileiro as áreas susceptíveis a desertificação compreendem 1.340.863 km², incluindo 1.488 municípios, localizados em nove estados, municípios no Norte de Minas Gerais e do Espírito Santo, onde o grau de conhecimento destes processos degradativos e sua extensão ainda não são suficientes e necessitam de constantes atualizações (PAN BRASIL, 2004).

A desertificação foi o assunto abordado na obra pioneira do ecólogo João Vasconcelos Sobrinho em 1997, intitulada como “Núcleos de desertificação no polígono de secas”. A partir dessa obra, pôde visualizar melhor algumas características do fenômeno. Nela foram apresentadas algumas áreas piloto na região SAB (Figura 1), pelas suas evidentes características de alto nível de degradação sendo: Gilbués (Piauí), Irauçuba (Ceará), Seridó (Rio Grande do Norte), Cabrobó (Pernambuco), Cariris Velhos (Paraíba) e Sertão do São Francisco (Bahia), (INSA, 2014).

Figura 1. Áreas susceptíveis a desertificação e núcleos de desertificação na região do SAB.



As características climáticas são marcadas pela insuficiência e má distribuição de chuvas, dispendo de uma média anual variando entre 300 a 800 mm/ano, com períodos seco e chuvoso de 6-8 e 4-6 meses, respectivamente. Outro fator relevante são as altas temperaturas médias que correspondem à mínima de 20 °C e máxima de 30 °C, como também a evapotranspiração potencial elevada com cerca de 3.000 mm/ano, (NEVES, 2010).

A região dispõe de uma variedade de solos com baixa capacidade de fertilização, sob a predominância de Latossolos (19%), Neossolos Litólicos (19%), Argissolos (15%) e

Luvissolos (13%), que representam 66% dos 15 tipos de solos que cobrem a Caatinga (SALCEDO, 2008).

As principais atividades econômicas da região são a agricultura e pecuária. Essas são diretamente afetadas pelo fenômeno da desertificação, causando impactos econômicos e sociais remetendo a população à baixa qualidade de vida, podendo ser constatado pelo Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), que apresenta os menores valores para a região Semiárida, no que diz respeito à renda, educação e saúde.

3.2 Sistemas atmosféricos que atuam no SAB

Para Nobre et al. (1988), a variabilidade pluvial no Nordeste brasileiro resulta de efeitos combinados da ação de vários sistemas meteorológicos e das variações na intensidade e posição das circulações de Hadley e Walker, embora esteja intimamente relacionada, com as mudanças nas configurações de circulação atmosférica de grande escala e com a interação oceano-atmosfera no Pacífico e no Atlântico.

O semiárido nordestino é caracterizado pela heterogeneidade espacial e temporal das chuvas. Os regimes de precipitação na região são influenciados por sistemas atmosféricos, como Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), ENOS (El Niño/La Niña) e sistemas frontais. Outro sistema que atinge a região é Vórtice Ciclônico de Altos Níveis, sua ocorrência geralmente é verificada no período de novembro a fevereiro, podendo causar chuvas nas áreas próximas as periferias do sistema, assim como estiagens para as áreas localizadas ao centro do sistema.

A ZCIT é o principal mecanismo causador de chuva na região norte do SAB, devido ao deslocamento mais ao sul proveniente do enfraquecimento do anticiclone do Atlântico Sul. Do contrário, a ZCIT também pode causar seca na região do SAB. Segundo Pan Brasil (2004) as áreas mais afetadas pela seca no Nordeste são as decorrente da ação da ZCIT, essa por sua vez provoca uma variabilidade climática quando combinada com outros fatores, causando secas de grandes proporções. Nessas áreas os solos são relativamente mais pobres do que nas demais zonas geoeconômicas do Nordeste (Zonas da Mata, do Agreste ou dos Cerrados da Bahia), onde a precipitação pluviométrica gira em torno de 400 mm a 800 mm de chuvas anuais.

O componente atmosférico, denominado de oscilação sul, expressa a correlação inversa existente entre a pressão atmosférica nos extremos leste (Tahiti, na Polinésia Francesa; 7,5° S e 149,6° W) e oeste (Darwin, norte da Austrália; 12,4° S e 130,9° E) do

oceano Pacífico. Essa relação foi estabelecida por Gilbert Walker, na década de 1920, e é também conhecida como “gangorra barométrica” (BERLATO et al., 2003)

O El Niño representa o componente oceânico do fenômeno, enquanto a Oscilação Sul (OS) representa a contrapartida da atmosfera. O componente oceânico, denominado EL Niño, originariamente designava uma corrente marítima quente para o sul no Pacífico, ao longo da costa do Peru e Equador. A denominação do fenômeno, dada por marinheiros da região, é alusiva ao Menino Jesus, visto que o aparecimento dessa corrente de águas quentes se dava com maior frequência, próximo ao Natal (BERLATO et al., 2003)

Os VCANs são definidos como sistemas fechados de baixa pressão, de escala sinótica, que se formam na alta troposfera (GAN, 1982). São comumente chamados na literatura de baixas frias, pois apresentam centro mais frio que a periferia. Os VCANs podem ser classificados de duas maneiras: vórtices do tipo Palmén, que se originam nas latitudes subtropicais e os vórtices do tipo Palmer, também chamados de vórtices de origem tropical por originarem-se nessa região.

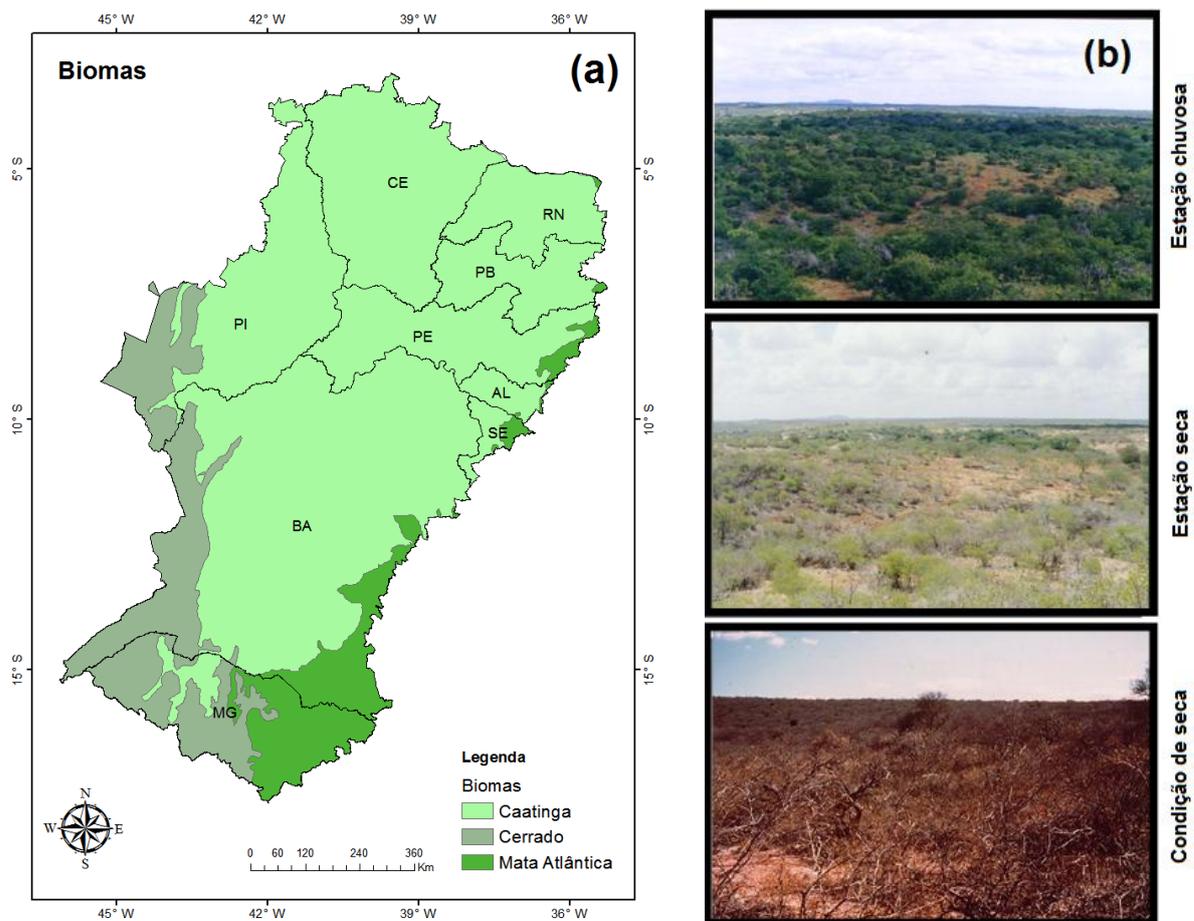
Os vórtices ciclônicos de origem tropical formam-se nos meses de primavera, verão e outono, passam a maior parte de sua atividade nos trópicos (PALMER, 1951). Ainda de acordo com o autor, os vórtices ciclônicos de origem tropical originam-se acima de 9000 m nas latitudes mais baixas, são persistentes, crescem e intensificam-se durante a passagem para as latitudes mais altas e, no Hemisfério Norte, deslocam-se para Nordeste ou Leste-nordeste no cinturão de 20° - 30° de latitude. Os vórtices ciclônicos na vizinhança do Nordeste do Brasil formam-se devido a intensificação simultânea da crista associada à Alta da Bolívia e o cavado corrente abaixo sobre o Oceano Atlântico (KOUSKY, 1981). Isto ocorre quando um sistema frontal proveniente do sul do Brasil, ao penetrar nos subtropicais, provoca forte advecção de ar quente no seu lado leste, amplificando a crista de nível superior e, por conservação de vorticidade absoluta, o cavado que está a jusante também é intensificado, formando-se o ciclone na alta troposfera.

Quanto às frentes frias, é um importante mecanismo de influência nos regimes de chuva no sul do SAB, produzindo-as na sua entrada ou pelo resquício de sua passagem (MOLION, 2002).

3.3 Classificação da vegetação no SAB

A cobertura vegetal do bioma Caatinga é muito diversificada (Figura 2), de modo que a savana estépica predomina em relação aos outros tipos de vegetação. O bioma tem características distintas e é tipicamente brasileiro, abrange uma área de 844.453 km² (IBGE, 2004). As plantas são adaptadas ao clima, geralmente, xeromórfica (espinhosas) e resistentes a períodos de estiagem, devido ao mecanismo desenvolvido para reter/armazenar água. Apresenta uma vegetação arbórea, arbustiva, em geral, decíduais, além de muitas cactáceas. No conceito da UNCCD foi definido que a alteração do ambiente pela ação humana é condição que intensifica a ação dos efeitos climáticos adversos que promovem degradação ambiental, por isso é muito importante a identificação dessas áreas degradadas. (MMA, 2007).

Figura 2. Delimitação dos biomas (a) e tipo de cobertura vegetal (b), conforme o período sazonal do SAB.



Fonte: BARBOSA (2014)

3.4 Sensoriamento remoto: características espectrais da vegetação

Os estudos sobre vegetação envolvendo a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto são baseados na condição da estrutura física de uma cobertura vegetal, onde essa responde ao fluxo de radiação eletromagnética incidente através dos processos de espalhamento (reflexão e reflexão) e absorção (PONZONI, 2002). Esses processos dependem das características do fluxo e físico-química da vegetação.

O principal elemento de detecção do sinal da vegetação são as folhas. Essas possuem propriedades espectrais físico-químicas capazes de interagir com a energia eletromagnética. Na tabela 1, são apresentadas as características espectrais de uma vegetação fotossinteticamente ativa.

Tabela 1. Comportamento espectral da vegetação fotossinteticamente ativa.

Intervalos do comprimento de onda	Resposta espectral	Descrição
$\lambda < 0,7 \mu\text{m}$	Baixa reflectância (menos de 20%)	Região do espectro visível correspondente ao vermelho. Absorve a radiação incidente pelos pigmentos da planta em $0,48 \mu\text{m}$ (carotenóides) e em $0,62 \mu\text{m}$ (clorofila). É a reflectância responsável pela percepção da cor verde da vegetação.
$0,7 \mu\text{m} < \lambda < 1,3 \mu\text{m}$	Alta reflectância (entre 30 e 40%)	Região do espectro visível correspondente ao infravermelho próximo. Reflete a radiação incidente, devido à interferência da estrutura celular.
$1,3 \mu\text{m} < \lambda < 2,5 \mu\text{m}$	Condicionalizada ao conteúdo de água na folha	Nessa região, encontram-se dois máximos de absorção pela água, em $1,4 \mu\text{m}$ e $1,95 \mu\text{m}$, a esta região correspondem também às bandas de absorção atmosférica, por esta razão os sensores desenvolvidos têm suas faixas espectrais deslocadas para regiões menos sujeitas à atenuação atmosférica.

Fonte: BOWKER et al. (1985)

Durante o ciclo de crescimento da vegetação a reflectância diminui no comprimento de onda visível e aumenta no comprimento de onda do infravermelho próximo, até que o desenvolvimento máximo do dossel é atingido. No período de senescência, a reflectância no

visível aumenta, enquanto diminui no infravermelho próximo, embora relativamente menos do que o aumento no visível. Assim, a reflectância da vegetação geralmente progride de um fundo, tal como o solo, até a verdura (enfolhamento) completa e, em seguida, retorna para o fundo novamente (BOWKER et al., 1985). Sendo assim, em combinações do espectro infravermelho próximo, vermelho e parte do visível, esses são usados para gerar uma variedade de diferentes índices (JACKSON, 1991).

3.5 O sistema VEGETATION

3.5.1 Visão geral

O Programa de VEGETATION foi desenvolvido em conjunto pela França, Comissão Europeia, Bélgica, Itália e Suécia. Desde abril de 1998, os satélites de observação da Terra SPOT 4 e 5 esteve operacional, levando a bordo o sensor VEGETATION. A missão visou fornecer aos usuários um serviço de observação global, de forma operacional. Com o intuito de monitorar a vegetação, para produção científica de estimativas e a interação entre a biosfera e mudanças climáticas (SAINT, 1994). Em 06 de maio de 2013 foi lançado o satélite PROBA-V que foi projetado para preencher a lacuna nas medições de vegetação entre os satélites SPOT-VGT, com a intenção de dar continuidade com a missão (WOLTERS et al., 2014).

O sensor VEGETATION pode ser utilizado para diferentes finalidades, devido à abrangência das resoluções pancromática (2,5 metros), para fins de mapeamento de alta precisão, até a resolução espacial de 1 km, onde a largura de faixa imageada é de 2.250 km (2.295 km, PROBA-V), na resolução temporal de 24 horas. O sensor opera em 4 bandas espectrais, sendo que três estão centradas no espectro visível do azul, verde, vermelho e a última no infravermelho próximo, que estão exclusivamente dedicadas para o monitoramento vegetativo em escala regional, com resolução radiométrica de 8 bits (SAINT, 1994; WOLTERS et al., 2014).

3.5.2 Bandas espectrais

De modo a identificar as principais características da copa das plantas (a absorção pela clorofila, teor de água e propriedades estruturais), as bandas espectrais para cumprir esta necessidade foram compostas por: uma banda do vermelho centrada sobre o pico de absorção da clorofila (0,665 μm); uma banda do infravermelho próximo correspondente à máxima

reflectância espectral da vegetação e, principalmente relacionadas com as propriedades estruturais das copas e porcentagem de solo coberto por vegetação e uma banda de infravermelho de onda curta, centrado em torno de 1,65 μm onde reflectância está relacionada ao teor de água dos componentes da copa e a sua estrutura.

Considerando a caracterização ou correção de efeitos atmosféricos, uma banda adicional é fornecida, a fim de calcular ou caracterizar o estado da atmosfera (aerossóis): uma faixa azul entre 0,45 e 0,50 μm , onde reflectância do solo da cobertura vegetal é mínima e os efeitos atmosféricos e difusão de aerossóis são máximos.

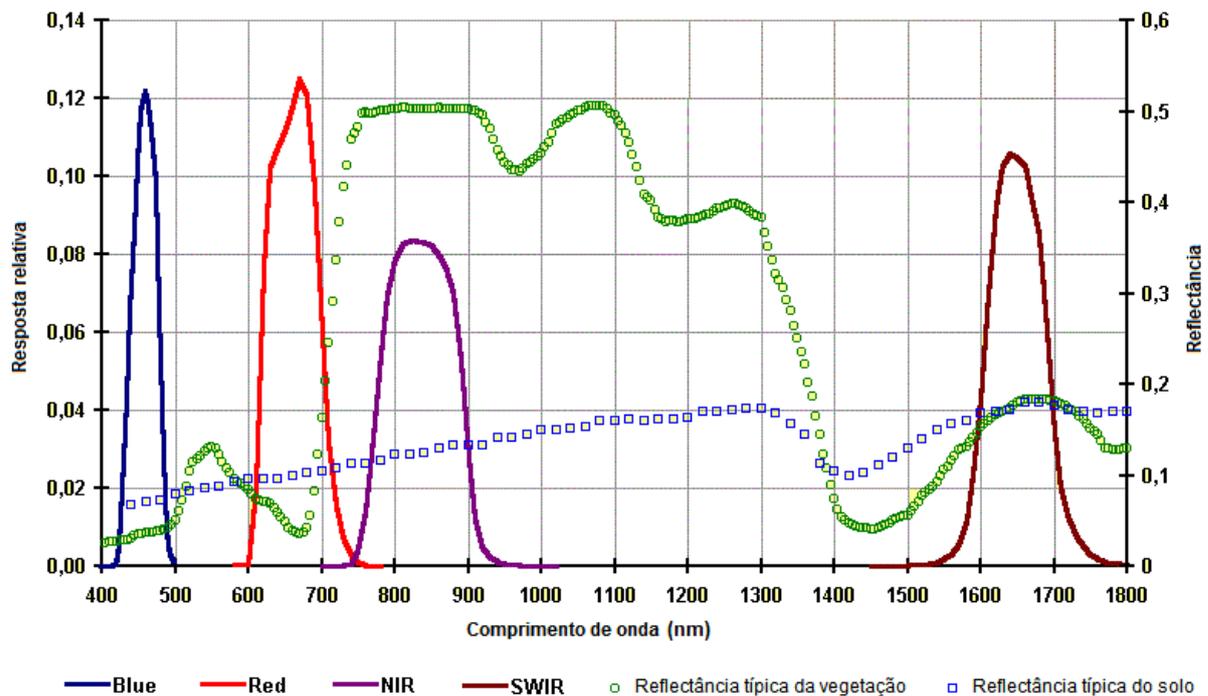
Sendo assim, as bandas espectrais do sensor VEGETATION são expressas na tabela 2 e na figura 3 é apresentada a resposta espectral de cada banda, para o solo e a vegetação.

