



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA (CCEN)
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
MESTRADO ACADÊMICO EM GEOGRAFIA

RAMON SANTOS SOUZA

**AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO EM
SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DO RIO PARAÍBA NO SEMIÁRIDO DO BRASIL**

JOÃO PESSOA – PB,

2018

RAMON SANTOS SOUZA

AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO EM
SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DO RIO PARAÍBA NO SEMIÁRIDO DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Geografia do Programa de Pós-Graduação em Geografia do Centro de Ciências Exatas e da Natureza (CCEN) da Universidade Federal do Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Geografia. Área de Concentração: Território, Trabalho e Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Reinaldo F. Paiva de Lucena

JOÃO PESSOA – PB,

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S729a Souza, Ramon Santos.

Avaliação espaço-temporal do processo de desertificação em sub-bacias hidrográficas do Rio Paraíba no semiárido do Brasil / Ramon Santos Souza. - João Pessoa, 2018.
86 f. : il.

Orientação: Bartolomeu Israel de Souza.
Coorientação: Reinaldo F Paiva de Lucena.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCEN.

1. Desertificação. 2. RESTREND. 3. SAVI. 4. Google Earth Engine. 5. Semiárido. I. Souza, Bartolomeu Israel de. II. Lucena, Reinaldo F Paiva de. III. Título.

UFPB/CCEN

“Análise Espaço-temporal do Processo de Desertificação em Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Paraíba no Semiárido do Brasil”

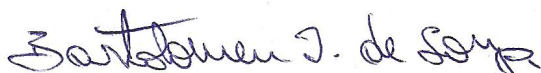
por

Ramon Santos Souza

Dissertação apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia do CCEN-UFPB, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de Concentração: Território, Trabalho e Ambiente

Aprovada por:



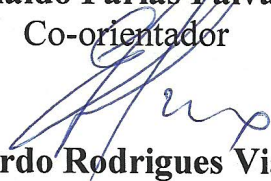
Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza

Orientador



Prof. Dr. Reinaldo Farias Paiva de Lucena

Co-orientador


Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima

Examinador interno



Prof. Dr. Valéria Raquel Porto de Lima

Examinadora externa

**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Geografia
Curso de Mestrado em Geografia**

Outubro/2018

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Maria da
Penha dos Santos Souza e João de Souza Latão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, a inteligência suprema, causa primária de todas as coisas. A Jesus, que é o caminho, a verdade e a vida. Agradeço também aos guias e amigos espirituais.

Ao amor de meus pais Maria da Penha dos Santos Souza e João de Souza Latão, por assumir a responsabilidade de minha tutela na Terra e acreditarem no meu potencial, por estarem ao meu lado em todos os momentos auxiliando minha evolução, formação moral e intelectual. Aos meus irmãos Ricardo dos Santos Souza e Rafael dos Santos Souza.

À minha avó biológica Helena (“in memória”), avô Antônio Firmino (“in memória”), avô Antônio Praxedes (“in memória”), avô Samuel (“in memória”), avó Helena Pereira, avó Maria do Socorro (Desaparecida!), tia-avó Maria Tibuço (“in memória”), tia Maria Firmino (“in memória”). E demais queridos familiares.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da pesquisa e bolsa concedida no mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba - UFPB - Campus I.

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza, pela confiança em meu potencial. Sua sabedoria, sugestões e críticas foram essenciais para meu aperfeiçoamento profissional e humano.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Reinaldo Farias Paiva de Lucena pelo incentivo a pesquisa desde a graduação e por todos os momentos compartilhados, que proporcionou o meu engrandecimento pessoal e profissional.

Ao eterno amigo e Prof. Dr. Carlos Antonio Belarmino Alves, por sua dedicação e amor em todos esses anos, pelos conselhos, momentos de descontração e pelo trabalho, que ficaram marcado em minha vida.

Ao Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima (UFPB) por aceitar a fazer parte da banca examinadora como membro interno e suas considerações para a construção desse trabalho.

A Profa. Dra. Valéria Raquel Porto de Lima (UEPB) por aceitar examinar e contribuir na realização desse trabalho.

Aos meus professores do ensino básico. Ao meu professor de música Batista de Andrade.

Ao Laboratório de Estudos do Semiárido - LAESA, meu sincero obrigado a todos os seus integrantes, que me ajudaram nesse período.

A todos que fizeram de Turma de mestrado 2016.1 da UFPB, pelos momentos de descontração, alegria e dificuldades que passamos juntos. Aos professores do PPGG, pela dedicação em compartilhar seus conhecimentos.

Aos meus grandes amigos da UEPB e da vida: Estevão Ferreira, Wellington Dantas, Joseline Silva, Amanda Azevedo, Suziane, Clemilson, Silvânia, entre outros, que fizeram parte da minha vida, que permaneceram ao meu lado sempre nessa caminhada.

Agradeço também a Dona Edileuza Cardoso e seu esposo João, e meu primo Wagner Cardoso pela estadia e abrigo em sua casa e dedicação durante o mestrado.

A União Espírita Fabiano de Cristo do município de Cuitégi-PB e seus trabalhadores, especialmente a José Cândido, Dona Zeza, Arimateia e Edson.

Ao Núcleo Espírita Amigo da Paz (Guarabira-PB), Instituição Espírita Beneficente Allan Kardec (Guarabira-PB) e o Centro Espírita Vinha de Luz (Caiçara-PB), pelo trabalho caridoso e amor dedicado aos irmãos necessitados.

Ao meu amor e companheira de todas as horas, Simone da Silva.

Por todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente na concretização desse sonho, os meus mais sinceros agradecimentos!

*A inteligência é rica de méritos para o futuro,
mas, sob a condição de ser bem empregada, a
pureza do coração é inseparável da simplicidade
e da humildade.*

**(ALLAN KARDEC. O EVANGELHO
SEGUNDO O ESPIRITISMO.)**

RESUMO

O Sensoriamento Remoto é uma ferramenta essencial para detecção, monitoração e avaliação da desertificação. Neste contexto, este estudo analisou a relação do SAVI e da precipitação para detectar as mudanças ocorridas na cobertura vegetal ocasionadas pelo processo de desertificação no período de 1986-2017 nas sub-bacias hidrográficas do Rio Paraíba, Nordeste do Brasil. Para tanto, foi realizado uma análise estatística descritiva, correlação de Pearson e uma adaptação do método RESTREND utilizando compósitos interanuais SAVI (Landsat 30 m) e dados de chuva espacialmente explícitos (CHIRPS). Os resultados mostram que durante o período de estudo, a distribuição da precipitação variaram entre 350 a 400 mm, obtendo coeficientes de variação maiores que 30%. O comportamento da precipitação indicou 5 anos muitos secos (MS), 6 anos secos (S), 10 anos neutros (N), 6 anos chuvosos (C) e 5 anos muitos chuvosos (MC). A variação espacial do SAVI médio foi maior ($>0,7$) principalmente na porção ocidental e em algumas manchas localizadas em topografias mais acentuadas da área de estudo. Em contraste, o pixels SAVI $< 0,3$ seguiram os principais rios da área de estudo. Os anos MC (SAVI= $0,85 \pm 0,14$, min= $0,71$, max= $0,87$) e C (SAVI= $0,80 \pm 0,15$, min= $0,64$, max= $0,96$) apresentam os maiores valores do SAVI. Observa-se que nos anos S (SAVI= $0,62 \pm 0,14$, min= $0,53$, max= $0,69$) e MS (SAVI= $0,50 \pm 0,15$, min= $0,37$, max= $0,67$) possuem os menores valores. O SAVI e precipitação foram significativamente correlacionados ($p \leq 0,05$) para 83,17% dos pixels e coeficiente médio de correlação igual a 0,53. A tendência do SAVI indicou que 58,57% dos pixels apresentaram tendências crescentes significantes ($p \leq 0,05$) dos valores dos pixels e 34,04% dos pixels obtiveram tendências decrescente significantes ($p \leq 0,05$). O SAVI residual (ajustado pela precipitação) teve uma tendência negativa, observada em 31,41% dos pixels; 26,75% dos pixels apresentaram tendência residual positiva. Durante 1986-2001, uma tendência residual negativa foi observada em 50,34% dos pixels e 38,48% dos pixels apresentaram tendência residual positiva. No período de 2002-2017, uma tendência negativa foi observada em 34% dos pixels e 16% dos pixels apresentaram tendência positiva. O intercepto do SAVI precipitação de forma geral se mantiveram acima de zero, onde na porção ocidental obtive valores acima de 0,5 por pixel. Em suma, os as precipitação e os impactos das atividades humanas na dinâmica da vegetação variaram na área estudada e medidas específicas locais de proteção e gestão ambiental devem ser adotadas.

Palavras-chave: Desertificação. RESTREND. SAVI. Google Earth Engine. Semiárido.

ABSTRACT

Remote Sensing is an essential tool for the detection, monitoring and evaluation of desertification. In this context, this study analyzed the relationship between SAVI and precipitation to detect changes in vegetation cover caused by the desertification process in the period 1986-2017 in the sub-basins of the Paraíba River, Northeast Brazil. For this, a descriptive statistical analysis, Pearson correlation and an adaptation of the RESTREND method using SAVI (Landsat 30 m) and spatially explicit rain data (CHIRPS) were performed. The results show that during the study period, the precipitation distribution varied between 350 and 400 mm, obtaining coefficients of variation greater than 30%. The precipitation behavior indicated 5 years of dry season (DS), 6 dry years (D), 10 neutral years (N), 6 rainy years (R) and 5 rainier years (RA). The spatial variation of the mean SAVI was higher (> 0.7) mainly in the western portion and in some spots located in more pronounced topographies of the study area. In contrast, SAVI pixels < 0.3 followed the major rivers in the study area. The RA years ($\text{SAVI} = 0.85 \pm 0.14$, min = 0.71, max = 0.87) and R ($\text{SAVI} = 0.80 \pm 0.15$, min = 0.64, max = 0.96) present the highest values of SAVI. It is observed that in D years ($\text{SAVI} = 0.62 \pm 0.14$, min = 0.53, max = 0.69) and DS ($\text{SAVI} = 0.50 \pm 0.15$, min = 0.37, max = 0.67) have the lowest values. SAVI and precipitation were significantly correlated ($p \leq 0.05$) to 83.17% of the pixels and mean correlation coefficient was 0.53. The SAVI trend indicated that 58.57% of the pixels presented significant increasing trends ($p \leq 0.05$) of the pixel values and 34.04% of the pixels obtained significant decreasing tendencies ($p \leq 0.05$). Residual SAVI (adjusted by precipitation) had a negative residual tendency observed in 31.41% of the pixels and 26.75% of the pixels showed a positive residual trend. During 1986-2001, a negative residual trend was observed in 50.34% of the pixels and 38.48% of the pixels showed a positive residual trend. In the period 2002-2017, a negative trend was observed in 34% of the pixels and 16% of the pixels showed a positive trend. The SAVI intercept precipitation generally remained above zero, where in the western portion obtained values above 0.5 per pixel. In sum, precipitation impacts and human activities on vegetation dynamics varied in the studied area and specific local measures of environmental protection and management should be adopted.

Keywords: Desertification. RESTREND. SAVI. Google Earth Engine. Semi-arid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características de um sistema dinâmico complexo.	19
Figura 2 – Os estágios da vegetação em Marrocos. Este mapa ilustra como Emberger desenhou cinco das principais zonas de vegetação (excluindo os desertos) de Marrocos em 1934. Este mapa é um precursor do sistema fitogeográfico detalhado de Marrocos. Criado por Diana K. Davis.	24
Figura 3 – Carta das Áreas em Risco de Desertificação.	29
Figura 4 – Áreas susceptíveis à desertificação e áreas afetadas por processos de desertificação.	30
Figura 5 – Localização de área de estudo.	34
Figura 6 – Destaque para a sub-bacia do Taperoá, Alto curso do Rio Paraíba e os municípios pertencentes.	35
Figura 7 – Declividade da área de estudo.	37
Figura 8 – Espacialização da rede de drenagem.	38
Figura 9 – Distribuição espacial dos solos na área de estudo.	42
Figura 10 – Número de observações válidas do Landsat obtidas pela seleção medoid (1986-2017).	45
Figura 11 – Distribuição espacial da média da precipitação interanual durante 1986-2017.	50
Figura 12 – Distribuição espacial do desvio padrão da precipitação interanual durante 1986-2017.	51
Figura 13 – Distribuição espacial do Coeficiente de Variação da precipitação interanual durante 1986-2017.	52
Figura 14 – Síntese do comportamento interanual das chuvas, estabelecendo cinco classes para qualificar as chuvas (MS, S, N, C e MC) durante 1986-2017.	53
Figura 15 – Distribuição espacial da média do SAVI durante 1986-2017.	54
Figura 16 – Distribuição espacial da desvio padrão do SAVI durante 1986-2017.	55
Figura 17 – Variação interanual e tendência linear do SAVI durante 1986-2017.	56
Figura 18 – Variação interanual das chuvas representadas pelas barras azuis e o SAVI exibido pela linha verde durante 1986-2017.	57
Figura 19 – Valores do SAVI nos anos pluviométricos MS, S, N, C e MC durante 1986-2017.	57
Figura 20 – Variação interanual das anomalias das chuvas e do SAVI durante 1986-2017.	58