Tabela 2. Bandas espectrais SPOTVGT.

Acrônimo	Bandas espectrais	(λ) Central	Intervalo (λ)
B0	Azul	0.450 μm	0.43 - 0.47 μm
B2	Vermelho	0.645 μm	0.61 - 0.68 μm
B3	Infravermelho próximo	0.835 μm	0.78 - 0.89 μm
SWIR	Infravermelho de ondas curtas	1.665 μm	1.58 - 1.75 μm

Fonte: SMETS (2015)

Figura 3. Resposta espectral de cada banda, vegetação e solo.

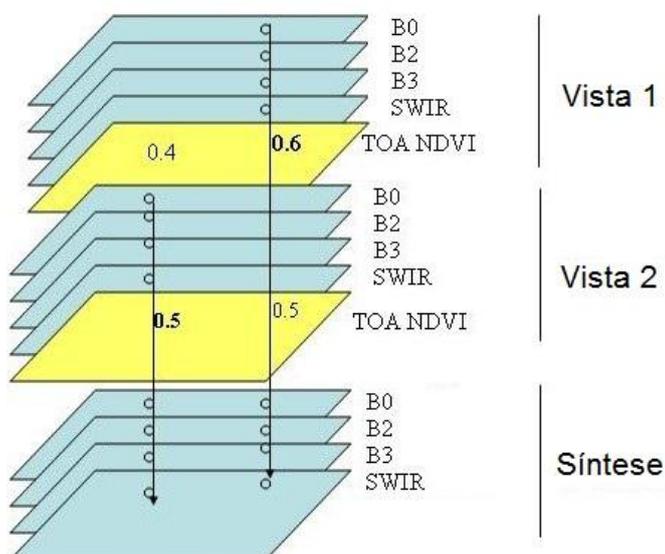


Fonte: VITO (2010b)

3.5.3 O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada SPOTVGT/PROBA-V

O produto IVDN VGT-S10, é pré-processado pelo Flemish Institute for Technological Research (VITO). A síntese de 10 dias (S10) fornece valores de reflectância de superfície com base em uma seleção das “melhores” medições em todo o período. A seleção efetiva baseia-se no valor máximo IVDN, através do método Maximum Value Composite Syntheses (MVC), que realiza a seleção dos maiores valores de IVDN (SMETS, 2015). Para obter uma visão sintetizada do mundo a partir de um conjunto de segmentos de visualização, um processo de mosaico do pixel é realizado escolhendo o “melhor” para um determinado pixel entre o conjunto das projeções disponíveis. O algoritmo escolhe a “melhor visualização” do máximo valor composto, também chamado “melhor IVDN”. Assim, um dado pixel pode ter sido visto várias vezes, isto é, a reflectância selecionada corresponde a melhor visualização IVDN. Os pixels nublado, de má qualidade ou interpolados são excluídos. Os pixels de mar ou lago são determinados a partir de um indicador estático, derivado da Carta Digital do Mundo (CDM), onde as terras foram ampliadas em 5 km para cobrir a imprecisão da CDM, para cobrir os casos de marés crescentes ou deltas de rios e para não alterar as costas marítimas reais dos pixels e interpolação com dados nulos. Este algoritmo utiliza 10 dias de observação, o que implica 5 a 30 vistas resultantes por pixel, o que dá a síntese S10, que dá uma vista quase livre de nuvem (VITO, 2010a). Na figura 4, mostra uma representação gráfica da composição S10 dos dados de IVDN.

Figura 4. Representação da síntese de 10 dias de acordo com o princípio máximo valor composto do IVDN



Fonte: VITO (2010a)

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) está relacionado a vegetação fotossinteticamente ativa. É calculado a partir das reflectâncias do vermelho e infravermelho próximo.

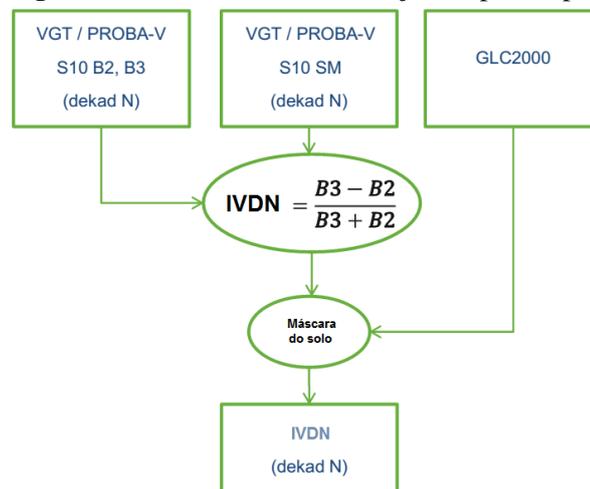
$$\text{IVDN} = \frac{\text{IVP}-V}{\text{IVP}+V} = \frac{B3-B2}{B3+B2} \quad (1)$$

Onde:

B2 e B3 reflectâncias de superfície das bandas vermelho e infravermelho próximo atmosféricamente corrigidas dos dados SPOT síntese de 10 dias.

Durante o processamento do IVDN, as informações armazenadas na máscara de estado (SM) estão integradas dentro do IVDN usando os valores mais altos. Então esses são removidos por serem pixels falsos do solo que são erroneamente identificados no SPOT ou PROBA-V no SM (o continente é falsamente estendida com terreno com cerca de dez pixels em torno das costas) usando o GLC2000 classificação de terras global (BARTHOLOMÉ et al., 2005). Todos os pixels de corpos d'água (mar, lago e rios), neste último mapa recebem um valor sinalizador de 254 nas imagens IVDN. Essa correção é importante para uma distinção entre terra e água (Figura 5).

Figura 5. Procedimento de correção da para separação da água e solo



Fonte: SMETS (2015)

A resolução espacial final do IVDN é de 1 km no nadir e apresenta variações mínimas para observações fora do nadir.

3.5.3.1 Formatos e nomenclatura

Os dados de IVDN do SPOT são disponibilizados nos formatos HDF-5 ou Geotiff, em quadrante de 10°x10° ou para um recorte continental. A nomenclatura padrão do dado

disponibilizado por quadrante está descrito na sequência.

g2_BIOPAR_NDVI_201107210000_H23V01_VGT_V1.2.tif

Onde:

g2_BIOPAR = geoland2 e BIOPAR

NDVI = nome abreviado de cada produto e variável

201107210000 = data e hora do arquivo

H23V01 = área de cobertura na horizontal (H) e vertical (V), considerando um quadrante de 10°x10°, como: 23° (H ou longitude) e 01 (V latitude)

VGT ou PROBA-V = nome do sensor

V1.2 = versão do dado

tif = formato do dado

3.5.3.2 Conversão radiométrica

As imagens do SPOTVGT são disponibilizadas em tons de cinza. Para a transformação dos dados para a faixa física da banda IVDN é necessário que seja aplicada a seguinte equação, para o SPOT ou PROBA-V:

$$IVDN = \left(\frac{ND}{255} \right) - 0,08 \quad (2)$$

em que:

ND = número digital da imagem que varia de 0 a 255.

3.6 Índice de Vegetação por Diferença Padronizada

O Índice de Vegetação por Diferença Padronizada (SDVI) toma como principal parâmetro de entrada o máximo valor composto do IVDN. Ele é baseado no fato da existência de uma relação direta entre as condições de vegetação e condições do tempo. Peters et al. (2002) afirmam que ele é capaz de mostrar os efeitos do clima sobre a vegetação em períodos curtos. O SDVI é calculado com base no conceito de "verdura relativa" introduzido por Burgan e Hartford (1993). Verdor relativo é um valor percentual que expressa como o verde de cada local do pixel em relação ao verdor da média e ao recorde histórico para um pixel de cada dado tempo. Para a verdura relativa, a gama de possíveis valores é determinado pela relação do IVDN corrente pela média do IVDN em um determinado período de tempo para cada pixel (PETERS et al., 2002). O SDVI é calculado utilizando a equação:

$$SDVI_{ijk} = \frac{IVDN_{ijk} - \overline{IVDN_{ij}}}{\sigma_{ij}} \quad (3)$$

em que:

$SDVI_{ijk}$ = índice para o pixel (i) durante o período (j) no ano k;

$IVDN_{ijk}$ = valor do IVDN para o pixel (i) durante período (j) no ano k;

$IVDN_{ij}$ = valor médio do IVDN para o pixel (i) durante período (j) sobre n anos;

σ_{ij} = desvio padrão para o pixel (i) durante período (j) sobre n anos.

O SDVI estima a probabilidade de ocorrência da condição atual da vegetação que varia entre maior que zero a menor que um ($0 < SDVI < 1$). Zero é o estado inicial em que um valor de pixel IVDN é menor que todos os possíveis valores de IVDN para esse período, em outros anos, enquanto que um valor de 1 é o estado inicial em que o valor de pixel IVDN para o respectivo período como, uma semana, é maior que todos os valores de IVDN do mesmo período em outros anos (PETERS *et al.*, 2002). Valores baixos SDVI indicam má condição da vegetação que poderia ser um resultado da seca.

3.7 Índice de Precipitação Padronizada

McKee *et al.* (1993) desenvolveram o SPI, para quantificar o déficit de precipitação em várias escalas de tempo. O SPI é simplesmente uma transformação das séries temporais de precipitação em uma distribuição normal padronizada (Z-distribuição) (LLOYD-HUGHES *et al.*, 2002).

O SPI é baseado na variável precipitação pluvial e requer apenas o cálculo de dois parâmetros. Ao evitar a dependência de condições de umidade do solo, o SPI pode ser usado efetivamente no verão e no inverno. O SPI não é adversamente afetado pela topografia e sua escala de tempo é variável, o que lhe permite descrever as condições de seca importantes para uma gama de aplicações meteorológicas, agrícolas e hidrológicas. Esta versatilidade temporal é também útil para a análise das dinâmicas de seca, especialmente a determinação de início e término, que têm sido sempre difíceis de controlar com outros índices. Sua normalização garante que a frequência de eventos extremos em qualquer local e em qualquer escala de tempo sejam consistentes (LLOYD-HUGHES *et al.*, 2002).

O SPI é calculado pelo ajuste da função densidade de probabilidade para a distribuição de precipitação somada sobre a escala de tempo da frequência de interesse. Isto é realizado separadamente para cada mês (qualquer base temporal da série bruta do tempo de precipitação pluvial) e para cada localização no espaço. Cada função de densidade de probabilidade é,

transformada na distribuição normal padronizada (LLOYD-HUGHES et al., 2002).

As correspondentes probabilidades de ocorrência de cada severidade, estas naturalmente decorrentes da função densidade de probabilidade normal, encontram-se descritas na tabela 3.

Tabela 3. Classificação de secas do SPI e correspondentes eventos de probabilidade

SPI	Categoria	Probabilidade (%)
2,00 <	Extremamente úmido	2,3
1,50 – 1,99	Severamente úmido	4,4
1,00 – 1,49	Moderadamente úmido	9,2
0,00 – 0,99	Ligeiramente úmido	34,1
0,00 – - 0,99	Ligeiramente seco	34,1
- 1,00 – -1,49	Moderadamente seco	9,2
- 1,50 – -1,99	Severamente seco	4,4
- 2,00 >	Extremamente seco	2,3

Fonte: LLOYD-HUGHES et al., (2002)

3.8 Climate Hazard InfraRed Precipitation (CHIRP)

Desde 1999, o cientistas do United State Geological Survey (USGS) e do Climate Hazards Group (CHG), apoiados pelo financiamento da U.S. Agency for International Development (USAID), a National Aeronautics and Space Administration (NASA) e a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), vem desenvolvendo técnicas para a produção de mapas de chuva, especialmente onde os dados de superfície são escassos.

O CHIRP foi criado para entregar, de forma confiável, conjuntos de dados mais completos para uma série de objetivos de alerta precoce como análise de tendências e monitoramento da seca sazonal.

Em descrição Funk et al. (2014), mencionam que estimando variações de precipitação pluvial no espaço e no tempo é um aspecto importante de alerta precoce da seca e monitoramento ambiental. No entanto, estimativas calculadas a partir de dados de satélite que fornecem médias de áreas são consideradas inconsistentes devido aos complexos terrenos que muitas vezes subestimam a intensidade das precipitações em eventos extremos. Por outro lado, os dados de precipitação pluvial produzidos a partir de redes de estações são considerados inconsistentes em regiões rurais, onde há menos estações pluviométricas. O dado CHIRP foi criado em colaboração com cientistas do USGS e o centro Earth Resources Observation and Science (EROS).

3.9 Geotecnologias para processamento de dados

Integrated Land and Water Information System (ILWIS) é uma ferramenta para trabalhos com dados geográficos, que integra SIG e sensoriamento remoto, desenvolvido pelo Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). O ILWIS é um software de código aberto (binários e código-fonte), compreende um pacote completo de processamento de imagens, análise espacial e mapeamento digital. Nele é possível integrar o processamento de imagens raster e vetoriais, por meio de interface gráfica ou linha de comando (ILWIS, 2015).

O Quantum GIS (QGIS) é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU. O QGIS é um projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Opera em vários sistemas operacionais e suporta inúmeros formatos de vetores, rasters e bases de dados e funcionalidades (QGIS, 2015).

Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) é uma biblioteca que traduz dados geoespaciais (raster e vetores). Ela está licenciada como open source pela Open Source Geospatial Foundation. Essa biblioteca tem suporte para vários formatos de dados e opera em muitos softwares de geoprocessamento. Ele também vem com uma variedade de utilitários de linha de comando útil para tradução de dados e processamento (GDAL, 2015).

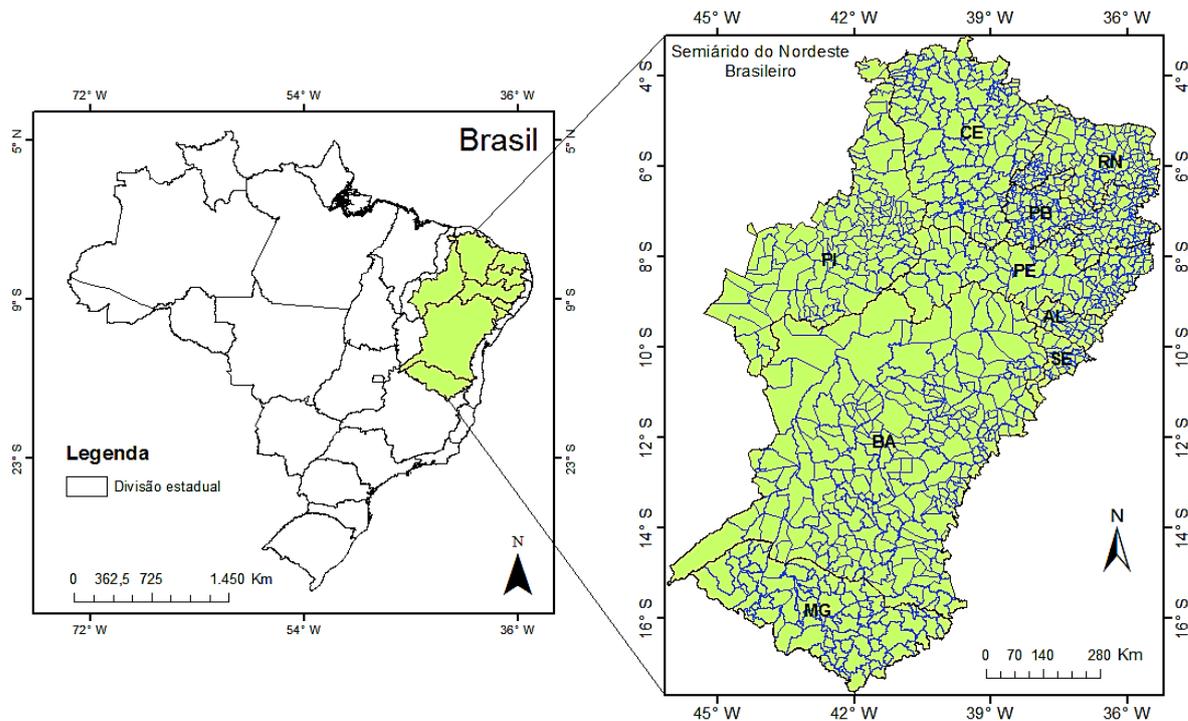
Por definição o R é um software de ambiente livre para computação estatística e gráfica. Ele compila e roda em uma ampla variedade de plataformas UNIX, Windows e Mac OS. Ele é um veículo para o desenvolvimento de novos métodos de análise de dados interativos, tendo sido desenvolvido rapidamente e prorrogado por uma grande coleção de pacotes (VENABLES, 2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na região do Semiárido do Nordeste brasileiro (Figura 6), seguindo a nova delimitação estabelecida pelo Ministério da Integração Nacional em março de 2005 (MI, 2005). A área está compreendida entre as coordenadas 3°S e 17°S e 35°W e 46°W, englobando os estados de Alagoas, Bahia, Sergipe, Pernambuco, Paraíba, Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte e Minas Gerais e municípios contidos em cada Estado. Os dados vetoriais da área foram obtidos pelo Instituto Nacional do Semiárido (INSA), com sistema de referência geográfica South American Datum de 1969 (SAD 69).