Figura 21 – Coeficientes de Correlação de Pearson entre SAVI e precipitação total durante 1986-2017 (apenas pixels estatisticamente significativos ao nível de 0,05). .	59
Figura 22 – Valores da inclinação linear de regressão linear para as tendências de SAVI durante o período 1986-2017. Deve-se observar que a inclinação > 0 indica tendência de SAVI positiva e recuperação de vegetação, enquanto a inclinação < 0 indica tendência negativa de SAVI e degradação da vegetação. A significância estatística foi testada usando teste não paramétrico Mann-Kendall ($p \leq 0.05$).	61
Figura 23 – Valores da inclinação linear de regressão linear para as tendências de SAVI _{residual} , removendo os efeitos da variabilidade da precipitação durante o período 1986-2017. Deve-se observar que a inclinação >0 indica tendência de SAVI _{residual} positiva e recuperação de vegetação, enquanto a inclinação <0 indica tendência negativa de SAVI _{residual} e degradação da vegetação. A significância estatística foi testada usando teste não paramétrico Mann-Kendall ($p \leq 0.05$). .	63
Figura 24 – Valores da inclinação linear de regressão linear para as tendências de SAVI _{residual} , removendo os efeitos da variabilidade da precipitação durante o período 2001-2017. Deve-se observar que a inclinação >0 indica tendência de SAVI _{residual} positiva e recuperação de vegetação, enquanto a inclinação <0 indica tendência negativa de SAVI _{residual} e degradação da vegetação. A significância estatística foi testada usando teste não paramétrico Mann-Kendall ($p \leq 0.05$). .	64
Figura 25 – Valores da inclinação linear de regressão linear para as tendências de SAVI _{residual} , removendo os efeitos da variabilidade da precipitação durante o período 2002-2017. Deve-se observar que a inclinação >0 indica tendência de SAVI _{residual} positiva e recuperação de vegetação, enquanto a inclinação <0 indica tendência negativa de SAVI _{residual} e degradação da vegetação. A significância estatística foi testada usando teste não paramétrico Mann-Kendall ($p \leq 0.05$). .	65
Figura 26 – Comportamento temporal dos resíduos anuais de SAVI do RESTREND durante 1986-2017.	66
Figura 27 – Valores do intercepto dos valores de regressão linear para SAVI precipitação durante 1986-2017.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conceitos sobre desertificação de acordo com diversos autores.	25
Tabela 1 – Conceitos sobre desertificação de acordo com diversos autores (<i>continuação</i>).	26
Tabela 1 – Conceitos sobre desertificação de acordo com diversos autores (<i>continuação</i>).	27
Tabela 2 – Unidades e tipos de solos da área de estudo.	39
Tabela 3 – Resultados estatísticos da tendência da produtividade da vegetação.	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Bases Conceituais da Pesquisa	17
2.2	Considerações Iniciais sobre a Desertificação	21
2.3	Avaliação da desertificação utilizando o Sensoriamento Remoto	31
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	Área de Estudo	34
3.2	Dados de entrada	43
3.3	Processamento Digital de Imagens	43
3.3.1	<i>Criação de mosaicos temporais a partir de seleção medoid</i>	43
3.3.2	SAVI	44
3.4	Análise dos dados	44
3.4.1	<i>Análise estatística dos dados de precipitação</i>	44
3.4.2	<i>Correlação de Pearson</i>	46
3.4.3	<i>O método RESTREND</i>	47
4	RESULTADOS	49
4.1	Distribuição espacial e variação interanual da precipitação e do SAVI . .	49
4.2	Relação entre SAVI e a precipitação	58
4.3	Produtividade da Vegetação e mapeamento de áreas desertificadas . . .	60
5	DISCUSSÃO	68
5.1	Distribuição espacial e variação interanual da precipitação e do SAVI . .	68
5.2	Relação entre SAVI e a precipitação	69
5.3	Produtividade da Vegetação e mapeamento de áreas desertificadas . . .	69
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

O processo de desertificação é definido como sendo a degradação da terra nas regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultantes de vários fatores, incluindo as variações climáticas e atividades humanas (UNCCD, 1994), é uma problemática global com grande potencial desestabilizador do ambiente (PERINI *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2012b). Este fenômeno frequentemente é resultante de eventos naturais e antrópicos, afetando um bilhão de pessoas no mundo (REYNOLDS *et al.*, 2007; Van den Elsen; JETTEN, 2015). Quanto a sua distribuição geográfica, estima-se que as terras secas representa 47% da superfície terrestre do planeta (BASTIN *et al.*, 2017) e aproximadamente 25% já estão afetadas pelo processo de desertificação (D'ODORICO *et al.*, 2013).

Neste contexto, as variações naturais do clima em longo prazo e a degradação da vegetação são uns dos principais fatores ocasionantes da desertificação (DIOUF; LAMBIN, 2001; REYNOLDS *et al.*, 2007). Estudos tem apontado a dificuldade de distinguir as mudanças da vegetação causadas pelas variações climáticas em relação as alterações contínuas e/ou abruptas originárias das atividades antrópicas. Nesta perspectiva, a discriminação entre as forças motrizes da mudança de vegetação é necessária para compreender os mecanismos de interação entre os ecossistemas e os fatores externos e ajudar os gestores ambientais a tomar decisões efetivas que mantenham o desenvolvimento sustentável dos ecossistemas (XU *et al.*, 2018).

O Semiárido do Brasil estende-se por 1,03 milhão de km² (12% da área do País), abrangendo 1.262 municípios brasileiros e 26,62 milhares de habitantes (12% da população brasileira). Nesse ambiente, as secas hidrológicas e edáficas fazem parte da variabilidade natural de seu clima e, de acordo com as projeções de mudanças climáticas é provável que essas condições possa permanecer ou se intensificar no futuro (MARENGO; BERNASCONI, 2015). Além disso, a paisagem desta região tem sido modificada há 10.000 anos pelo processo de ocupação humana, apresentando inicialmente uma baixa densidade populacional que se tornou mais expressiva após o século XVIII com o desenvolvimento da atividade pecuária (SAMPAIO, 2009).

Há várias maneiras de avaliar a desertificação utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) CITAR TAIS MANEIRAS. Neste contexto, alguns desse métodos avaliativos da desertificação foram desenvolvidos levando em consideração as peculiaridade da variabilidade natural do clima e impactos cíclicos de eventos naturais do clima tais como *El Niño* e *La Niña*, dentre eles, um método bem estabelecido cientificamente foi a RESTREND (*residual trend*)

(EVANS; GEERKEN, 2004), que tem por base a retirada da influência de parâmetros climáticos na vegetação, assumindo a importância de outros condicionantes biofísicos da degradação vegetal (*proxi* da desertificação) bem como a ação humana. Para tanto, é estabelecido uma análise de tendência utilizando resíduos dos índices de vegetação ajustados à precipitação apresentados espacialmente com o objetivo de identificar áreas com tendências negativas, ou seja, que são caracterizadas pelo processo de desertificação, e tendências positivas que apresentam um quadro de crescimento da vegetação ou não afetadas pelo processo de desertificação, este método é amplamente utilizado em outros países como principal procedimento de avaliação da desertificação (WESSELS *et al.*, 2007; LI *et al.*, 2012a; IBRAHIM *et al.*, 2015; HE *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2016; KUNDU *et al.*, 2017; VERÓN *et al.*, 2017).

Logo, esta pesquisa partiu do seguinte questionamento: *O sinal da atividade humana como indicador do processo de desertificação no Semiárido do Brasil pode ser avaliado pela degradação vegetal?* Para tanto, foi feito um recorte espacial do setor oeste semiárido da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba incluindo as sub-bacias Taperoá e Alto Curso (estado da Paraíba, Nordeste do Brasil). Assim, estudos utilizando técnicas baseadas em séries temporais de dados coletados por sensoriamento remoto são necessários, com a proposta de avaliar os processos socioambientais que envolve o fenômeno da desertificação na Região Semiárida do Brasil.

Neste contexto, o presente estudo realizou uma análise de série temporal baseado em pixels, utilizando o índice de vegetação SAVI e dados de precipitação espacialmente explícitos do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS), tendo como objetivo detectar as áreas afetadas pelo processo de desertificação na zona semiárida da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, Nordeste do Brasil. Especificamente, buscou-se adaptar o método RESTREND utilizando-se compósitos interanuais Landsat 30 m para avaliar espaço-temporalmente a relação do SAVI (30 metros) precipitação (1986-2017).

2 FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Bases Conceituais da Pesquisa

Thomas S. Kuhn afirma que o desenvolvimento científico de forma geral é resultado de uma competição entre diversas concepções de naturezas distintas, cada uma delas buscando ser compatíveis com ditames da observação e do método (KUHN, 1998), ou seja, a “incomensurabilidade” de modos de ver o mundo e praticar ciência. Neste contexto, a noção de paradigma é definida como “[...] realizações científicas universalmente reconhecidas que, durante algum tempo fornecem problemas e soluções modelares para uma comunidade de praticantes” (KUHN, 1998, p. 58).

Um paradigma não permanece imutável, as inovações científicas sempre estão em curso, de um modo cada vez mais acelerado. Estes paradigmas emergem da consciência de “anomalia”, permitindo a identificação de um paradigma que não mais pode atender às especificações das explicações teórica-metodológicas da ciência normal. Para Kuhn (1998), a anomalia é o emergir de um fenômeno para qual o paradigma não prepara o investigador, que acaba por importunar crises, preparando o caminho para a busca de um novo paradigma diferente do anterior que atenda às necessidades.

Neste contexto, a atividade científica consiste em ajustar a natureza ao explicativo fornecido pelo paradigma. Teceremos brevemente a seguir como a Geografia Física foi afetada por esses paradigmas ao longo do tempo.

Durante os séculos XVI e XVII, com o advento da modernidade a visão de mundo passou a ser de uma “Natureza máquina”, ocorrida a partir de mudanças revolucionárias na física e astronomia (CAPRA, 1982). Dentre os diversos pensadores que colaboram no paradigma mecanicista, pode-se citar: Bacon, Galileu, Descartes, Newton e Kant – tratando da Natureza como uma máquina regida por leis deterministas e dinâmicas ordenadas, viabilizando o conhecimento sobre sua dinâmica (VICENTE; Perez, Filho, 2003; GOMES; ESPINDOLA, 2007).

Essa abordagem se tornou “reducionista”, uma análise científica metodológica que incorporou o todo fragmentado nas partes. O universo passou a ser sinônimo de máquina-sincrônica e quantitativamente ajustável, sendo as leis espaciais absolutas, ou seja, válidas em todo o universo. Esse paradigma baseou-se na crença de que o conhecimento poderia alcançar a certeza absoluta e final (VICENTE; Perez, Filho, 2003; CAMARGO, 2003).

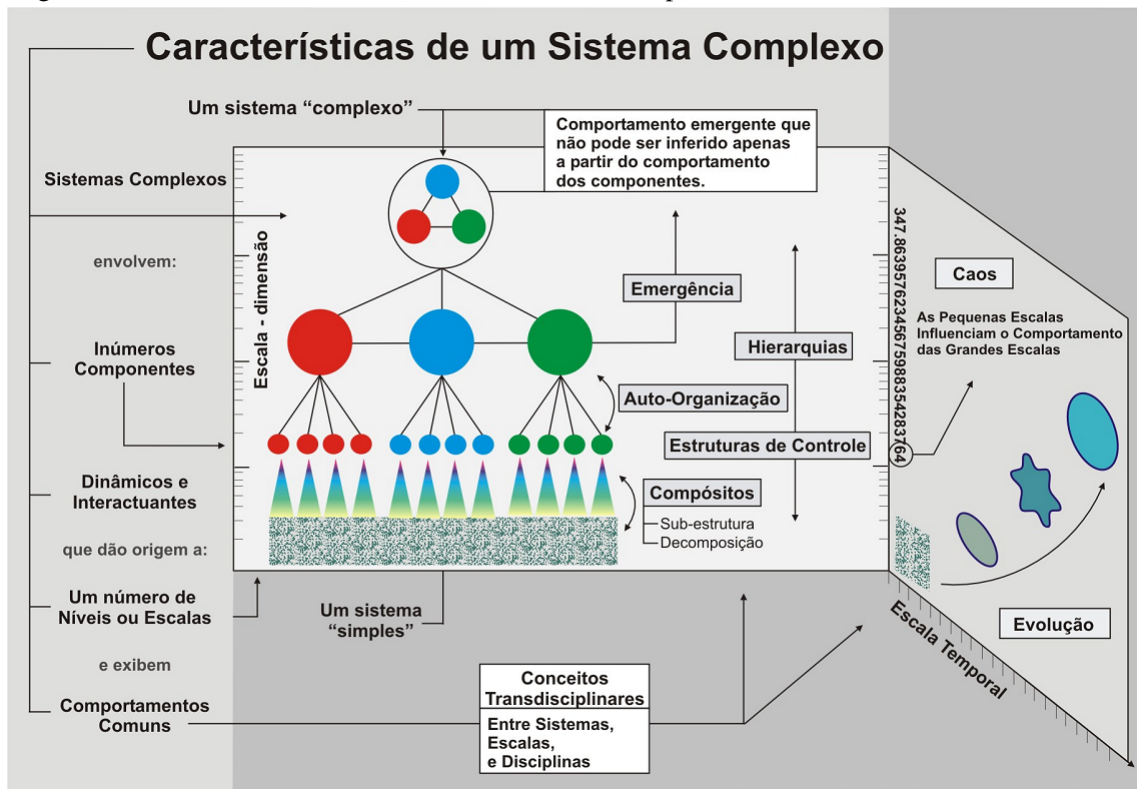
Mesmo no auge do paradigma mecanicista, sempre houve indícios de que o universo

e as leis, que supostamente o regem, não eram tão lineares, deterministas e previsíveis assim, como propunham a maioria dos pensadores da época (VICENTE; Perez, Filho, 2003). Nesta perspectiva, a formulação Teoria Geral dos Sistemas (TGS) na década de 1950 pelo biólogo Ludwig von Bertalanffy, o advento da Mecânica Quântica por Max Planck e da cibernética, os pensadores observaram que a maior parte dos objetos da Física são integrados, conjuntos de partes diversas que constituem um todo organizado, retomando a ideia de que o todo é maior que a soma de suas partes (GREGORY, 1992; CAMARGO, 2003; LIMBERGER, 2006; CAMARGO; GUERRA, 2007). O movimento científico nas décadas de 1960 e 1970, através das pesquisas de Ilya Prigogine e outros, acentuaram a focalização da abordagem sistêmica aos sistemas dinâmicos (CHRISTOFOLETTI, 2011).