Figura 6. Localização do semiárido no espaço geográfico brasileiro



4.2 Aquisição dos dados de IVDN SPOT-S10 e precipitação pluvial

A tendência da vegetação, adotou Barbosa et al. (2015) que utilizou dados de IVDN do satélite SPOTVGT, com resolução espacial de 1 quilômetro, frequência temporal de 10 dias e período de abril de 1998 a março de 2012. Os dados foram fornecidos pela Flemish Institute for Technological Research (VITO).

Quanto aos dados de precipitação, foram obtidos na resolução espacial de 0,25° frequência temporal de 10 dias e período de abril de 1998 a março de 2012. Esses dados foram fornecidos pela European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).

Para análise interanual da dinâmica da vegetação, foram utilizados dados de IVDN do satélite SPOT/PROBA Vegetation, operado/administrado pela VITO, com resolução espacial de 1 quilômetro e frequência temporal de 10 dias. Os dados brutos foram adquiridos no formato HDF5, através do banco de dados do Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites (LAPIS). O período selecionado para a análise foi de 2007 a 2014.

Em seguinte foram utilizados dados de precipitação obtidos pelo Climate Harzards Group (CHG). O CHIRP é um conjunto de dados de precipitação quase mundial com mais de 30 anos. A área de cobertura abrange 50 graus norte e sul (e todas as longitudes), iniciando sua série temporal em 1981 até o presente, disponíveis em médias mensais. A resolução espacial dos dados é de 0,05 graus, equivalente a aproximadamente 5 quilômetros (CHG, 2015).

4.3 Aquisição dos dados do índice de risco de secas

O índice de risco de secas é um dado desenvolvido e disponibilizado pela Joint Resarch Centre (JRC). Para a o cálculo do Índice de severidade de seca meteorológica (MDSI) foram utilizados dados de totais mensais de precipitação completos de reanálises da versão 6.0 do Centro de Climatologia Global de Precipitação (GPCC), com resolução espacial de 0,5° e período de 1902 a 2010 (100 anos de dados).

4.4 Aquisição dos dados dos subíndices de propensão socioeconômica

Nesta pesquisa considerou-se os subíndices de propensão agropecuária (SIPap), econômica (SIPe) e social (SIPs). Para a criação dos SIPe e SIPs foram utilizados dados do IBGE, IPEA e PNUD, dos períodos censitários de 2000 e 2010. Para o SIPap foram utilizados os dados de censo agropecuário de 2006.

4.5 Análise da tendência da dinâmica da vegetação para o SAB no período de 1998 a 2002

Esta etapa baseou-se nos métodos de Barbosa et al. (2015) onde buscou tendências da vegetação associada à variabilidade da precipitação pluvial para a região do SAB, afim de analisar a dinâmica da vegetação e comparar com dados da pesquisa.

Com base nas análises estatísticas aplicadas ao Índice de Vegetação Diferença Padronizada (SDVI) e Índice de Precipitação Padronizada (SPI-1), ambos com composição de 10 dias, foram feitas estimativas em dois tipos: quantificação e análise da força das relações

espaciais e temporais entre o SDVI e SPI-1 conforme suas séries temporais; e a utilização da variabilidade do SDVI e SPI-1, a fim de identificar as tendências significativas da atividade da vegetação associada a variabilidade da precipitação.

A resolução espacial das séries temporais do IVDN (de 04/1998 a 03/2012) foi ajustada para manter uma coerência com as estimativas de precipitação, utilizando uma média ponderada. O procedimento permitiu que o IVDN e as séries temporais de precipitação pluvial obtivessem a resolução espacial de 0,25° (aproximadamente 28 km). Ambos os índices (SDVI/SPI-1) foram calculados para remover os efeitos da sazonalidade da série temporal original. Isso permite a comparação direta das chuvas (SPI-1) sob diferentes climas para as mudanças do desvio padrão do IVDN (SDVI) sob diferentes coberturas vegetais. Os procedimentos e formulações foram realizadas com base em Peters et al. (2002) e Guttman (1999).

O SDVI indica se existe uma relação direta entre as condições de vegetação e condições do tempo. Ele mostra os efeitos do clima sobre a vegetação em períodos curtos (PETERS et al., 2002). O SDVI é, portanto, a diferença em termos de desvio-padrão, da média para a situação que determinado período de 10 dias, para cada pixel, ou também chamado de z-score. O índice foi calculado pela equação:

$$SDVI_{y,p} = \frac{IVDN_{y,p} - \overline{IVDN_p}}{\sigma} \quad (4)$$

onde:

y = ano;

p = o período de 10 dias no ano.

O SPI-1_y é um indicador estatístico comparando a precipitação total recebida em um determinado local durante um período de tempo (p) com a distribuição de chuvas de longa duração para o mesmo período de tempo no local.

A relação entre IVDN e precipitação podem não ocorrer espacialmente invariante (ou seja, altamente diferenciadas no espaço). Também não podem ocorrer temporariamente invariante (isto é, altamente diferenciadas no tempo), em parte, devido às respostas espacial e temporalmente heterogêneas de tipos de cobertura do solo, as variações na precipitação. Para resolver este problema, diferentes defasagens de tempo (resposta após um atraso de 1-11 meses), foram utilizadas para avaliar se existe uma resposta atrasada à chuva no IVDN sobre a grade do SAB. Devido ao alto grau de variação espacial e temporal nos valores de precipitação, relacionamentos significativos, não seria esperado sobre áreas onde a precipitação é baixa e pouco frequente. No início da estação chuvosa, o verdejamento da

vegetação ocorre quase que simultaneamente com o início das chuvas. Após a estação chuvosa, o máximo em produtividade da vegetação é alcançado apenas 2-3 meses após o máximo de precipitação, especialmente para áreas de matagal e savanas (BARBOSA, 1998). No entanto, cabe mencionar que a resposta após um atraso de 7-11 meses não é de fácil interpretação, porque não se sabe que mecanismo realmente causou essa ligação. Pode ser justificada pelo fato de que a ocorrência de El Niño-Southern Oscilações (ENOS) eventos no final de um ano iria causar diminuição ou aumento da precipitação na estação chuvosa.

De modo a identificar se um pixel está verdejando seja positivo (regeneração, reflorestação) ou negativo (degradante, desertificação) pela tendência linear dos mínimos quadrados, foram realizadas análises das séries temporais do SDVI e SPI-1, tendo em conta a precipitação acumulada ao longo da respectiva melhor defasagem. Basicamente é a comparação da dinâmica de duas variáveis, que são ambas gravadas em uma única série. Somente tendências de SDVI e SPI-1, com os coeficientes de correlação de Pearson significativamente diferentes de zero ($p < 0,05$) foram consideradas como as tendências mais significativas (BURROWS et al., 1995). Seguindo as análises de tendência, uma abordagem de árvore de decisão é adotada a fim de interpretar os resultados (MAHESH et al., 2003). Foram estipuladas cinco perguntas: A série temporal de SDVI mostra uma tendência significativa?; as tendências são mais significativas em SDVI acoplados a correlações significativas entre IVDN e SPI-1?; as tendências significativas em SDVI ligados a tendências significativas na SPI-1?; o SDVI mostra uma tendência positiva?; tendências em SDVI correspondem às tendências da SPI-1?

4.6 Análise da dinâmica interanual da vegetação por meio dos dados do IVDN para o período de 2007 a 2014

Nesta etapa foi analisada a resposta interanual do IVDN em relação aos sinais de degradação ou verdejamento, a distribuição da precipitação e a relação dessas duas variáveis, de modo a analisar a dinâmica da vegetação em relação à variabilidade espaço-temporal da precipitação. A metodologia aplicada nesse tópico foi composta por três etapas: inicialmente, o processamento dos dados de IVDN e criação de mapas interanuais da vegetação do período de 2007 a 2014. Para isso foram utilizadas de técnicas de geoprocessamento. Em seguida, foram mostradas as técnicas de processamento dos dados de precipitação, a fim de gerar as informações de estatísticas de precipitação do período de 2007 a 2014. Posteriormente a demonstração da metodologia utilizada para correlacionar essas duas variáveis, no intuito de encontrar as suas respectivas relações.

4.6.1 Processamento dos dados IVDN

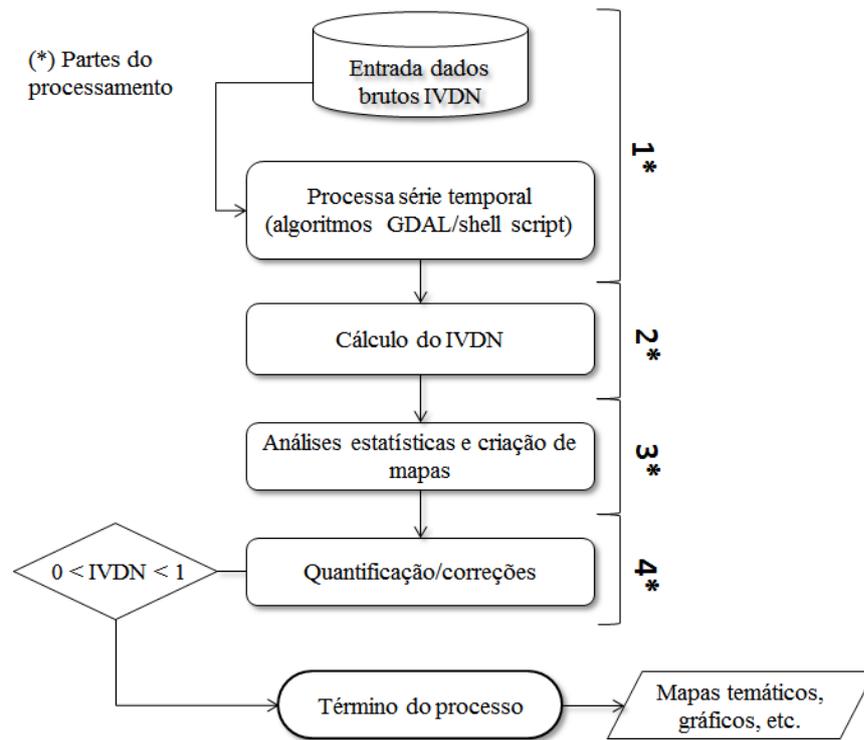
A representação metodológica do processamento dos dados de IVDN é apresentada no fluxograma (Figura 7). O pré-processamento (1*) se deu por operações de decodificação, tratamento e conversão dos dados brutos e foram utilizados algoritmos para processamento em lote, escritos na linguagem de programação shell script em junção com os comandos da biblioteca do GDAL. Esses algoritmos foram utilizados para o pré-processamento dos dados de IVDN, realizando operações de descompactação, decodificação dos dados brutos, mosaico, recorte da área de estudo e conversão do formato padrão (.hdf) para o formato nativo do ILWIS (.mpr). No ILWIS (2*) foi feita a conversão dos valores radiométricos em valores biofísicos, através do cálculo do fator de escala do IVDN. Os dados foram adquiridos em valores de tons de cinza, referentes ao número digital (ND) dos pixels que compõem a imagem e varia de 0 a 255. Através da equação 2 sugerida por Baret (2015), foi calculado o fator de escala do IVDN.

$$IVDN = \left(\frac{ND}{255} \right) - 0,08 \quad (5)$$

A partir da etapa (3*) foram gerados histogramas das imagens. Esse procedimento permitiu gerar a escala de valores de IVDN para, posteriormente, serem calculados os valores dos máximos anuais¹ e a média interanual para o período de estudo, na escala espaço-temporal. Posteriormente o processo de quanti-qualificação (4*) do produto final que eliminou os pixels de valores inválidos, como valores fora do intervalo padrão do IVDN [0-1], permitiu a exclusão dos corpos d'água contidos na imagem.

¹ O IVDN máximo foi calculado com base na técnica de Holben (1986), onde utilizou valores mensais do IVDN máximo para cada pixel dentro do período de composição, visando minimizar o efeito da atmosfera, o ângulo de varredura e a contaminação de nuvem. A técnica fornece uma melhor definição do IVDN e minimiza a influência de diferentes ângulos zenitais solares e topografia da superfície sobre o conjunto de dados.

Figura 7. Fluxograma metodológico do processamento do IVDN SPOT.



Com base nesses procedimentos foi possível transformar os valores em mapas temáticos, pela distribuição geográfica dos pixels, criando uma classificação para o IVDN. Partindo do princípio que a vegetação exerce uma dinâmica no tempo e no espaço, e que sua condição biofísica pode ser percebida ao longo dos anos pelo sinal do IVDN essa análise nos remete a identificar que áreas onde existem sinais de degradação estão definidas pelos valores mais baixos do IVDN, enquanto as áreas de verdejamento pelos valores mais altos.

4.6.2 Análise estatística dos dados de precipitação

Essa etapa foi baseada pela utilização do software estatístico R e QGIS para cálculo e criação dos mapas estatísticos anuais e interanuais de precipitação pluvial. Por meio dos dados globais mensais, foi definido o recorte para a região do SAB extraindo uma matriz de 32.381 pontos, através do somatório dos pontos pixel a pixel dos mapas mensais, foram obtidos os mapas de precipitação acumulada anual pela equação:

$$X_{acm} = \sum_{i=1}^n X_i \quad (6)$$

em que:

X_{acm} = precipitação anual acumulada

n = número de meses

i = número do mês

O mapa interanual médio de precipitação foi obtido mediante o cálculo da média aritmética da precipitação acumulada anual, pixel a pixel, de toda a série de dados que corresponde 1981 a 2014, numa variação espaço-temporal, conforme a equação:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (7)$$

em que:

\bar{X} = precipitação média interanual

n = número de anos

i = número do ano

Pelos acumulados anuais também foram calculados os mapas do desvio padrão e coeficiente de variação, onde o cálculo é representado pelas equações:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (8)$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (9)$$

onde:

\bar{X} = precipitação média interanual

σ = desvio padrão

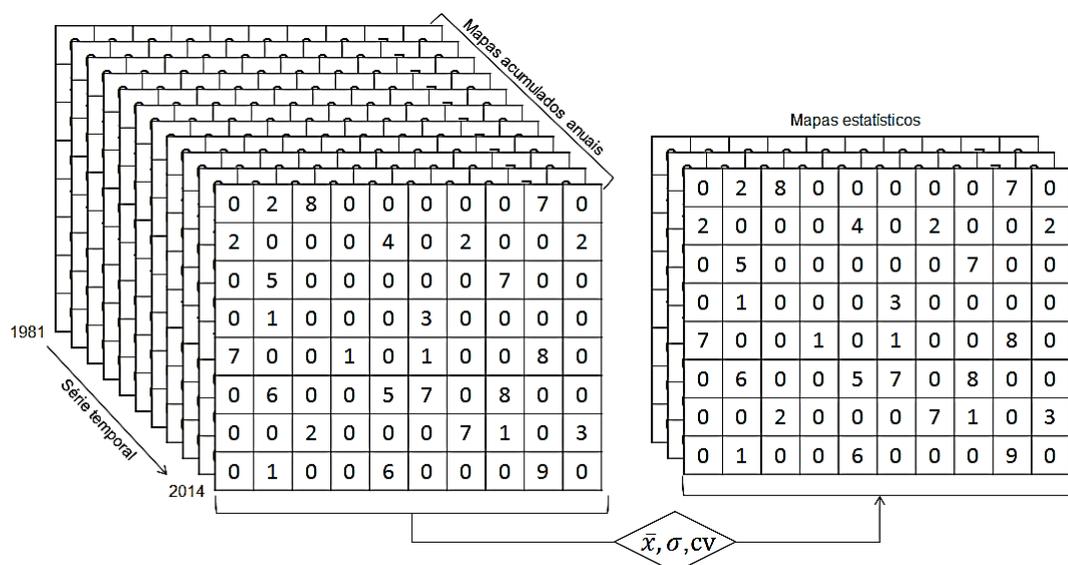
CV = coeficiente de variação

n = número de anos

i = número do ano

Na figura 8 é representado graficamente o processamento dos dados de precipitação baseando-se nas equações 6, 7, 8 e 9.

Figura 8. Representação gráfica da criação dos mapas estatísticos de precipitação pluvial.