Um sistema dinâmico pode ser definido como um conjunto que se encontra organizado em virtude das inter-relações entre as unidades, seu grau de organização permite que assuma a função de um todo maior que a soma de suas partes (CHRISTOFOLETTI, 1979). Os sistemas dinâmicos podem ser classificados em simples e complexos. Os sistemas simples são compostos por um conjunto de componentes relacionados conjuntamente e agindo um sobre os outros conforme determinadas leis, a lei de Newton é adequada a esse tipo de sistema (CHRISTOFOLETTI, 1999). Os sistemas dinâmicos complexos, por sua vez, podem ser definidos como sendo compostos por grande quantidade de componentes interatuantes, capazes de intercambiar informações com seu entorno condicionante e capazes, também, de adaptar sua estrutura interna como sendo consequências ligadas a tais interações (CHRISTOFOLETTI, 1999) (Figura 1).

Os sistemas mantêm relações com demais sistemas do universo no qual funcionam, podendo ser fechados, caracterizados pela permuta de energia (recebimento e perda), mas não de matéria; e abertos, aqueles nos quais ocorrem constantes trocas de energia e matéria, tanto recebendo como perdendo. Os sistemas abertos são mais comuns, podendo ser exemplificados pela bacia hidrográfica (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Figura 1 – Características de um sistema dinâmico complexo.



Fonte: Encarnação (2011).

A maioria dos fenômenos da natureza e socioeconômicos não são lineares, pode-se afirmar que os mesmos possuem comportamento dinâmico e caótico, pois deve levar em consideração que, além da grande diversidade dos elementos constituintes, há vários graus de liberdade quanto ao comportamento destes (CHRISTOFOLETTI, 2011).

O entendimento dos sistemas semiáridos a partir da abordagem sistêmica contemporânea deve lidar com a ideia de sistemas afastados do equilíbrio, possuindo um fluxo constante de energia, matéria e informação através do sistema (entropia), para que ocorra a auto-organização (CARACRISTI, 2007).

Sob essa ótica, é importante a definição de algumas características fundamentais dos sistemas ambientais, que é comum nos sistemas semiáridos, como a noção de resiliência (estabilidade), auto-organização, conectividade/padrão (CARACRISTI, 2007; JELTSCH *et al.*, 2014; HOCHSTRASSER *et al.*, 2014).

A resiliência é um retorno a um estado de equilíbrio dinâmico depois de uma perturbação temporária (ÆGISDÓTTIR; GERSTEIN, 2004; GRIMM; WISSEL, 1997; JELTSCH *et al.*, 2014). Dois tipos de resistência são comumente referidos que refletem dois aspectos diferentes da estabilidade (JELTSCH *et al.*, 2014). A primeira, denominada “resiliência da engenharia” (*engineering resilience*) (HOLLING, 1973), refere-se à velocidade com a qual um sistema volta ao equilíbrio ou estado estacionário após a perturbação (MAURER, 1987; KREBS, 1992; JELTSCH *et al.*, 2014). Em contraste, a “resiliência ecológica” (*ecological resilience*) se move para além do tempo de retorno ao equilíbrio ou estado estacionário, em reconhecer que um sistema nunca pode retornar ao seu estado pré-distúrbio, devido às instabilidades que originam múltiplos estados estáveis (HOLLING, 1973; WALKER *et al.*, 2004; JELTSCH *et al.*, 2014).

O conceito de resiliência é crucial para definir claramente o estado focal de referência ou a dinâmica do sistema (por exemplo, flutuações dentro dos padrões definidos) e o tipo de perturbação (por exemplo, uso da terra, eventos climáticos extremos) (JELTSCH *et al.*, 2014). A capacidade da resiliência “absorver” distúrbios é limitada, uma vez que essa capacidade esteja esgotada, os ecossistemas podem perder a sua estrutura e as funções de forma abrupta, em vez de forma gradual (HOLLING, 1973; JELTSCH *et al.*, 2014).

A termodinâmica depois dos anos de 1950, a partir de Prigogine e colaboradores, considerou a ideia de um sistema de dissipação, em que um sistema usa a energia para construir a estrutura e exportação de entropia. O sistema muda de estado (se organiza) pelo seu comportamento intrínseco, e pode permanecer longe do equilíbrio. Do ponto de vista cibernético, esta associação é definida em termos estatísticos, com base na probabilidade de que um determinado sistema se encontra num estado particular (JELTSCH *et al.*, 2014).

Mais recentemente, a ideia de auto-organização surge a partir dos sistemas adaptativos complexos. Tais definições tendem a surgir a partir de abordagens computacionais onde os sistemas são representados como conjuntos de elementos discretos, em vez de continua newtoniana (JELTSCH *et al.*, 2014).

A auto-organização é a emergência espontânea de novas estruturas e novas formas de comportamento em sistemas abertos, afastados do equilíbrio, caracterizados por laços de

realimentação internos: a criação de novas estruturas e novos modos de comportamento (emergências, padrões espaço-temporais) nos processos de desenvolvimento e evolução dos sistemas (CARACRISTI, 2007).

O entendimento da conectividade entre os compartimentos paisagem é fundamental para explicar as relações espaciais, a comportamento dos fluxos biofísicos e trajetórias associadas de ajuste (HOCHSTRASSER *et al.*, 2014). A conectividade é um padrão não-linear resultante dos laços de regulação que vão além do circuito de causa e efeito da retroação e da correção de erro/desvio da regulação, são laços que formam anéis recursivos que geram a capacidade auto-organizativa (CARACRISTI, 2007).

2.2 Considerações Iniciais sobre a Desertificação

A desertificação não é um fenômeno novo, embora somente a partir do século XX tenha ganhado a proporção e destaque internacional (SOUZA, 2008; NASCIMENTO, 2013). Registros históricos, como pinturas rupestres e outros documentos mostram ambientes explorados por civilizações antigas, que podem ter contribuído na formação das atuais paisagens desertificadas do globo. Esse é o caso, no período neolítico, de alguns povos que desenvolveram forte atividade pastoril de criação bovina em áreas cobertas por vegetação savânica, onde está localizado atualmente o deserto do Saara (SOUZA, 2008; NASCIMENTO, 2013) e também de vestígios arqueológicos encontrados no Sahel (região semiárida, ao sul do Saara), testemunhando que ali havia uma população significativamente maior que a atual. Da mesma forma, o atual deserto de Rajhastan, no norte da Índia, foi, no passado, sede de importantes civilizações (SOUZA, 2008).

O primeiro caso razoavelmente bem documentado de degradação da terra ocorreu na Mesopotâmia (CONACHER, 2004). As civilizações antigas dessa região utilizaram de forma intensiva técnicas de irrigação nos cursos inferiores dos rios Tigre e Eufrates (CONTI, 2008; NASCIMENTO, 2013). A colheita principal era o trigo, havendo relatos de que o aumento da salinidade dos solos causou uma mudança deste cultivo para a cevada, mais tolerante ao sal, por volta de 3.500 a.C. A partir daí, as proporções das duas colheitas passaram a ser aproximadamente iguais. Entretanto, em 1.700 a.C., o trigo havia sido abandonado completamente. Eventualmente até mesmo a cevada não pôde ser cultivada e as populações dos reinos da Suméria e Akkad tiveram que abandonar a área (CONACHER, 2004).

Durante o período clássico até a idade média, não existia uma sistematização da relação das ações humanas com a expansão de áreas desertificadas, atribuindo essas paisagens à causas

naturais. Só depois da chamada “Troca Colombiana”, que as percepções e os entendimentos de desertos e terras secas começaram a mudar de maneira significativa. A Era da Exploração, quando os europeus “descobriram” o Novo Mundo, trouxe novos conhecimentos de ambientes muito diferentes, especialmente os trópicos e as ilhas tropicais (DAVIS, 2016).

Durante o século XVI, ocorreu o desenvolvimento do capitalismo e colonialismo primitivo, que junto com as primeiras articulações teóricas da dessecação, ou seja, da ligação entre o desmatamento e formação de desertos, foi formado as primeiras premissas teóricas do conceito de desertificação (SOUZA, 2008; DAVIS, 2016).

A teoria da dessecação incluiu a ideia de que o desmatamento faz com que o clima seque e diminua a chuva e também, que o reflorestamento restaura a chuva perdida e cria uma atmosfera geralmente mais úmida (GROVE, 1995). Os primeiros trabalhos sobre essa teoria foram realizados por Edmund Halley, John Woodward e Stephen Hales, que concentraram-se principalmente nos efeitos benéficos do desmatamento, destacando os benefícios à saúde e à agricultura em climas continentais frios e úmidos como o leste da América do Norte (DAVIS, 2016). Em meados do século XVIII, essa perspectiva começou a mudar e, nas décadas de 1760 e 1770, funcionários coloniais como Pierre Poivre e Joseph Banks faziam conexões entre desmatamento, a aparente dessecação e a criação de condições semelhantes ao deserto, além das experiências europeias de administração das colônias e do planejamento da agricultura, principalmente nas ilhas tropicais, incluindo o Caribe, o Sul do Pacífico e o Oceano Índico, revelando sérias consequências após o desmatamento, como erosão do solo (GROVE, 1995; GROVE, 1997; DAVIS, 2016).

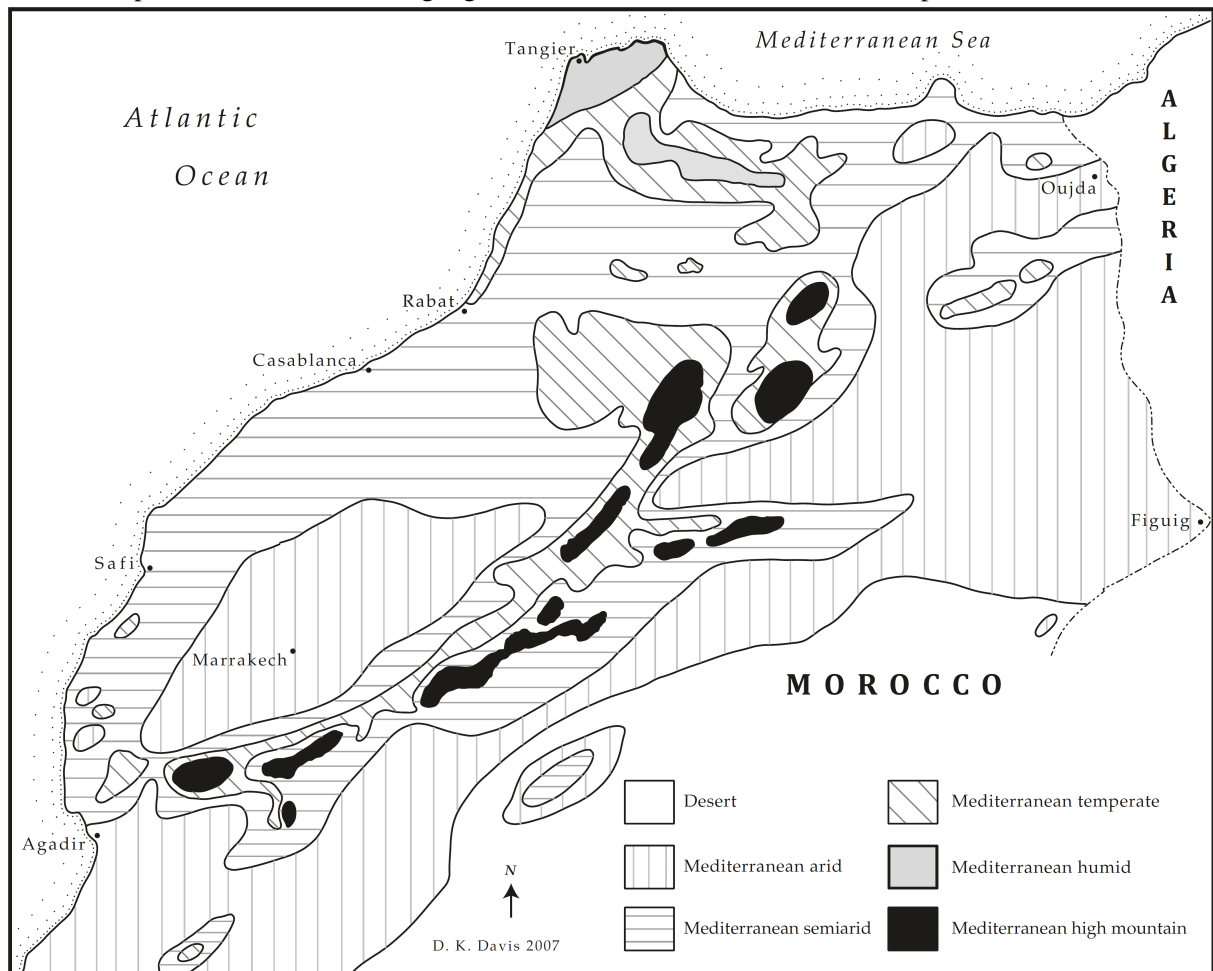
Após o término do século XVIII, a teoria da dessecação tornou-se dominante na Europa, especialmente na Grã-Bretanha e França. O desenvolvimento do capitalismo, a ascensão do liberalismo econômico e a influência do movimento do “melhoramento agrícola” levaram ao desenvolvimento de percepções negativas sobre criação de bovinos, que teve influência direta nas noções ocidentais do conceito de desertificação (DAVIS, 2016).

Durante o século XIX e início do século XX, o entendimento que o ambiente foi desflorestado, degradado e desertificado é encontrado na ecologia vegetal (DAVIS, 2016). Alexander von Humboldt afirmou que o nível do Lago de Valência (Venezuela) caiu precipitadamente devido em grande parte ao desmatamento das colinas e montanhas que cercavam a bacia do lago (HUMBOLDT; BONPLAND, 1819), trazendo evidências científicas da ligação do desmatamento com a dessecação.