4.6.3 Relação entre a variabilidade da precipitação pluvial com os dados de IVDN

Esta etapa visou relacionar a produção de biomassa da vegetação com a variabilidade da precipitação pluvial. A relação estatística entre o IVDN e precipitação pluvial foi feita através do cálculo da correlação de Pearson. Atribuiu-se como referência a resolução espacial de 1 quilômetro para os dados de precipitação pluvial, utilizando o método de interpolação bicubico, gerando uma matriz de 1.009.316 pontos. Para obter os valores interanuais foram utilizadas as matrizes dos acumulados anuais de precipitação e valores máximos anuais de IVDN, para o período de 2007 a 2014, representados pelas equações.

$$X_{acm} = \sum_{i=1}^n X_i \quad (10)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m X_j \quad (11)$$

onde:

X_{acm} = precipitação anual acumulada

\bar{X} = precipitação média interanual

n = número de meses

m = número de anos

i = número do mês

j = número do ano

$$Y_i = IVDN_{max} \quad (12)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (13)$$

onde:

Y_i = IVDN máximo anual

\bar{Y} = IVDN interanual médio

n = número de anos

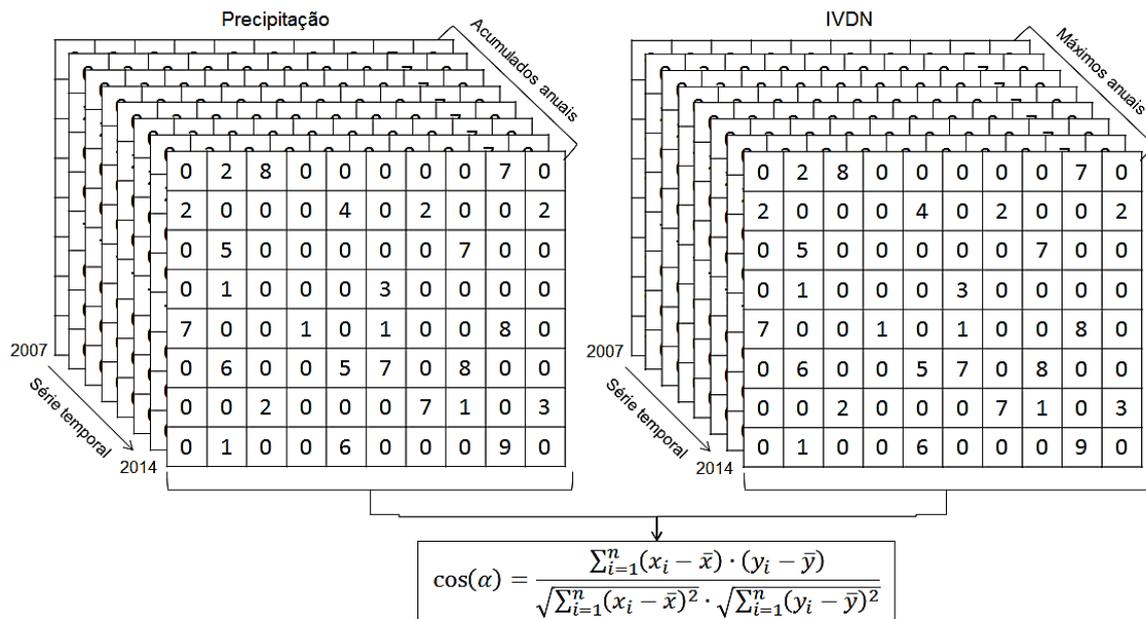
i = número do ano

A correlação foi calculada através da média interanual da precipitação pluvial (X), variável independente, e a média interanual do IVDN (Y) variável dependente, com os valores de 1.009.316 pontos de ambas variáveis, que corresponde a matriz da região do SAB. Os coeficientes de correlação foram obtidos para todos os pontos correlacionados de precipitação pluvial (X) e IVDN (Y) pela equação:

$$\cos(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (14)$$

Na figura 9 é representada graficamente a correlação de Pearson baseando-se nas equações 10, 11, 12, 13 e 14.

Figura 9. Representação gráfica da correlação entre o IVDN e precipitação pluvial



4.7 Análise do IVDN e precipitação pluvial com fatores biofísicos e socioeconômicos

Esse item foi composto por análises estatísticas que visaram identificar a relação entre os índices de condição biofísica e socioeconômica do SAB e as variáveis de IVDN e precipitação.

4.7.1 Índice de risco de secas

A metodologia de criação do produto visou à avaliação da severidade das secas históricas e o mapeamento da frequência de ocorrência delas. Para isso foi utilizado o MDSI, padronizado no espaço e no tempo, considerando os défices de precipitação mensal e a influência dos regimes de chuvas sazonal no computo da severidade da seca meteorológica (CARRAO et. al., 2015b).

A metodologia de processamento dos dados foi dividida em cinco etapas: Inicialmente foram calculados os quantis para 5, 10, 16, 20 e 50 anos para todos os meses da série; Em seguida foi calculado o limite total de precipitação abaixo da mediana histórica ($Prcthr_m$) para cada mês, no intervalo de 50 anos, no intuito de quantificar e padronizar a precipitação, utilizando o algoritmo de classificação de Fisher-Jenks; Foram criados mapas normalizados dos limites de seca para cada mês, variando de 0 a 1, onde os valores mais próximos de 0

indicam menor probabilidade de ocorrência de secas e vice-versa; O MSDI foi calculado pelo somatório da multiplicação entre a variação da precipitação mensal observada e a relação entre o limite de precipitação mensal e o somatório intra-anual da precipitação limite mensal, considerando o quantil de 50 anos para cada mês, conforme as equações:

$$MSDI = \sum_{m=3}^6 \Delta Prc_m \times W_m \quad (15)$$

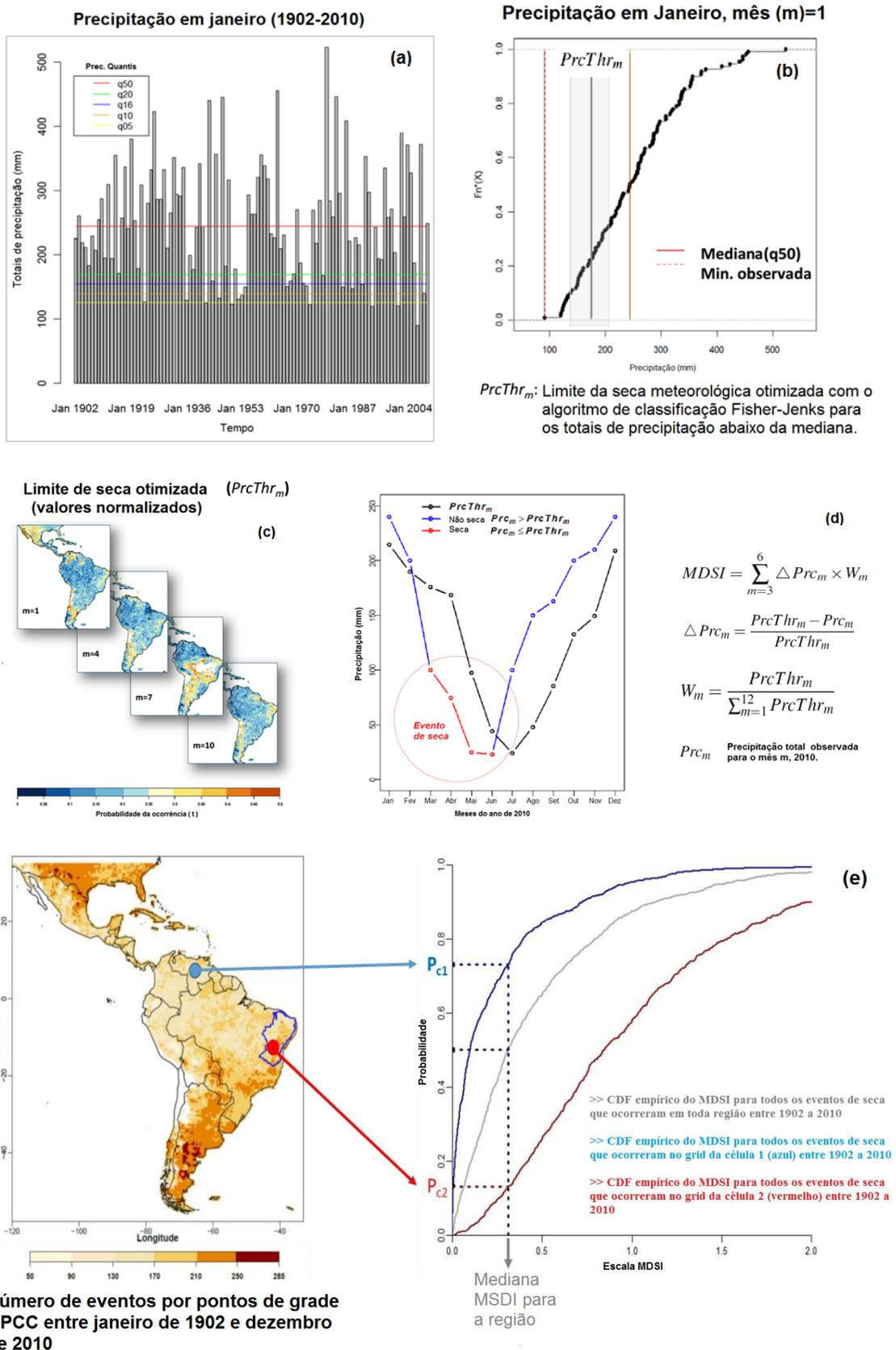
$$\Delta Prc_m = \frac{PrcThr_m - Prc_m}{PrcThr_m} \quad (16)$$

$$W_m = \frac{PrcThr_m}{\sum_{m=1}^{12} PrcThr_m} \quad (17)$$

Prc_m = Total de precipitação observada para o mês m de um ano Y da série.

Posteriormente foi elaborado o mapa do número de ocorrência de secas na variação espaço-temporal (Figura10).

Figura 10. Representação metodológica do cálculo do MDSI. Análise dos quantis da série observada (a), aplicação do algoritmo de classificação de Fisher-Jenks (b), análise espaço-temporal dos limites de seca otimizada mensal (c), cálculo do MDSI (d) e exemplo da probabilidade de eventos de secas (e).



$$MDSI = \sum_{m=3}^6 \Delta Prc_m \times W_m$$

$$\Delta Prc_m = \frac{PrcThr_m - Prc_m}{PrcThr_m}$$

$$W_m = \frac{PrcThr_m}{\sum_{m=1}^{12} PrcThr_m}$$

Prc_m Precipitação total observada para o mês m, 2010.

(e)

Probabilidade

Escala MDSI

Mediana MDSI para a região

>> CDF empírico do MDSI para todos os eventos de seca que ocorreram em toda região entre 1902 a 2010

>> CDF empírico do MDSI para todos os eventos de seca que ocorreram no grid da célula 1 (azul) entre 1902 a 2010

>> CDF empírico do MDSI para todos os eventos de seca que ocorreram no grid da célula 2 (vermelho) entre 1902 a 2010

Após esse processamento foi criado o mapa do índice de risco de seca que pode ser interpretado por: o risco de seca aumenta se a quantidade de ocorrências de secas excede a mediana de severidade histórica.

4.7.2 Índices de propensão social, econômica e agropecuária

Os índices de propensão social, econômica e agropecuária foram avaliados com base na metodologia do INSA (2014), para avaliar o grau de vulnerabilidade das três dimensões ao fenômeno da desertificação. Essas três dimensões compuseram um grupo de cinco subíndices para levantar informações sobre a situação da cobertura vegetal, degradação ambiental, produção agropecuária, situação econômica e indicadores de ordem social. Cada subíndice foi classificado de acordo com o grau de susceptibilidade. Os atributos foram categorizados nos níveis (1, 2 e 3) indicando baixa, média e alta susceptibilidade, respectivamente.

As informações foram apresentadas a nível municipal, e as expressões lógicas abrangeram a mesorregião, na qual o município faz parte, como base de cálculo do subíndice. Foram selecionadas 35 mesorregiões do Semiárido e para serem comparadas com aspectos homogêneos. Para o cálculo dos subíndices foram aplicados três critérios: cada mesorregião precisava ter no mínimo cinco municípios pertencentes ao polígono do SAB; Mesorregiões que tinham mais de cinco municípios no SAB, estes foram comparados entre si, desconsiderando os municípios fora do limite do SAB; as mesorregiões com menos de cinco municípios pertencente ao SAB, agregaram-se a mesorregiões do SAB mais próxima geograficamente, levando em consideração a definição de mesorregião.

Os subíndices (SIPe, SIPs, SIPap) seguiram uma classificação lógica através de uma equação distinta cada um. Essas equações levaram em consideração indicadores sociais e econômicos para a obtenção dos resultados (INSA, 2014).

Para o SIPe, subíndice de propensão da condição econômica, o indicador principal foi a renda *per capita*. Com este subíndice calculou-se a pobreza rural e municipal, segundo o autor. Por isso a renda per capita foi um indicador mais direto para o SPe, por ela ser composta de todo recurso financeiro (atividade, por auxílio governamental, pensão, dentre outros) de uma população.

Outras fontes também poderiam influenciar na renda per capita e causar um impacto ambiental se, por exemplo, a renda estivesse acima da média regional por elevado grau de atividades agropecuárias ou de extrativismo do município ou até mesmo vindo de outras

diversas fontes de renda. Para incluir as variáveis de atividade agropecuária e extrativismo, foi utilizado o PIB agropecuário municipal. Conforme a equação:

$$\text{SE } 70\%RPC_r < RPC_m < RPC_r \text{ E } PPIB_a > PPIB_{ar}, \text{SIPe} = 2 \quad (18)$$

$$\text{SE } RPC_m < 70\%RPC_r \text{ E } PPIB_{am} > PPIB_{ar}, \text{SIPe} = 3 \quad (19)$$

em que:

RPC_m = Renda per capita municipal (IPEA, 1999 e 2000);

RPC_r = Renda *per capita* regional, expressa por:

$$RPC_r = \frac{\sum(RPC_m \times Pop_m)}{\sum Pop_m} \quad (20)$$

onde:

Pop_m = População do município (IBGE, 2000 e 2010);

$PPIB_{am}$ = participação do PIB agropecuário e extrativista do município no PIB municipal, expressa por:

$$PPIB_{am} = \frac{PIB_{am}}{PIB_m} \times 100 \quad (21)$$

Onde:

PIB_{am} = Produto interno bruto agropecuário municipal (IPEA, 2000 e 2010);

PIB_m = Produto interno bruto municipal (IPEA, 2000 e 2010);

$PPIB_{ar}$ = Participação do PIB agropecuário e extrativista da região no PIB regional, expressa pela equação:

$$PPIB_{ar} = \frac{\sum PIB_{am}}{\sum PIB_m} \times 100 \quad (22)$$

O SIPs, subíndice de propensão da condição social da população, foi calculado a partir da comparação do IDH municipal (IDH_m) com o IDH regional, observando a proporção da população rural em relação ao total e a densidade demográfica rural, municipal e regional. De acordo com INSA (2014), o IDH apresentou os principais aspectos sociais que tornam o município parcialmente susceptível à deterioração que conduziu o ciclo de desertificação. Desse modo a dimensão da propensão decorrente da condição social da população foi determinada mediante a equação:

$$\text{SE } IDH_m < IDH_r \text{ E } Pop_{rm} > 40\%Pop_m, \text{SIPs} = 2 \quad (23)$$

$$\text{SE } IDH_m < IDH_r \text{ E } Pop_{rm} > 40\%Pop_m \text{ E } DPop_{rm} > DPop_{rr}, \text{SIPs} = 3 \quad (24)$$

Onde:

IDH_m = Índice de Desenvolvimento Humano municipal (PNUD, 2000 e 2010).

IDH_r = Índice de Desenvolvimento Humano regional, expresso por:

$$IDH_r = \frac{\sum(IDH_m \times Pop_m)}{\sum Pop_m} \quad (25)$$

em que:

Pop_{rm} = População rural do município (IBGE, 2000 e 2010).

DPop_{rm} = Densidade de população rural municipal, expressa por:

$$DPop_{rm} = \frac{Pop_{rm}}{A_m} \quad (26)$$

Onde:

A_m = Área do município em km²(IBGE, 2010)

DPop_{rr} = Densidade de população rural regional, expressa por:

$$DPop_{rr} = \frac{\sum Pop_{rm}}{\sum A_m} \quad (27)$$

No SIPap, subíndice de propensão da condição da produção agropecuária, o cálculo foi realizado com base nas informações de produtividade das principais culturas, da proporção de áreas cultivadas, densidade de rebanhos por área, densidade de pessoas ocupadas na agricultura por área, com dados do censo agropecuário de 2006 (IBGE, 2006), por meio da equação:

$$\mathbf{SE} \text{ } PPP_m < PPP_r \text{ E } PAC_m > PAC_r \text{ E } DR_m > DR_r \text{ E } DPO_m > DPO_r, \text{ SIPpa} = 3 \quad (28)$$

$$\mathbf{SE} (PPP_m < PPP_r \text{ E } PPP_m > 70\% PPP_p) \text{ OU } PAC_m > PAC_r \text{ OU } DR_m > DR_r \text{ OU } DPO_m > DPO_r, \text{ SIPpa} = 2 \quad (29)$$

Onde:

PPP_m = Produtividade, expressa pela relação entre a produção, em toneladas. De acordo com o Censo agropecuário do IBGE (2006), o feijão (todas as variedades) e o milho representa 79,3% da produção da lavoura temporária no SAB, excetuando-se do cálculo a produção forrageira e de sementes.

em que:

Produção nacional de feijão e milho = 44.755.810t (IBGE, 2006);

Área colhida nacional de feijão e milho = 16.285.585 ha (IBGE, 2006);

$$PPP_m = \frac{\sum(\text{Produção de feijão e milho})}{\sum(\text{Área colhida de feijão e milho})} \quad (30)$$

PPP_r = Produtividade na região dos principais produtos municipais, nas mesmas condições de

PPP_m = Expressa pela equação anterior, tomada para todos os municípios da região:

$$PPP_r = \frac{\sum(\text{Produção regional de feijão e milho})}{\sum(\text{Área colhida regional de feijão e milho})} \quad (31)$$

PPP_p = Produtividade no país dos principais produtos municipais, nas mesmas condições de

PPP_m = expressa pela equação anterior, tomada para todos os municípios do país:

$$PPP_p = \frac{\Sigma(\text{Produção nacional de feijão e milho})}{\Sigma(\text{Área colhida nacional de feijão e milho})} = 2,7482 \quad (32)$$

PAC_m – Proporção de área cultivada do município, expressa pela relação entre a área:

$$PAC_m = \frac{\Sigma(\text{Área colhida de feijão e milho do município})}{\Sigma(\text{Área do município})} \quad (33)$$

PAC_r – Proporção de área cultivada na região, expressa por:

$$PAC_r = \frac{\Sigma(\text{Área colhida de feijão e milho da mesorregião})}{\Sigma(\text{Área da mesorregião})} \quad (34)$$

DR_m = Densidade de rebanhos no município. Levou-se em consideração que no SAB uma quantidade expressiva de animais corresponde aos bovinos, caprinos e ovinos, os números correspondentes a estes, em cabeças, foram contabilizados para compor a variável. A área de uso para o rebanho foi calculada mediante a soma da variável referente à área de pastagens (naturais, plantadas degradadas e plantadas em boas condições), pois não se encontram informações que se apliquem para o ano de 2006, por município referente à área exclusiva de pecuária. A DR_m foi calculado de acordo:

$$DR_m = \frac{\Sigma \text{Número de cabeças de rebanho do município caprino, bovino e ovino}}{\Sigma \text{Área de pastagens naturais, plantadas degradadas e plantadas em boas condições do município}} \quad (35)$$

Onde:

O somatório do número de cabeças de caprinos, bovinos e ovinos do município e o somatório do da área de pastagens naturais, plantadas degradadas e plantadas em boas condições do município foram obtidos do IBGE (2006). A DR_r (Densidade de rebanhos) por área na região, foi calculado pela equação:

$$DR_r = \frac{\Sigma \text{Número de cabeças de rebanho do município caprino, bovino e ovino da mesorregião}}{\Sigma \text{Área de pastagens naturais, plantadas degradadas e plantadas em boas condições da mesorregião}} \quad (36)$$

em que:

DR_r = Densidade de rebanhos por área na região.

A densidade de pessoas ocupadas na agropecuária no município (DPO_m) foi obtida mediante a equação:

$$DPO_m = \frac{\text{Pessoal ocupado em estabelecimentos agropecuário do município}}{\text{Área dos estabelecimentos agropecuários do município}} \quad (37)$$

Para esta variável, o IBGE (2006), considerou pessoal ocupado em estabelecimentos agropecuários. Assim, a variável referente à área, visando manter a coerência para a expressão lógica, também considerou a área destes estabelecimentos agropecuários.

A densidade de pessoas ocupadas na agropecuária na região (DPO_r), foi expressa por:

$$DPO_r = \frac{\text{Pessoal ocupado em estabelecimentos agropecuário mesorregião}}{\text{Área dos estabelecimentos agropecuários da mesorregião}} \quad (38)$$

4.7.3 Análises estatísticas entre os índices, IVDN e precipitação

A análise da tendência da dinâmica da vegetação e variabilidade da precipitação foi o ponto focal desse item, buscando-se correlacionar as variáveis (precipitação, IVDN, índice de risco de secas e subíndices socioeconômico), fazendo associação com o número de municípios e os níveis de propensão socioeconômica (1, 2 e 3).

Para padronizar os valores das variáveis para todos os municípios do SAB e eliminar as diferenças da resolução espacial, em cada polígono municipal foram extraídos a aritmética dos pontos de cada variável no formato matricial (precipitação, IVDN e índice de risco de secas). Assim, para cada município foi considerado um valor médio para cada variável. No Obteve um total de 1.135 pontos referentes a cada município do SAB. No caso dos SIPE, SIPs e SIPap não foi necessário realizar essa operação pelo fato dos valores já estarem no formato adequado as futuras operações. Esse procedimento permitiu criar tabelas com valores médios para cada variável e em seguida proceder com as análises estatísticas.

Nas análises estatísticas foram utilizados diagramas de dispersão, com intuito de analisar quantitativamente a relação entre variáveis. Também foi calculado o coeficiente de correlação linear para verificar qual o grau de relação entre elas. Bem como traçado a reta de regressão linear, para verificação do grau de associação linear.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

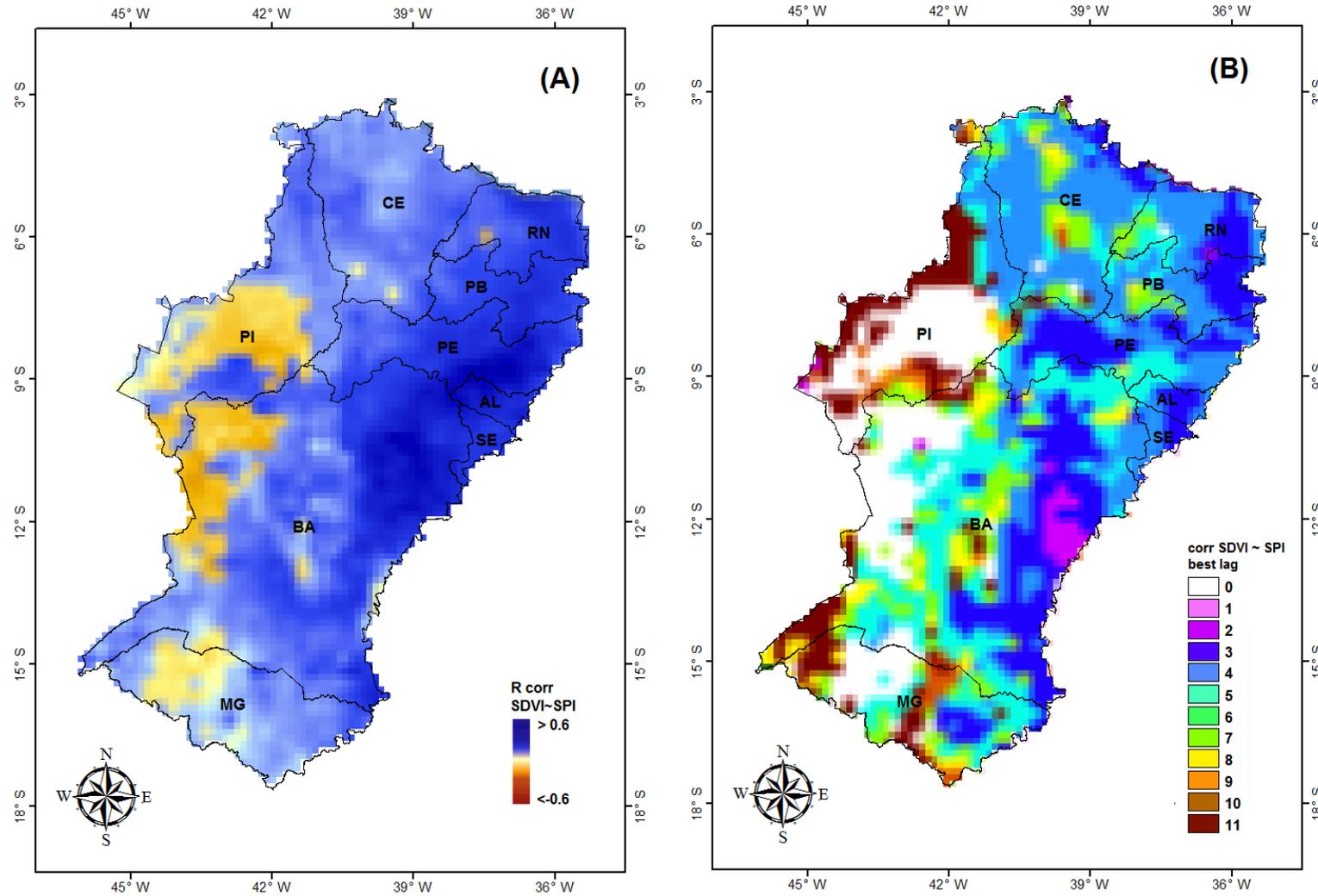
5.1 Análise da tendência da dinâmica da vegetação para o SAB no período de 1998 a 2002

Com base nas análises realizadas nesta pesquisa constatou-se que houve uma correlação distinta entre o SDVI e SPI-1. A correlação positiva (azul) aparece em quase toda a área do SAB, apresentando valores mais altos nas regiões leste e nordeste e valores mais fracos nas demais áreas. No geral, para essas áreas, as melhores defasagens ocorreram em 3-6 meses. Observou-se que a produção de biomassa foi determinada pela quantidade de chuva, havendo relações positivas entre a vegetação e precipitação nas terras secas do SAB (Figura 11A).

No oeste da Bahia, Minas Gerais e Piauí constatou-se que algumas áreas demonstraram haver uma correlação fraca negativa. Essas áreas estão localizadas no bioma Cerrado, e é caracterizado por uma cobertura de solo com interferência antrópica. Assim, os resultados possivelmente estão relacionados a áreas de vegetação cultivada, ou seja, a pastagem e convertida para produção agrícola (Figura 11A).

De acordo com Barbosa et al. (2015), ainda existem limitações e incertezas no entendimento da dinâmica da vegetação em relação à precipitação, devido à falta de compreensão da interação dos mecanismos de precipitação e ecossistemas no espaço e no tempo, onde é normal existir efeitos de defasagem temporais heterogêneos.

Figura 11. Comparação da correlação ponto campos entre SDVI mensal e valores SPI-1 mensais sobre o SAB para o período 1998-2012. Coeficientes de regressão (coeficientes beta) entre SDVI e SPI-1 maior ou menor que 0,6 (um). Os coeficientes de correlação de Pearson (A) entre SDVI e SPI-1 desfasado de um atraso de 0-11 meses (B)

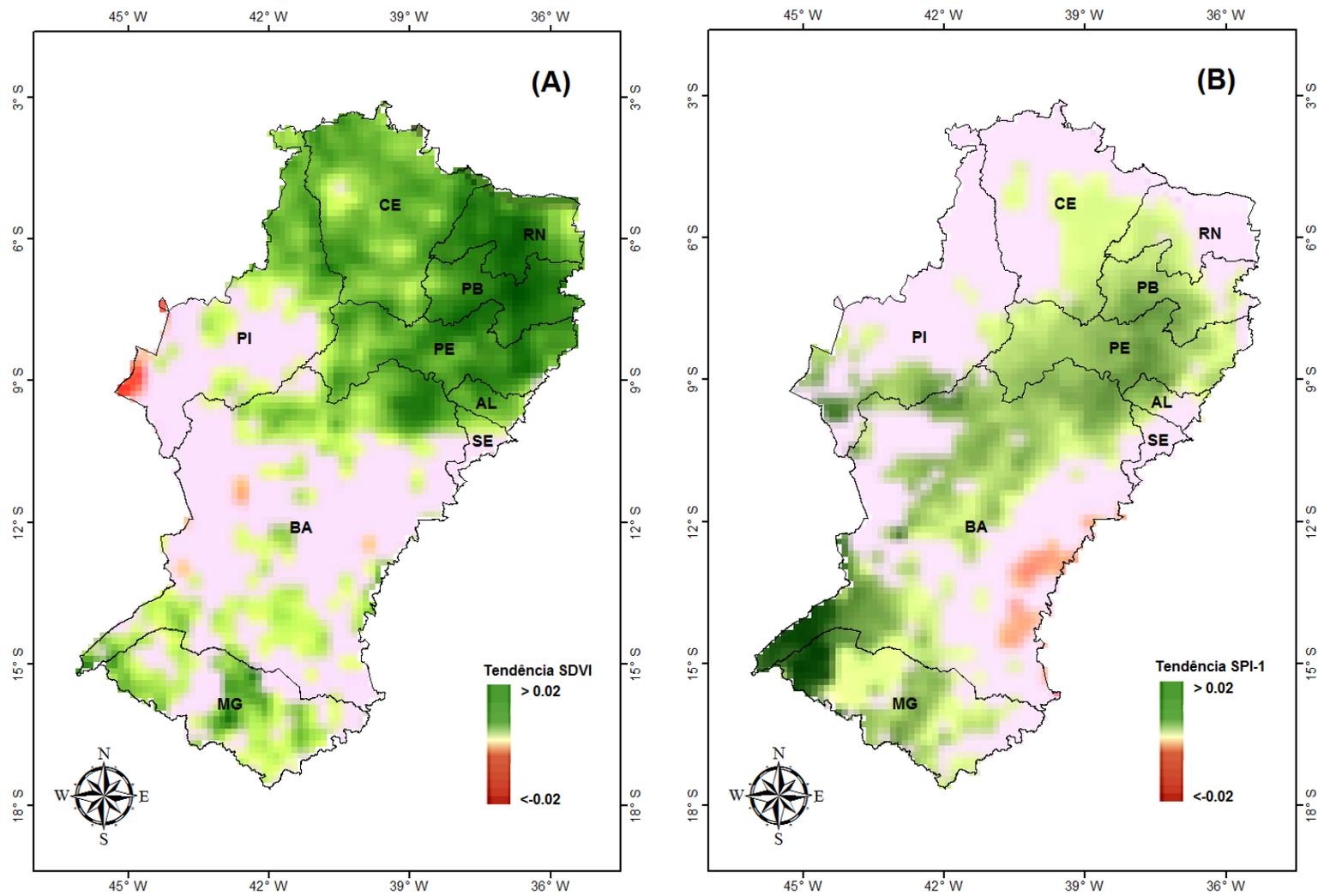


Constatou-se ainda que as respostas dos ecossistemas em relação à mudança da precipitação dentro do período estudado podem ocorrer em diferentes intervalos de tempo e ser heterogêneas espacialmente. Como já observado anteriormente, as áreas com defasagem zero (resposta direta), geralmente são associadas com valores de correlação negativa. Do contrário, os valores de correlação positiva são ligados a defasagens de 1-11 meses, conforme áreas apresentadas nas cores laranja (Figura 11A) e branco (Figura 11B). Barbosa et al. (2015), sugerem que essas áreas sejam identificadas como degradação do solo induzida por interferência antrópica, de que a resposta do IVDN pode variar por alteração do uso do solo. Com base nos dados do MMA (2002), no SAB a influência antrópica atinge cerca de 45,6% da área total de toda cobertura vegetal, isso pode ocasionar diferentes efeitos no IVDN dependendo do bioma e tipo de cultura. O desmatamento de florestas para fins agrícolas ou pastagens, reduzem o IVDN, a ação contrária induziria no aumento do IVDN. O azul escuro (Figura 11A), magenta, roxo, azul claro, ciano e verde (Figura 11B), sugeriram que o sinal de mudanças das chuvas, altera a dinâmica da vegetação em terras secas, podendo atingir o máximo verdejamento em 2-3 meses após a máxima precipitação. O verde da vegetação é afetado com as alterações no ciclo de chuvas. Nas áreas com defasagem máxima (marrom 11 meses) e mínima (verde 7 meses), pode ser explicada hipoteticamente com o sinal de El-niño Oscilação Sul (ENOS) que marca a mudança nos padrões normais da precipitação no período chuvoso. Esses sinais estão sujeitos a problemas nas correlações, devido ao longo período de ocorrência do fenômeno, causando restrição no crescimento da vegetação por restrição da ocorrência da precipitação, implicando na redução da confiança estatística.

Na figura 12 a escala de cores mostra os valores das encostas maior (positivo) ou menor (negativo) que 0,02. Tendências não significativas foram mascaradas em cinza. Inclinação da tendência linear foi calculada por mínimos quadrados ordinários

Registrou-se a tendência da inclinação do SDVI e SPI-1 para o SAB (Figura 12). O SDVI mostrou uma tendência positiva e significativa ao norte do SAB, indicando áreas de verdejamento, enquanto no sudoeste do Piauí mostrou uma tendência negativa também significativa. Na região central do SAB a tendência se mostra nula, maior parte nos Estados de Bahia, Piauí, Minas Gerais e Sergipe. Analisando a tendência positiva do SDVI, é possível sugerir que as áreas em verdejamento podem está relacionadas a uma contribuição de uma vegetação nativa, já essa região tem uma predominância da vegetação do tipo savana estépica, típicas do bioma Caatinga. O declínio do SDVI e sudoeste do Piauí é um indicador de degradação, em contrapartida a resposta nula indica que não houve variação da vegetação durante o período analisado.

Figura 12. Comparação dos campos de tendência de inclinação SDVI (A) e SPI-1 (B) À diferença do SAB para o período 1998-2012.



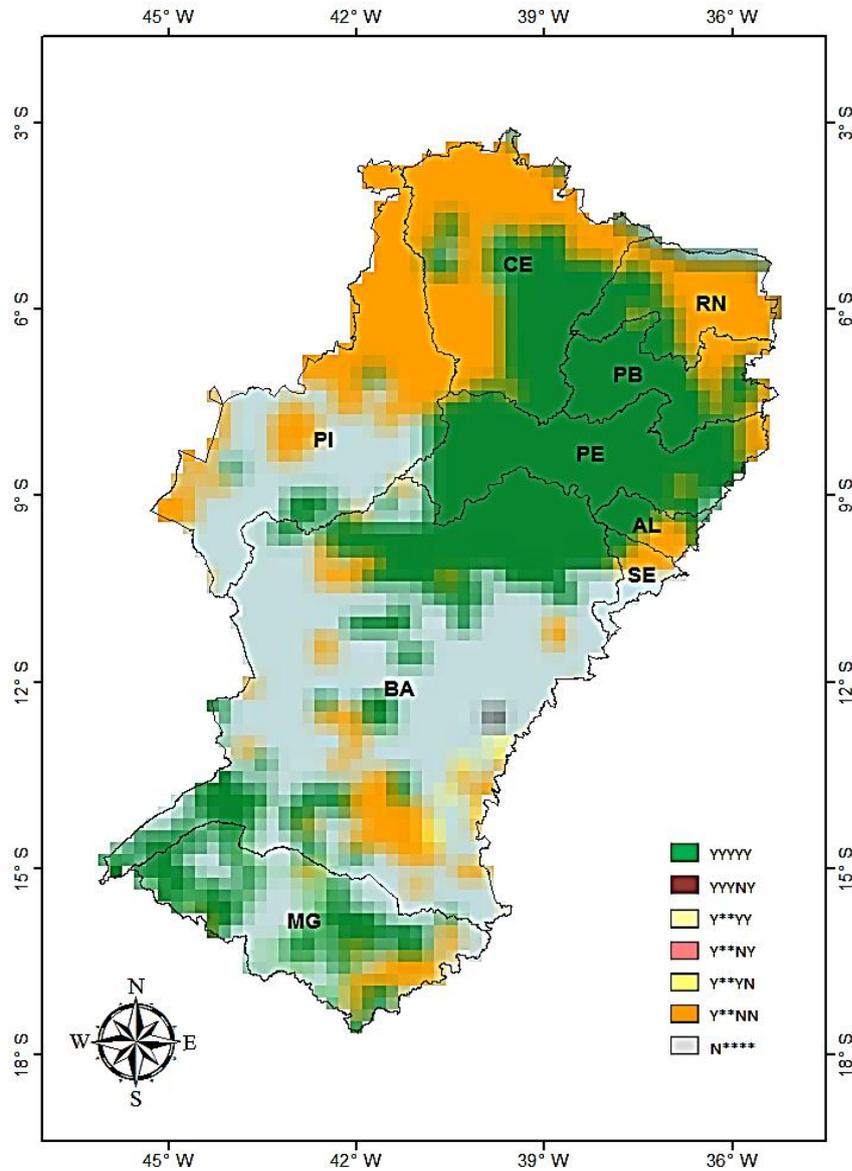
Na figura 12B o SPI-1 mostrou somente uma leve tendência negativa no sudeste da Bahia. A tendência positiva esteve presente em todos os Estados. Porém os valores mais significativos correspondentes aos Estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Paraíba, indicando que nessas regiões com tendência positiva significativa existe menor déficit de precipitação.