No caso da França, os estudos da fitossociologia definiram a vegetação natural (ou potencial) por uma espécie dominante (quase sempre árvores) que se presume ter existido em um estado anterior “natural”, não perturbado, abordagem que se tornou dominante em toda Europa, intimamente relacionada ao trabalho de Tansley sobre os ecossistemas e ao trabalho de Clement sobre sucessão e vegetação clímax (DAVIS, 2016).

Louis Emberger usou este método para construir seus mapas de vegetação potencial de Marroco, deduziu que grande parte das zonas bioclimáticas do Mediterrâneo foram gravemente degradadas. Emberger usou o Marrocos como o exemplo perfeito, pois acreditava ser uma amostra de todas as séries de vegetação e zonas bioclimáticas encontradas na Região mediterrânea. Seu objetivo era identificar e delimitar todas as zonas climáticas da Região mediterrânea e a vegetação “natural” associada a elas usando a fitossociologia e noções de sucessão e vegetação clímax. Emberger veio a chamar essas zonas bioclimáticas de “*étages bioclimatiques*”, um termo que tornou-se amplamente adotado (DAVIS, 2018). Usando este método, calculou que 85% da área que “deveria” ser florestada foi desmatada (EMBERGER, 1934) (Figura 2).

Figura 2 – Os estágios da vegetação em Marrocos. Este mapa ilustra como Emberger desenhou cinco das principais zonas de vegetação (excluindo os desertos) de Marrocos em 1934. Este mapa é um precursor do sistema fitogeográfico detalhado de Marrocos. Criado por Diana K. Davis.



Fonte: Davis (2007).

No início do século XX, o termo “desertificação” foi usado pela primeira vez cientificamente por Lavauden (LAVAUDEN, 1927) no contexto da baixa produtividade das pastagens em terras mal geridas na Tunísia (DREGNE, 2002; BRAUCH, 2006; D’ODORICO *et al.*, 2013; SILVA; SILVA, 2015). Lavauden descreveu o empobrecimento extremo da cobertura vegetal do deserto causado pela imprevidência de nômades e do sobre-pastoreio de seus rebanhos, ou seja, atribuindo a ação humana (BRAUCH, 2006). Entretanto, este termo é mais comumente creditado a engenheiro florestal Aubréville (AUBRÉVILLE, 1949), que observou que o desmatamento da floresta na África Ocidental causou erosão e deterioração da terra ou “desertificação”.

Em ambos os casos, o termo foi usado para denotar o resultado de um processo de degradação da terra induzido pela ação humana e pela gestão precária da terra (D’ODORICO *et al.*, 2013). Desde então, vários autores e agências forneceram sua própria definição do problema. Isto levou, em alguns casos, a um exercício estéril que produziu uma miríade de definições e

elevada confusão (VERSTRAETE *et al.*, 2009; D'ODORICO *et al.*, 2013) (Tabela 1).

Tabela 1 – Conceitos sobre desertificação de acordo com diversos autores.

Crítérios	Conceitos	Autor
Humano	Degradação da cobertura vegetal para o desenvolvimento de campos cultivados.	Aubréville (1949)
Humano/Climático	A desertificação é provocada pela ação humana ou por mudanças climáticas.	Rapp (1974)
Humano	Degradação de vários tipos de vegetação e áreas com precipitações médias entre 50 e 300 mm/ano.	Le Houérou (1977)
Humano	Desertificação em geótopos semiáridos, subúmidos secos em seus ecótonos, e a problemática no Brasil Intertropical.	Ab'Sáber (1977)
Humano	Menor produtividade útil (para humanos).	Johnson (1977)
Humano	A redução ou destruição do potencial biológico da terra (que) pode levar em última instância a condições desérticas. Isso faz parte da deterioração dos ecossistemas e da diminuição ou destruição do potencial biológico (por exemplo, produção vegetal e animal) para usos múltiplos, quando o aumento da produção é necessário para suportar o crescimento da população.	UNCOD (1977b)
Humano	Condicionalizada pela instabilidade ecológica, consequente do regime pluviométrico com baixos índices e irregulares, solos rasos com baixa capacidade de retenção d'água, amplo fotoperíodo e ventos secos e quentes desidratantes.	Vasconcelos-Sobrinho (1977)
Humano/Climático	Um aspecto da deterioração generalizada dos ecossistemas sob a pressão combinada de um ambiente adverso e flutuante e exploração excessiva.	UNCOD (1977a)

Fonte: Adaptada de Nascimento (2013).

Tabela 1 – Conceitos sobre desertificação de acordo com diversos autores (*continuação*).

Crítérios	Conceitos	Autor
Humano/Climático	Relação da densidade populacional em 1980 (uma pessoa para 10 hectares de área seca) promove sintomas de saarização.	Duque (1980)
Humano	O empobrecimento dos ecossistemas por impacto humano... a deterioração...	Dregne (1985)
Humano/Climático	Diminuição irreversível da produtividade biológica das terras árida e semiáridas, como resultado das pressões causadas pelas pessoas (por exemplo, o crescimento da população) e fatores abióticos (por exemplo, a variação na precipitação e mudanças no clima em longo prazo).	Gorse e Steeds (1987)
Humano	Esgotamento dos ecossistemas terrestres como resultado de atividade humana.	Dregne (1987)
Humano/Climático	Processo de deterioração ambiental; mudanças e vicissitudes climáticas e uso inadequado do solo. Havendo mudança climática (global ou regional), o processo tende à desertificação. Não havendo tal mudança e a ação humana sendo decisiva, tende a semidesertificação.	Miner (1980), Nimer (1988)
Humano	Degradação do “capital ecológico”.	Rochette (1989)
Humano/Climático	Questionamento sobre a redução dos totais pluviométricos anuais a partir das atividades sociais.	Goudie (1990)
Climático	A expansão das condições desérticas e paisagens onde não deveriam ocorrer climaticamente.	Graetz (1991)
Humano/Climático	Desertificação... é a expansão das condições desérticas com baixa produtividade biológica devido ao impacto humano sob as variações climáticas.	Helldén (1991)
Humano/Climático	Consideração do índice de aridez da Unep e uso de indicadores de desertificação.	Rodrigues <i>et al.</i> (1992)
Humano	A interferência humana no meio físico provocado rupturas da dinâmica geoecologia e a degradação das terras pode ser irreversível.	Chou e Dregne (1993)

Fonte: Adaptada de Nascimento (2013).

Tabela 1 – Conceitos sobre desertificação de acordo com diversos autores (*continuação*).