Em comparação das tendências do SDVI (Figura 12A) e SPI-1 (Figura 12B), nota-se que mesmo com áreas tendências nulas no SPI-1 as tendências no SDVI continuam positivas em alguns estados como, por exemplo, Parte do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Alagoas. O inverso acontece em algumas áreas da Bahia e Minas Gerais.

Foi feita a identificação da área de foco, ou seja, pixels, a sazonalidade do índice de vegetação (SDVI) mostra uma tendência linear significativa ao longo do tempo. Também foram identificadas as áreas que diferem na sua relação entre as tendências de vegetação e precipitação, e em seguida distinguem-se tendências positivas e negativas que estão ligadas a tendências na precipitação. Além disso, é possível identificar regiões onde as tendências positivas ou negativas na vegetação não estão ligadas a mudanças na precipitação e outras variáveis climáticas ou onde o impacto humano desempenha um papel significativo.

Na figura 13 os pixels são divididos em verdejamento ou degradantes, em que as tendências de ambos SDVI e SPI-1 são avaliadas. A distribuição da análise de tendência, seguindo a árvore de decisão, é apresentada as classes em verde indicando uma tendência positiva significativa no SDVI acoplado a um aumento do SPI-1. As Classes vermelhas indicam um acoplamento entre uma diminuição de SDVI e SPI-1. As classes em amarelo e laranja indicam onde o SDVI e SPI-1 mostram tendências opostas. Como também as classes em cinza que indicam pixels mascarados sem uma tendência significativa em SDVI. Os pixels foram classificados de acordo com as cinco consultas descritas no presente estudo. As áreas foram objetivamente classificadas de acordo com as classes de gama onde o Y e N se referem a "sim" ou "não" resposta para a consulta, e (*) para qualquer Y ou N. Áreas em verde mostram um aumento na SDVI, acoplado a uma tendência positiva significativa na SPI-1 (verde escuro) ou não (verde claro). Áreas em vermelho mostram uma diminuição no SDVI, acoplado a uma tendência negativa significativa no SPI-1 (vermelho escuro) ou não (vermelho claro). Áreas em amarelo mostram uma tendência positiva no SDVI, mas uma tendência negativa em SPI-1. Áreas em laranja mostram uma tendência negativa no SDVI, mas uma tendência positiva no SPI-1. Pixels sem uma tendência significativa em SDVI são mascarados em cinza. A barra de cores mostram as respectivas respostas das cinco consultas entre as classes de alcance.

Figura 13. Distribuição geográfica da abordagem de árvore de decisão sobre o SAB para o período 1998-2012.

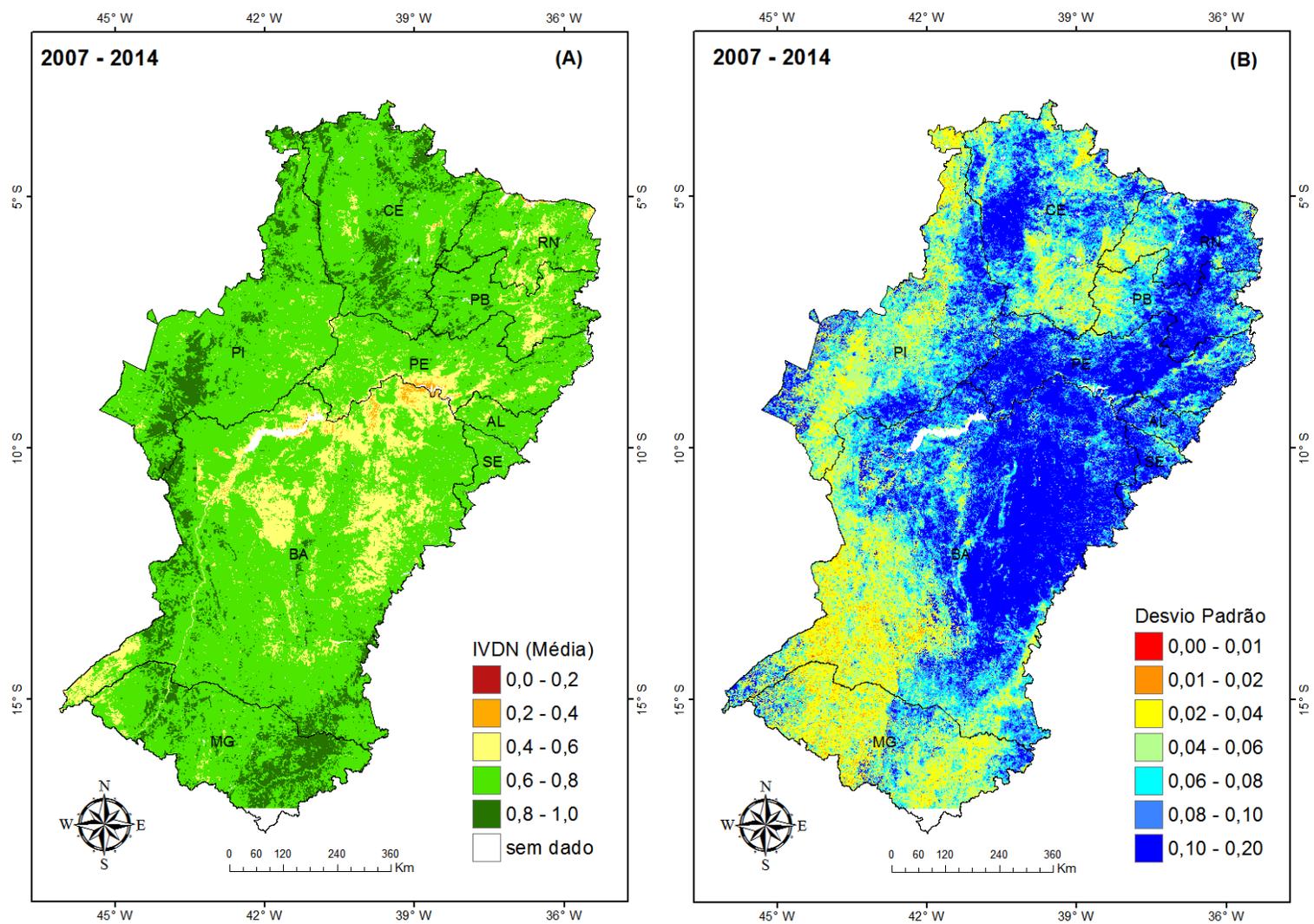


Em análise, os dados mostraram uma área de verdejamento na região que abrange os estados de Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Bahia. No entanto outras áreas observadas mostraram um declínio na vegetação, enquanto a precipitação aumentou (áreas em laranja) nas áreas localizadas no entorno dos sinais de verdejamento, como também em áreas isoladas do SAB. Estendendo da região central ao sul do SAB (em cinza) a resposta da tendência não foi significativa. Portanto os resultados analisados indicam que as áreas com tendência a verdejamento podem está associadas a um aumento de precipitação, favorecendo o aumento da biomassa. Ao contrário disso, áreas com tendência de declínio da vegetação, podem está relacionadas à degradação.

5.2 Análise da dinâmica interanual da vegetação por meio dos dados do IVDN para o período de 2007 a 2014

Analisando a média interanual do IVDN, nota-se que nos Estados de Bahia, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Ceará há áreas com sinais de perda da biomassa. Os casos mais graves são vistos nos dois primeiros locais, onde a resposta do IVDN é muito baixa com valores variando de 0,2 a 0,4 (Figura 14A). As áreas encontradas em Pernambuco estão localizadas dentro do polígono do núcleo de desertificação de Cabrobó que pelas características biofísicas podem está influenciando na resposta da vegetação. Por outro lado, é notado que em algumas áreas também existem sinais de aumento da biomassa, como é o caso dos Estados de Minas Gerais, Bahia, Piauí e Ceará. A resposta da vegetação nessas áreas, de aumento da biomassa, pode está sendo influenciada por características típicas dos biomas onde elas estão localizadas, e/ou por outros fatores, como regime de precipitação. No mapa de desvio padrão observa-se uma alta variabilidade da vegetação com valores altos que se estende desde a região central ao norte do SAB, indicando uma maior variabilidade da resposta da vegetação, por outro lado observa-se nas periferias das regiões sul, oeste e parte da região norte baixos valores do desvio que indica menor variabilidade da resposta da vegetação, que está ligada com a influência de outros biomas e eventos meteorológicos típicos da região (Figura 14B).

Figura 14. Produto da média interanual do IVDN (A) e o desvio padrão (B) para o período de 2007 a 2014.



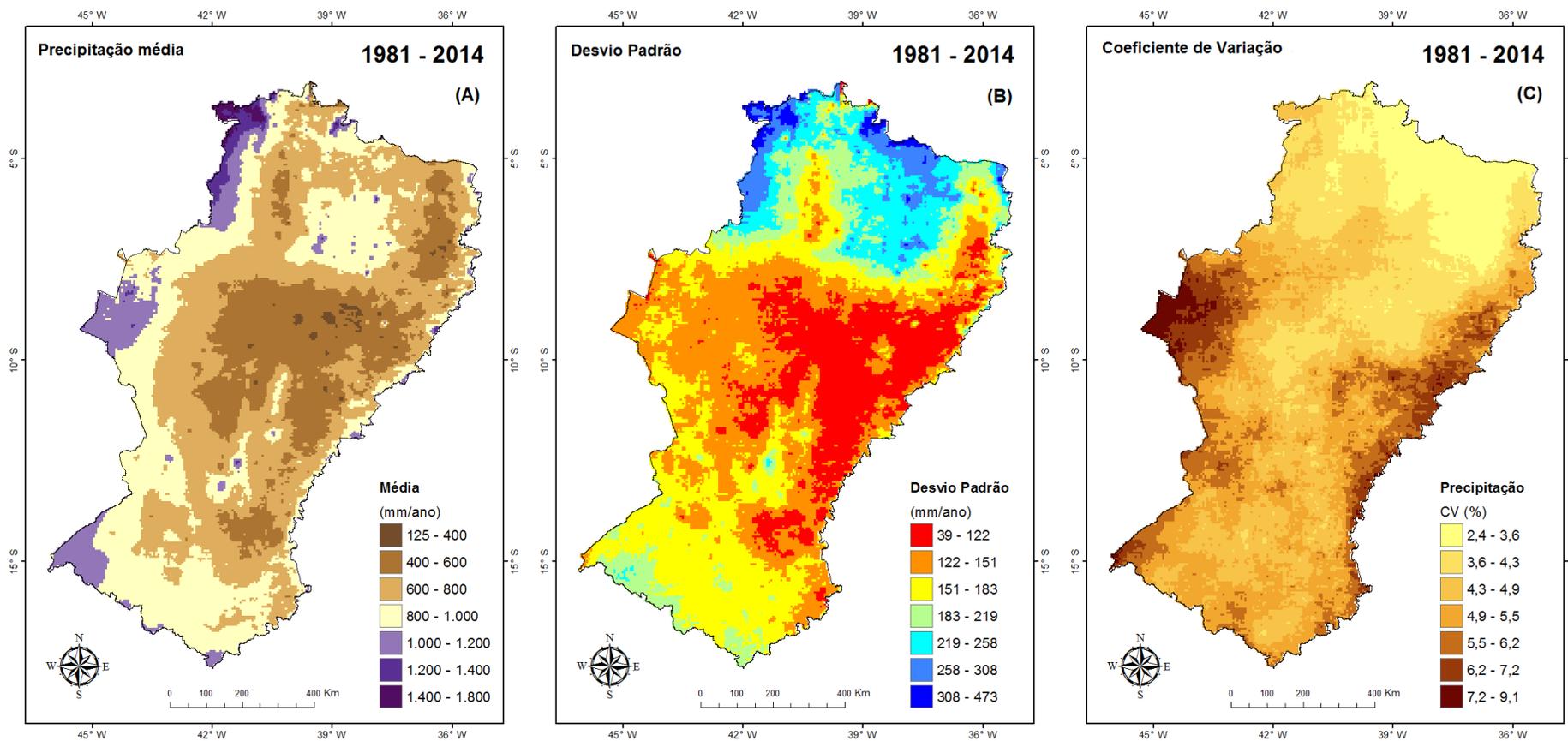
5.3 Relação entre a variabilidade da precipitação pluvial com os dados de IVDN

Analisando-se a precipitação pluvial no intervalo (1981-2014) e reduzindo a resolução espacial do pixel para $0,05^\circ$, avalia-se o comportamento espaço-temporal da variável ao longo do período, utilizando a média interanual (Figura 15A) e desvio padrão e coeficiente de variação, para verificar a variabilidade quali-quantitativa (Figuras 15B e 15C).

A precipitação interanual média mostrou uma variação espaço temporal de 125 a 1.000 mm/ano para uma extensa área do SAB e em algumas outras áreas isoladas uma variação de 1.000 a 1.800 mm/ano. Segundo Molion (2002), a variabilidade interanual das chuvas no Nordeste brasileiro (NEB) na escala espaço-temporal está intimamente relacionada a fatores climáticos como, El-Niño Oscilação Sul, que influencia diretamente no ramo descendente da circulação geral da atmosfera, deslocando os ventos do ramo descendente da célula de Walker para cima do NEB, causando inibição das nuvens que provocam chuva na região. Desse modo, os baixos índices pluviométricos (Figura 15A) estão relacionados à influência de fatores climáticos, que em alguns locais do mapa essas evidências foram mais fortes, como na região central do SAB que não são influenciados por outros sistemas atmosféricos como no norte e sul do SAB.

Quanto ao desvio padrão, observam-se baixos valores na região central do SAB indicando pouca variabilidade da ocorrência de chuvas na região, por outro lado em sentido às extremidades norte e sul esses valores aumentaram, mesmo que em menor proporção ao sul. A (Figura 15B) maior variabilidade da precipitação nas extremidades norte/sul do SAB confirma o que foi identificado no mapa médio, sobre as chuvas causadas por fatores climáticos e sistemas atmosféricos, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), ao norte, e pelos sistemas frontais, ao sul (MOLION, 2002). Em relação ao coeficiente de variação verificou-se uma ampla variação entre 2,4 a 5,4, com menores valores mais ao norte do SAB, indicando uma maior homogeneidade da precipitação ao norte do SAB e uma diminuição gradativa à medida que se aproxima da região sul (Figura 5C).

Figura 15. Representação da precipitação interanual média (A) e desvio padrão da precipitação pluvial (B) e coeficiente de variação (C) para o período de 1981 a 2014.



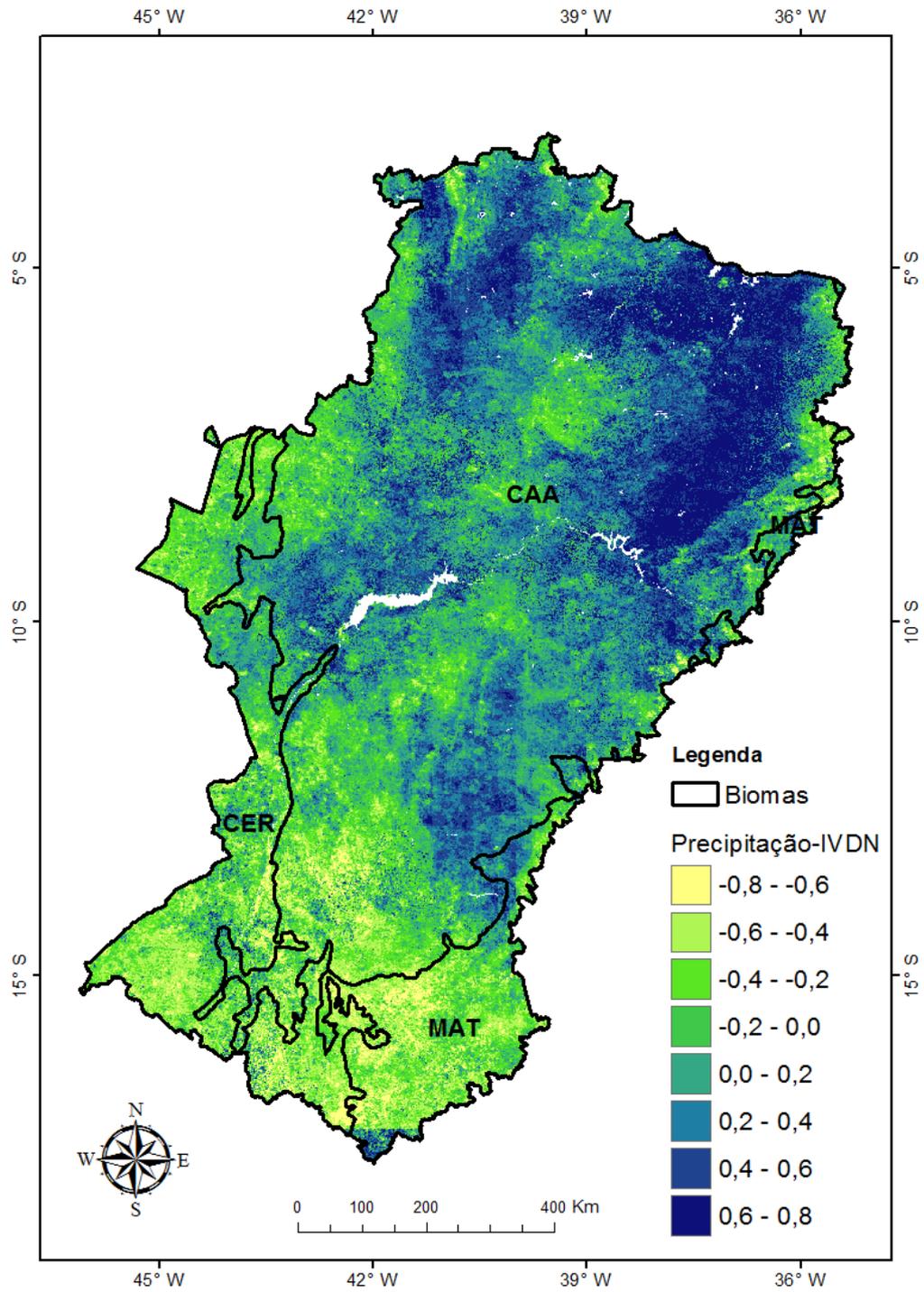
Verificou-se uma grande deficiência de chuvas na região central do SAB, diante da associação dos baixos índices e baixa variabilidade, indicando uma forte influência na ocorrência de secas e, dependendo do período de ocorrência e severidade, um dispositivo que pode acelerar ainda mais o processo de degradação ambiental (Figuras 15A e 15B).

Barbosa et al. (2015), no estudo do comportamento da vegetação em relação a precipitação na América do Sul, encontrou uma correlação alta e positiva em regiões semiáridas. Observou-se que na região semiárida na houve uma distribuição da correlação positiva e significativa que se estende da região central ao norte do SAB, enquanto a correlação negativa está mais ao sul. Tomando como referência os limites dos biomas, disponibilizados pelo IBGE (2004), no que representa a área da vegetação que está associada às respostas do IVDN, percebe-se uma extensa área de correlação alta e positiva na região Nordeste do bioma Caatinga, essa resposta está ligada a uma região de vegetação nativa que, segundo o Ministério do Meio Ambiente (2002), 62,77% das áreas desse bioma são compostos por vegetação nativa. Nas demais áreas do bioma a distribuição do nível de correlação positiva diminui. Essa resposta está sendo influenciada por outros fatores como áreas antropizadas que cobrem 36,28%, outro fator importante é a perda de cobertura vegetal no bioma, que chega à ordem de 500 mil hectares por ano (MMA, 2002).

Para os biomas Cerrado e Mata Atlântica a correlação é nula ou forte/fraca e negativa, indicando que a precipitação não é o um limitante para a variação do IVDN nessas regiões. No Cerrado 60% da sua área coberta por vegetação nativa 36,76% dessa cobertura é caracterizada como floresta. A Mata Atlântica tem uma característica semelhante de formação florestal, porém menor área de vegetação nativa 26,97%, sendo 21,80% de formação florestal e 70,95% de influência antrópica. (MMA, 2002). Assim, a precipitação pluvial não é um fator limitante em todas as áreas para a variação do IVDN, isso vai depender dos componentes de uso do solo.

A barra de cores da figura 16 classifica os valores de alta correlação positiva (azul) até baixa correlação negativa (verde fraco).

Figura 16. Distribuição geográfica da correlação entre o IVDN e precipitação pluvial para o período de 2007 a 2014.

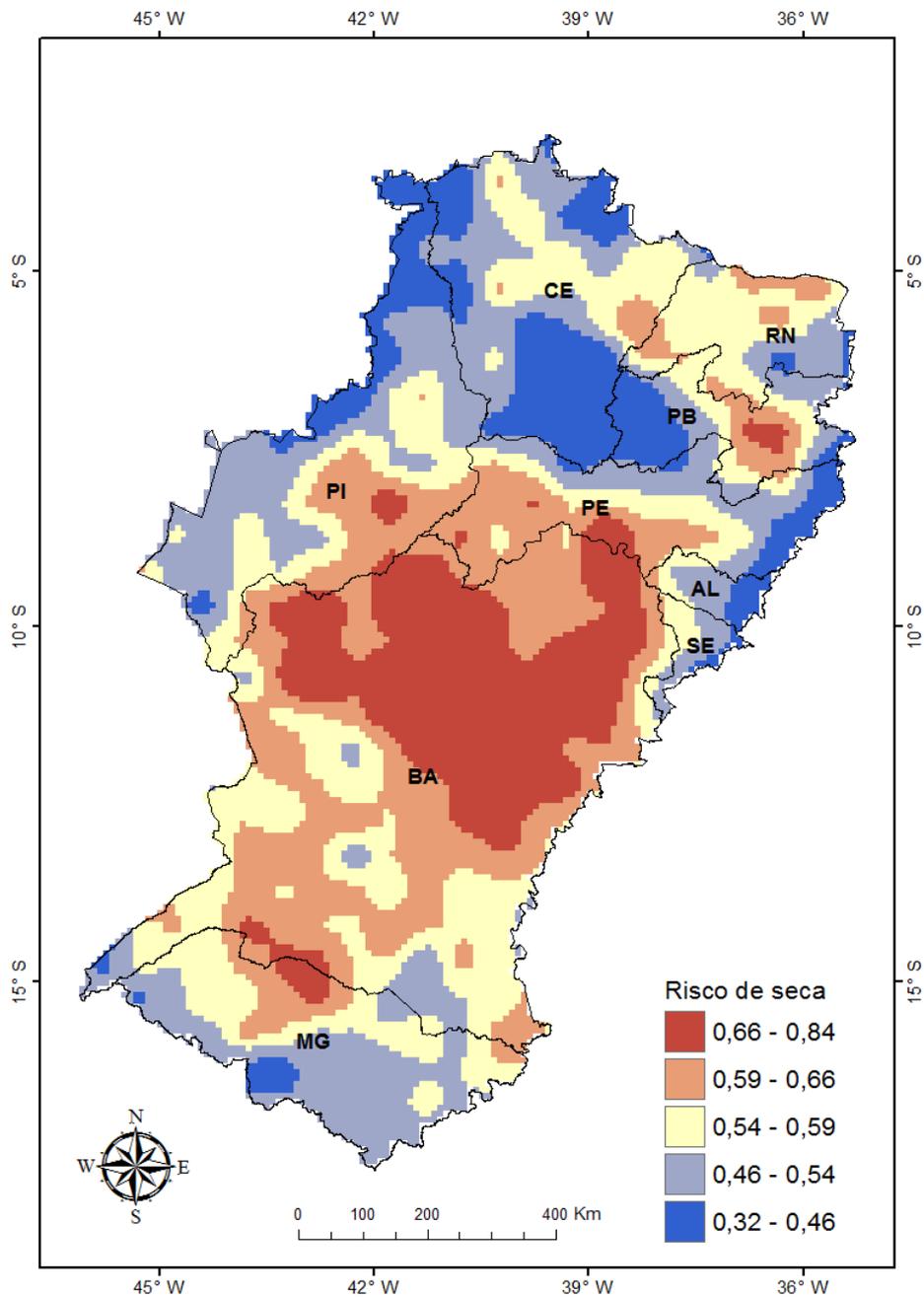


5.4 Análise do IVDN e precipitação pluvial com fatores biofísicos e socioeconômicos

5.4.1 Análise do índice de risco de secas

Pela análise do mapa da distribuição espacial do índice de risco de secas, mostra que os valores mais altos (vermelho) concentrados na região central e em algumas áreas isoladas do SAB. Em contrapartida, valores mais baixos (azul) do índice estão localizados em regiões norte e sul do SAB (Figura 17).

Figura 17. Distribuição geográfica do índice de risco de secas.



Os valores mais altos do índice representam um risco maior de secas, indicando ocorrência de eventos de secas são mais frequentes, os valores mais baixos o risco é menor, não significando que haverá ocorrência de secas. O Estado da Bahia é o que apresenta os maiores de riscos de seca, com uma extensa área predominando no território. Posto que nos estados de Paraíba, Piauí e Pernambuco também apresentam altos valores do índice em grandes extensões.

Em comparação com a precipitação, abordada anteriormente, existe uma forte concordância na distribuição espacial entre as informações, é nas áreas onde os índices pluviométricos são menores o risco de seca é maior.

5.4.2 Análise dos aspectos socioeconômicos

Diante dos resultados obtidos pelos subíndices de propensão socioeconômica, constata-se que todos tiveram respostas distintas em termos de distribuição espacial das informações. Na tabela 4 estão apresentados de forma detalhada os subíndices conforme o nível de propensão, correspondente a cada condição analisada, em valores absolutos e relativos. Analisando-se a quantidade dos municípios propensos a desertificação, constata-se que na condição econômica (SIPe), os níveis alto e médio somam 80% dos municípios analisados com somente 20% desses no nível baixo, na condição social (SIPs), quase 70% dos municípios estão no nível baixo, indicando uma situação melhor que o SIPe (20%) e já a condição agropecuária (SIPap) apresenta 52% dos municípios no nível baixo, tendo apenas 10% no nível alto, indicando que poucos municípios está altamente susceptíveis a desertificação.

Tabela 4. Representação quantitativa dos municípios quanto à condição e o nível de propensão

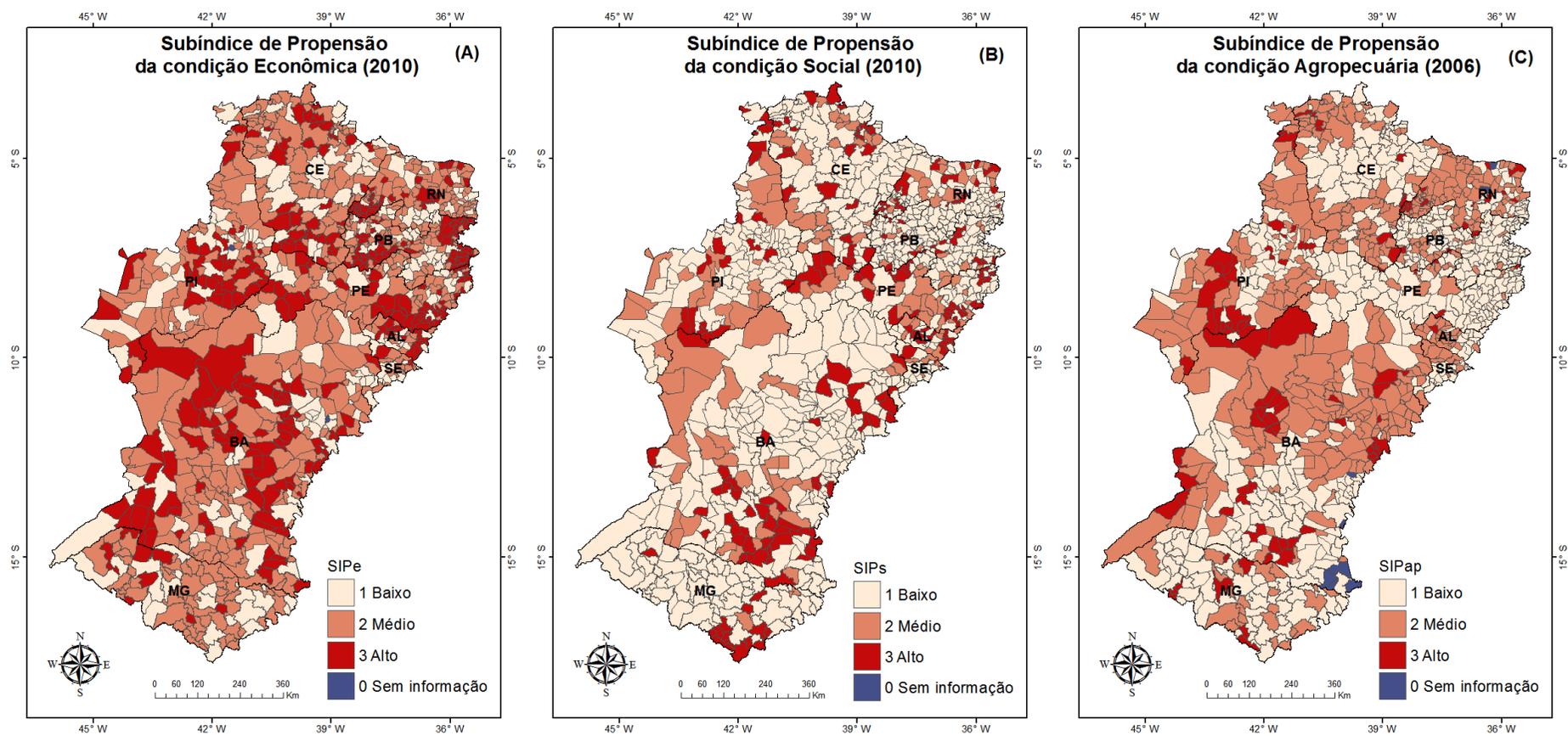
Subíndices	Níveis	Nº de municípios	(%)
Condição econômica (SIPe)	1- Baixo	230	20
	2- Médio	557	49
	3- Alto	348	31
Condição Social (SIPs)	1- Baixo	788	69
	2- Médio	142	13
	3- Alto	205	18
Condição Agropecuária (SIPap)	1- Baixo	583	52
	2- Médio	431	38
	3- Alto	113	10

Analisando-se todos os subíndices de forma pontual, observou-se que o SIPe apresentaram resultados mais acentuados que os demais subíndices, apontando 80% dos municípios para os níveis médio-alto. Isso indica maior vulnerabilidade econômica para a

população do SAB, sabendo que o índice toma como objeto principal para o cálculo lógico a renda *per capita*, que pobreza rural e municipal. De modo contrário, o subíndice social apresenta, aproximadamente, 70% dos municípios no nível baixo, isso pode estar relacionado ao fato do subíndice ter sido calculado pela comparação entre o IDH municipal de 2000 e 2010. Com base nos dados do IDH-M para a região do SAB os valores foram 0,434 (2000) e 0,598 (2010), demonstrando que o aumento foi significativo passando do nível muito baixo (2000) para baixo (2010), de acordo com a classificação do PNUD (2013). No SIPap, embora os dados apresentem uma grande quantidade de municípios no nível baixo (583), merece destaque também os de médio nível (431), pois subtende este encontra-se no limite de transição assim pode passar para um nível mais alto ou mais baixo, dependendo das condições ambientais, já que o principal fator do cálculo lógico desse subíndice são os dados agropecuários.

A distribuição espacial dos subíndices socioeconômico apresentou uma tendência distinta, variando espacialmente os níveis de propensão (Figura 18). Nota-se que o SIPE apresenta uma situação crítica em quase todos os municípios numa distribuição praticamente uniforme. Quanto ao SIPs predomina o nível baixo, como foi apresentado anteriormente (Tabela 4), porém espacialmente, percebe-se que os níveis médio e alto estão localizados em áreas isoladas do SAB. O SIPap tem uma configuração que coincide com alguns resultados já visto nesse trabalho, onde os valores críticos localizam-se na região central do SAB e em áreas isoladas no norte e sul (Figura 18).

Figura 18. Distribuição espacial dos subíndices de propensão socioeconômica, quanto ao nível e condição econômica (A), social (B) e agropecuária (C).



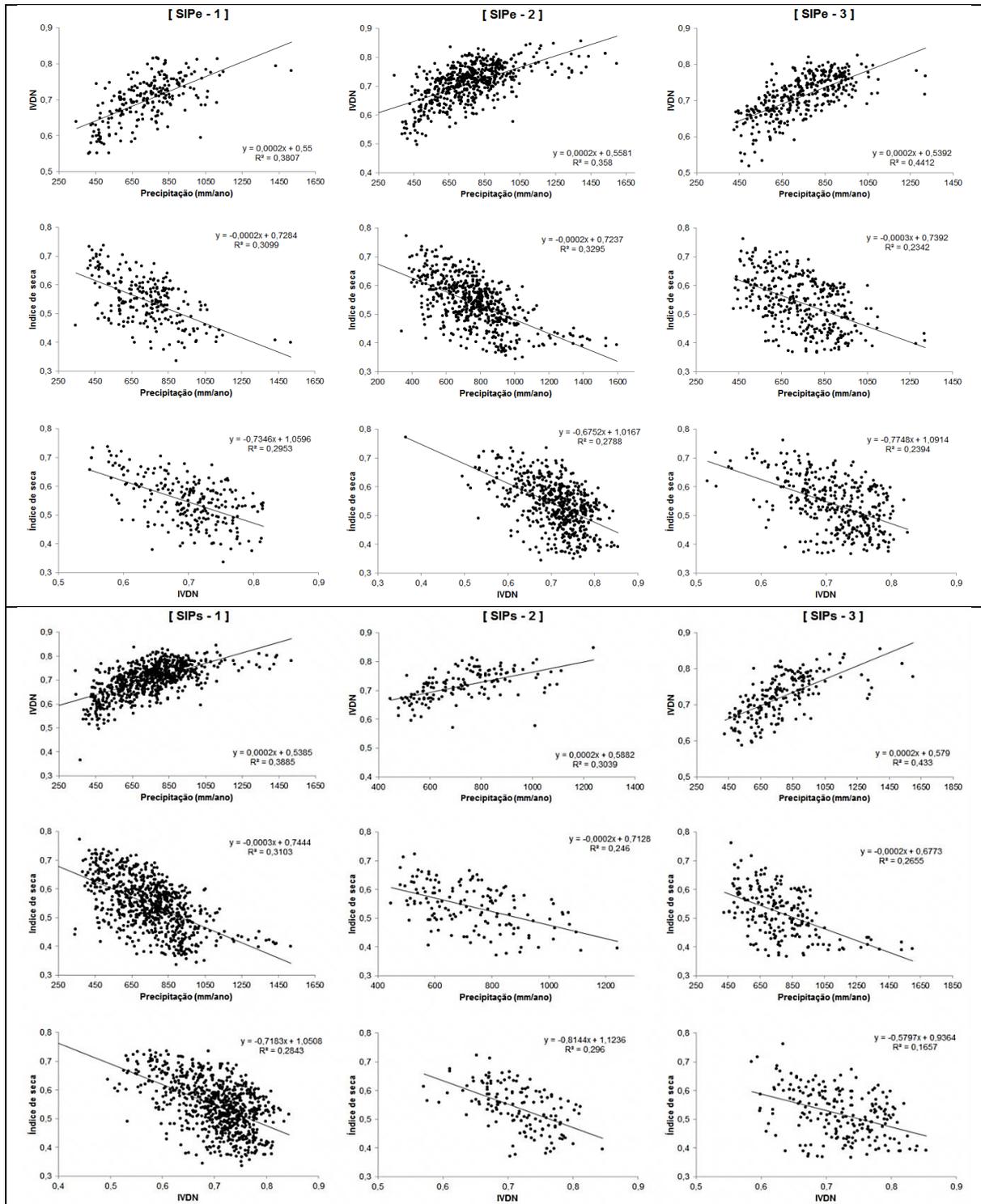
5.4.3 Análises estatísticas entre os índices, IVDN e precipitação pluvial

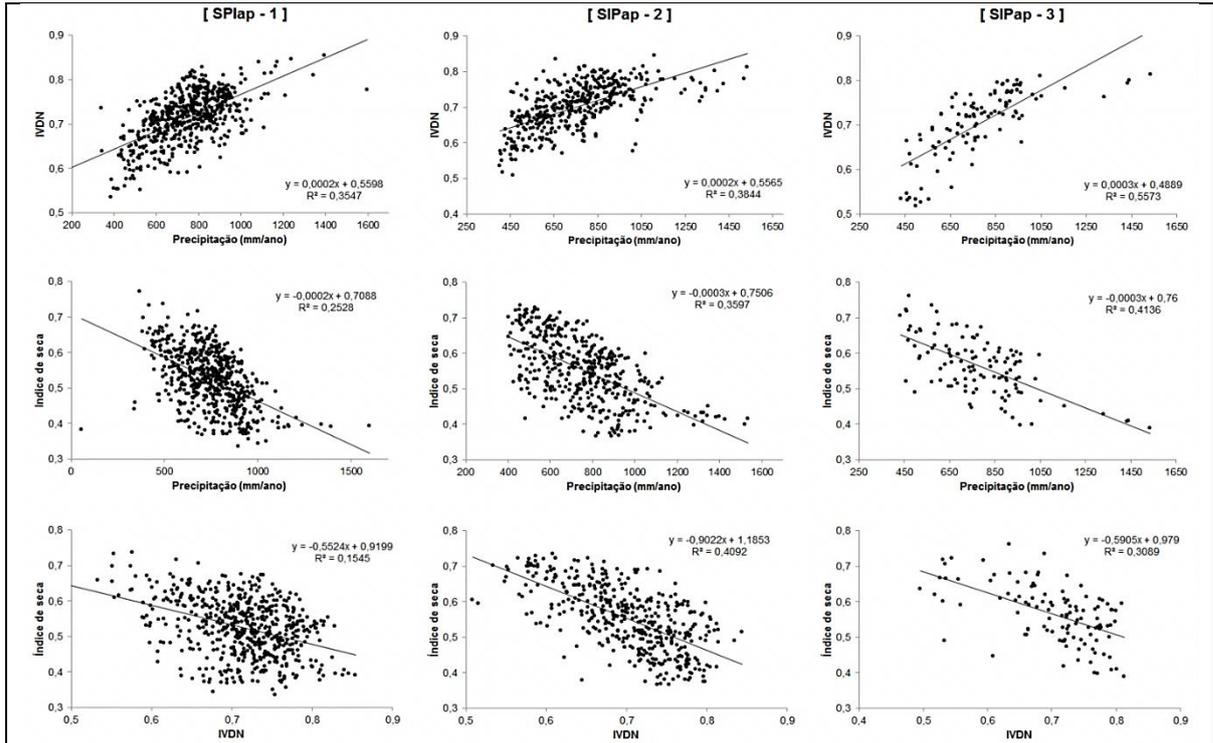
Realizou-se uma correlação entre o índice de risco de secas, precipitação e IVDN, visando verificar a relação entre as variáveis do trabalho e entender a sua dinâmica da delas subíndices de propensão socioeconômica. Assim, as nuvens de pontos (Figura 19) representam a quantidade de municípios por nível de propensão, vista anteriormente na tabela 4. Quanto à organização, cada coluna de gráficos corresponde a um nível de propensão em ordem crescente da esquerda para direita. As linhas estão organizadas por variáveis dependentes conforme a ordem de análise. Os valores da correlação representa a média das variáveis por município.

Para os subíndices de propensão socioeconômica a relação entre o IVDN e precipitação mostram uma correlação positiva e significativa nos três níveis, indicando uma relação direta da precipitação com o aumento ou diminuição da vegetação nos municípios analisados. Desse modo, constata-se que a precipitação atua como um fator determinante na condição cobertura vegetal do SAB. Outro ponto importante é que no nível 3, o grau de correlação foi maior que os demais níveis.

A correlação do índice de risco de secas com a precipitação e com o IVDN apresentou-se negativa. Essa resposta está associada à variabilidade a precipitação como também da vegetação, devido à localização dos municípios analisados (Figura 18). Já que, a resposta do IVDN varia dependendo da região, como foi visto na análise da tendência como também na correlação interanual.

Figura 19. Correlação da precipitação, índice de risco de secas e IVDN, para os subíndices de propensão da condição econômica (SIPe), social (SIPs) e agropecuária (SIPap), nos níveis 1, 2 e 3.





6 CONCLUSÕES

Foi possível representar características importantes da região, relacionadas à dinâmica da vegetação e regime de chuvas, mostrando sinais de degradação e verdejamento no SAB.

A análise de tendência pelo SDVI e SPI-1, ainda existem limitações e incertezas no entendimento da dinâmica da vegetação relacionada à precipitação, devido aos efeitos de defasagens temporais heterogêneos.

O IVDN é um bom indicador de áreas degradadas, por mostrar a dinâmica da vegetação no espaço e no tempo.

Tanto a análise de tendência e a correlação entre SDVI e SPI-1, como a correlação interanual entre IVDN e precipitação, mostraram-se coerentes indicando que a vegetação do bioma Caatinga é dependente da precipitação pluvial, sobretudo nas áreas ao norte do SAB.

A partir da análise interanual do IVDN constatou-se áreas com sinais de degradação em alguns Estados do SAB, sobretudo na Bahia, comprovadas estatisticamente pela correlação nula nas áreas degradadas.

Os indicadores biofísicos e socioeconômicos foram sensíveis na identificação de áreas mais susceptíveis à degradação ambiental, como na região central do SAB, em termos distribuição espacial.

Os resultados dos subíndices SIPE e SIPap foram menos propensos à condição socioeconômica, podendo os resultados apresentar variação por influência de fatores que não se incluem na metodologia, e que são de suma importância por se tratar de dados que chegam mais próximos da realidade por características biofísicas da região.

As metodologias desta pesquisa são indicadas para serem aplicadas em análises, de outras pesquisas por contribuírem agregando valores às novas técnicas de monitoramento de áreas degradadas, atribuindo novos dados com melhor resolução espacial e temporal, como também indicadores, no intuito de melhorar as análises e obter resultados mais eficientes.

O assunto desertificação deve ser tratado como um problema não somente ambiental, mas também social e econômico. Existem dificuldades para lidar com o assunto, portanto é importante a colaboração social e governamental para a mitigação do problema.

7 REFERÊNCIAS

BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V.; SILVA, L. R. M. **Recent trends in vegetation dynamics in the South America and their relationship to rainfall**. *Natural Hazards*. Vol. 77. Feb. 2015, p. 883-899.

BARBOSA, H. A. **Vegetation dynamics over the Northeast region of Brazil**. Scholars' Press. 2014, 84p.

BARBOSA, H. A.; HUETE, A. R.; BAETHGEN, W. E. **A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil**. *Journal Arid Environment*. Vol. 67. May 2006, p. 288–307.

BARBOSA H. A. **Análise espaço temporal de índice de vegetação AVHRR/NOAA e a precipitação na região nordeste do Brasil em 1982-85**. Dissertação de mestrado. Abril 1998, 170p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos, Brazil.

BARET, F.; SMETS, B.; LACAZE, R. **Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), SPOT/VGT**. Product manual user. Version 1. 2015, 24p.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura no Rio grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura**. Porto Alegre. Editora UFRGS. 2003, 110p.

BOWKER, D. E. et al. **Spectral reflectance of natural targets for use in remote sensing studies**. Scientific and technical information branch. NASA. Hampton, 1985, 184p.

BRASIL/INSTITUTO DE PESQUISA APLICADA. **Produto Interno Bruto**. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 08 de set. de 2015.

BRASIL/INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. **Estudo de caso: índice de propensão econômica, social e agropecuário no semiárido brasileiro**. Campina Grande: Editora Instituto Nacional do Semiárido, 2014, 53p.

BRASIL/INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Campina Grande: Editora Instituto Nacional do Semiárido, 2011, 209p.

BRASIL/MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos/Universidade Federal da Paraíba. 2007, 134p.

BRASIL/MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL/SECRETARIA DE POLÍTICAS DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Nova delimitação do Semiárido Brasileiro**. Brasília: MI. 2005, 35p.

BRASIL/MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Mapa de cobertura vegetal: Caatinga**. 2002. Disponível em: <www.mma.gov.br/biomas/caatinga/mapa-de-cobertura-vegetal>. Acesso em: 20 de ago. de 2015.

BURGAN, R. E.; HARTFORD, R. A. **Monitoring vegetation greenness with satellite data**. United States Department of Agriculture, Forest Service, General technical report INT-297, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, 1993, 13 p.

BURROWS, J.P. et al. Scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography. **Acta Astronaut.** Bremen, vol.35, april 1995, p. 445–451.

CARRAO, H., BARBOSA P., VOGT, J. Assessing and mapping drought hazard in Africa and South-Central America with a Meteorological Drought Severity Index. **Geophysical Research Abstracts**. Vol. 17, n°. 15453, april 2015 (b)

CARRAO, H., BARBOSA P., VOGT, J. **Assessing and mapping drought hazard in Africa and South-Central America with a Meteorological Drought Severity Index (MSDI)**. Viena, Austria: European Geosciences Union General Assembly. 2015, 4p. (a)

CARVALHO, V. C. **O uso de sensoriamento remoto para um estudo de caso de desertificação, a partir da análise de cobertura vegetal de Quixadá-PE**. Seminário sobre Desertificação no Nordeste. Brasília, SEMA/SPL, 1986.

CARVALHO, O. et al. **Plano integrado para o combate preventivo aos efeitos das secas no Nordeste**. Brasília: Ministério do Interior/MINTER, 1973, p. 14.

FUNK, C.C. et al. **A quasi-global precipitation time series for drought monitoring**. U.S. Geological Survey Data Series, Technical report, vol. 832, 2014, 4p.

GAN, M. A; KOUSKY, V. E. **Estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul e Leste do Brasil**. São José dos Campos, INPE, 1982, p. 429-453.

GDAL. **Geospatial Data Abstraction Library**. Disponível em: <<http://www.gdal.org/>>. Data de acesso: 03 de jul de 2015

GUTTMAN, N. B. **Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm**. Journal American Water Resources Association, vol.35, n°2, 1999, p. 311-322.

HOLBEN, B.N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal Remote Sensing**. Vol.7, n° 11, p. 1417–1434, 1986.

IBGE. Censo agropecuário 2006. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/acervo/acervo1.asp?z=t&o=3>>. Acesso em: 08 de set de 2015.

IBGE. Censo populacional 2010. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/acervo/acervo1.asp?z=t&o=3>>. Acesso em: 08 de set de 2015.

IBGE. **Mapa de biomas e de vegetação**. 2004. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Data de acesso: 20 de ago de 2015.

ILWIS. **ILWIS, the free user-friendly raster and vector GIS**. Disponível em: <<http://www.ilwis.org/>>. Data de acesso: 03 de jul de 2015.

- JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive veterinary medicine**. vol. 11, nº3 , Amsterdam, p. 185-200,1991.
- KOUSKY, V.E.; GAN, M.A. **Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic**. Tellus, vol.36,nº 6, p. 538-551 , Dec. 1981.
- LLOYD-HUGHES, B.; SAUNDERS, M. A. A drought climatology for Europe. **Intenational Journal of Climatology**. Vol.22, nº 13, p.1571–1592, jun 2002.
- MAHESH, P., MATHER PM. An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification. **Remote Sensing Environment**. vol. 86, nº 4, p.554–565, aug 2003.
- MATALLO JÚNIOR, H. **Indicadores de desertificação: histórico e perspectivas**. Brasília: UNESCO, 2001. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org>>. Acesso em: 15 de jan de 2015.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Anaheim CA, 1993, p.179-186.
- MOLION, L. C. B.; OLIVEIRA, S. **Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, vol. 17, nº 1, p.1-10. 2002.
- NASCIMENTO, F. R. **O fenômeno da desertificação**. Goiânia: Editora UFG, 2013, 240 p.
- NOBRE, C. A.; MOLION, L. C. B. The climatologic of drought prediction. **Kluwer Academic Publishers**. The impact of variation on agriculture, vol. 2, 23 p., 1988.
- PALMER, C.E. On high-level cyclones originating in the tropics. **Transactions of Americam Geophysics Union**, vol. 32, nº 5:p. 683-695, 1951.
- PAN BRASIL. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Recursos Hídricos, 2004, 34p.
- PETERS, A. J. et al. Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, vol. 68, nº1, p. 71–75, 2002.
- PNUD, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Índice de Desenvolvimento Humano Municipal Brasileiro**. Brasília: PNUD, Ipea, FJP, 2013, 96 p.
- PNUD, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Índice de desenvolvimento humano**. 2010. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 08 de ago de 2015.
- PNUD, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Índice de desenvolvimento humano**. 2000. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 08 de ago de 2015.
- PONZONI, F. J. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a Mata Atlântica**. São José dos Campos, INPE, 2002, 28 p.

QGIS. **Sobre o QGIS**. Disponível em: <<http://qgis.org/>>. Data de acesso: 03 de jul de 2015.

SAINT, G. **Products-vegetation system**. Version 2, 1994. Disponível em: <<http://www.spot-vegetation.com> >. Data de acesso: 06 de jul de 2015.

SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Matéria orgânica do solo no bioma caatinga. In: SANTOS, G. S. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 Ed. Porto Alegre: Metrópole, p.419-441, 2008.

SAMPAIO, E. V. S. B. et al. **Desertificação no Brasil: Conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência**. Recife: UFPE, 2003. 202p.

SCIORTINO, Maurizio. **Desertification in the Mediterranean**. 2001. Disponível em: <<http://www.isodarco.it> >. Data de acesso: 16 de mai de 2015.

SMETS, B.; JACOBS T.; SWINNEN, E. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Product user manual, version 2. 2015, 88p.

STILES, D. **Desertification is not a myth**. Desertification Control Bulletin: a bulletin of world events in the control of desertification, restoration of degraded lands and reforestation, n. 26, 1995, p. 29-36

UNCCD. **Learning to combat desertification**. Paris. 1997, 261 p. Disponível em:<<http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/Educ%20Kit%20UNESCO%20eng.pdf>> Data de acesso: 25 de mar de 2015.

VENABLES, W. N.; SMITH, D. M. **R: a programming Environment for Data Analysis and Graphics**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org>>. Data de acesso: 02 de jul de 2015

VITO. **Data processing-vegetation system**. 2010a. Disponível em: <<http://www.spot-vegetation.com> >. Data de acesso: 08 de set de 2015.

VITO. **The Spectral responses-vegetation system**. 2010b. Disponível em: <<http://www.spot-vegetation.com> >. Data de acesso: 08 de ago de 2015.

WER. **Desertification: its effects on people and land**. Vol. 21, nº 1. 2009, 16 p.

WORSTER, Donald. Dust Bowl: The Southern Plains in the 1930s. New York: Oxford University Press, 1979, 227 p.

8 APÊNDICE

Nat Hazards
DOI 10.1007/s11069-015-1635-8

ORIGINAL PAPER

Recent trends in vegetation dynamics in the South America and their relationship to rainfall

H. A. Barbosa · T. V. Lakshmi Kumar · L. R. M. Silva

Received: 26 April 2014 / Accepted: 23 January 2015
© Springer Science+Business Media Dordrecht 2015

Abstract This research investigates spatial patterns of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and rainfall variability in South America and their relationships based on analyses of the Standardized Difference Vegetation Index (SDVI) and the Standardized Precipitation Index (SPI) for the period April 1998–March 2012. The time series of SPOT-Vegetation 10-daily composite NDVI data at 1-km resolution was smoothed and subsequently synthesized to monthly images using the maximum value composite technique. Furthermore, 10-daily rainfall estimates at 0.25° resolution, available from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts through MeteoConsult and the Monitoring Agricultural ResourceS unit, were combined to retrieve monthly composites. In order to assess spatial patterns and rates of change, linear least squares trend analyses were performed on the SDVI time series and the SPI time series, taking into account the accumulated rainfall over the respective best lag. Only trends with Pearson's correlation coefficients significantly different from zero ($p < 0.05$) were considered significant. The results indicated that vegetation degradation is coupled to a significant decrease in the amount of rainfall in the last 14 years in 8 % of South America's area. In contrast, in 18 % of the subcontinental area, vegetation greenness has significantly increased over the last 14 years, coupled to an increase in rainfall. For 46 % of the study area, significant degradation or greening processes could not be linked to changes in rainfall over time,

H. A. Barbosa
Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites (LAPIS), Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, Brazil

H. A. Barbosa (✉) · L. R. M. Silva
Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, BR 104 Norte - Tabuleiro do Martins, Maceió, AL 57072-970, Brazil
e-mail: barbosa33@gmail.com

T. V. Lakshmi Kumar
Atmospheric Science Research Laboratory, Department of Physics, SRM University, Kattankulathur, India
e-mail: lkumarap@hotmail.com

Published online: 03 February 2015

 Springer

Anexo 1. Artigo publicado na revista Natural Hazards sobre a metodologia de tendência aplicada nesse trabalho