Crítérios	Conceitos	Autor
Humano	Desertificação, manifestada pela seca, é causada por atividades humanas em que a capacidade de carga do terreno é ultrapassada, isso ocorre por mecanismos naturais ou induzidas pelo homem, e manifesta-se por etapas complexas de vegetação e a deterioração do solo, resultando numa diminuição na destruição irreversível do potencial biológico da terra e a sua capacidade para suportar a população.	Mainguet (1994)
Humano/Climático	Há generalizações, interpretações confusas e equivocadas no conceito de desertificação.	Rubio (1995)
Humano/Climático	Degradação da terra... resultado do impacto humano negativo.	UNEP (1997)
Humano	O processo de degradação ambiental em áreas não arenosas onde a frágil ecologia é alterada por atividades humanas excessivas.	Zha e Gao (1997)
Humano/Climático	Criação de condições semelhantes às dos desertos, desertificação humana (ecológica); deficiência de água no sistema natural, desertificação natural (climática). Ou ainda ambos os processos, simultaneamente.	Conti (2002)
Humano/Climático	É uma mudança nas propriedades do solo, vegetação e clima, o que resulta em uma perda persistente de serviços ambientais que são fundamentais para a manutenção da vida.	D’Odorico <i>et al.</i> (2013)

Fonte: Adaptada de Nascimento (2013).

Na década de 1950, a *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) lançou um programa de pesquisa sobre zonas secas. Dez anos depois, 30 volumes científicos de alta qualidade foram publicados com o apoio de 200 institutos de pesquisa, que foram criados para esse fim nas regiões áridas do planeta. Foi a primeira análise ambiental científica no quadro da Organização das Nações Unidas (ONU) nessas áreas (MAINGUET, 2003).

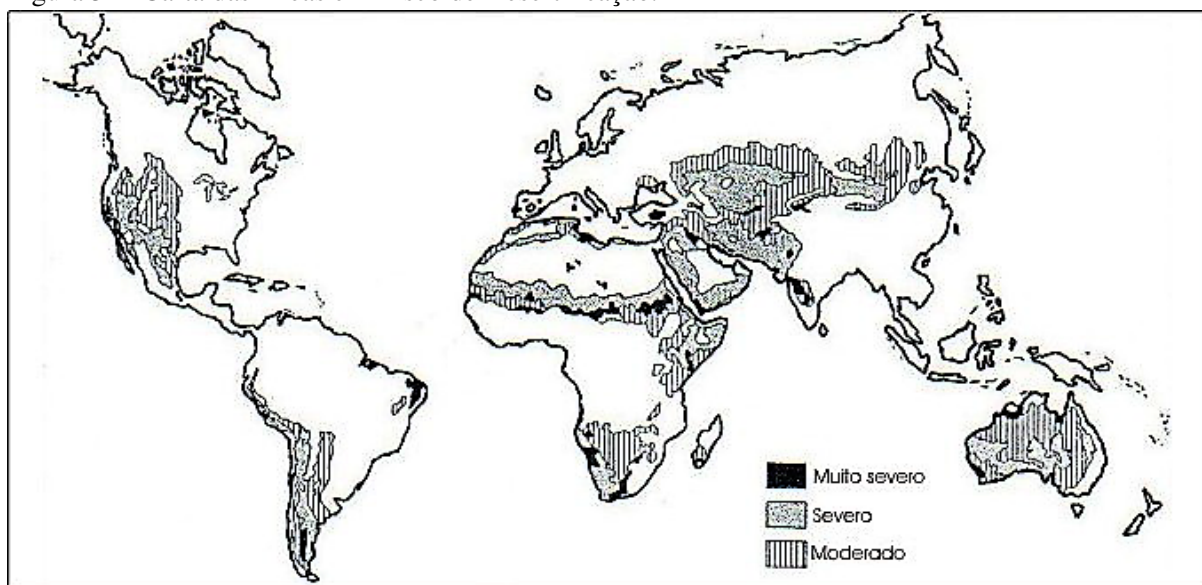
O destaque para o tema desertificação ocorreu após a Conferência das Nações Unidas sobre Desertificação, em 1977, motivada por preocupações sociais e ambientais causadas pela explosão da seca severa e da fome, entre 1968 e 1972, na região subsaariana do Sahel na África (MAINGUET, 2003; DAVIS, 2016). Esta conferência propôs um Plano de Ação para Combater a Desertificação (PACD) com 28 recomendações para atividades detalhadas. O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) recebeu a missão de implementar o PACD e preparar atividades de acompanhamento (MAINGUET, 2003). Esta conferência também

forneceu a primeira definição oficial:

A diminuição ou a destruição do potencial biológico da terra, que pode finalmente conduzir a condições desérticas. É um aspecto da deterioração generalizada dos ecossistemas, e diminuiu ou destrói o potencial biológico, ou seja, plantas e produção animal, para fins de uso múltiplo, em um momento em que o aumento da produtividade é necessário para suportar as populações que crescem em busca do desenvolvimento de fatores importantes na sociedade contemporânea - na luta pelo desenvolvimento e o esforço para aumentar a produção de alimentos, e para adaptar e aplicar modernas tecnologias, contra o crescimento da população e mudanças demográficas, numa rede de causa e efeito. Em geral, a busca cada vez maior da produtividade intensificou a exploração e levou a perturbação pelo homem em terras menos produtivas e mais frágeis. Superexploração dá origem à degradação da vegetação, do solo e da água, a três elementos que servem como fundamento natural para a existência humana. Nos ecossistemas extremamente frágeis, tais como aqueles à margem do deserto, a perda de produtividade biológica, através da degradação dos recursos vegetais, animais, solo e água pode facilmente tornar-se irreversíveis e redução permanente sua capacidade de sustentar a vida humana. Desertificação é um processo de auto-aceleração, alimentando-se de si mesmo, e à medida que avança, os custos de reabilitação tende a subir exponencialmente. Ação de combate à desertificação é necessária com urgência antes que os custos do aumento de reabilitação, além da possibilidade prática, ou antes, da oportunidade do ato seja perdido para sempre (UNCOD, 1977b, p. 88).

Nessa reunião foi estabelecido, através de uma metodologia desenvolvida por Thornthwaite (1941), posteriormente ajustada por Penman (1952), o Grau (ou Índice) de Aridez entre 0,21 e 0,65 para a aplicação do Plano de Ação para Combater a Desertificação (PACD), o que implica que toda área de clima semi-árido e sub-úmido seco estaria sujeita ao processo (aproximadamente 30% da superfície terrestre) e, portanto, mereceria a atenção das Nações Unidas. Com base nesse índice, foi criado nessa reunião um mapeamento preliminar, onde esse processo poderia ocorrer (Figura 3).

Figura 3 – Carta das Áreas em Risco de Desertificação.



Fonte: Mainguet (1995).

A definição de desertificação atualmente empregada pelas Nações Unidas foi adotada na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano da (UNCED) realizada no Rio de Janeiro, Brasil, (Rio 92 ou Eco 92) em 1992 (DREGNE, 2002; PEREIRA; NASCIMENTO, 2013). A *United Nations Convention to Combat Desertification* (UNCCD) estabelece que “por a degradação da terra em áreas sub-úmidas áridas, semiáridas e secas, resultantes de vários fatores, incluindo variações climáticas e atividades humanas” (UNCCD, 1994, p. 4). Nessa definição, é claro que a desertificação, no contexto da degradação da terra, se aplica apenas às terras secas. A degradação da terra, por sua vez, é definida como a diminuição ou destruição da produtividade biológica da terra. Terra refere-se a solos, plantas e recursos hídricos (D’ODORICO *et al.*, 2013).

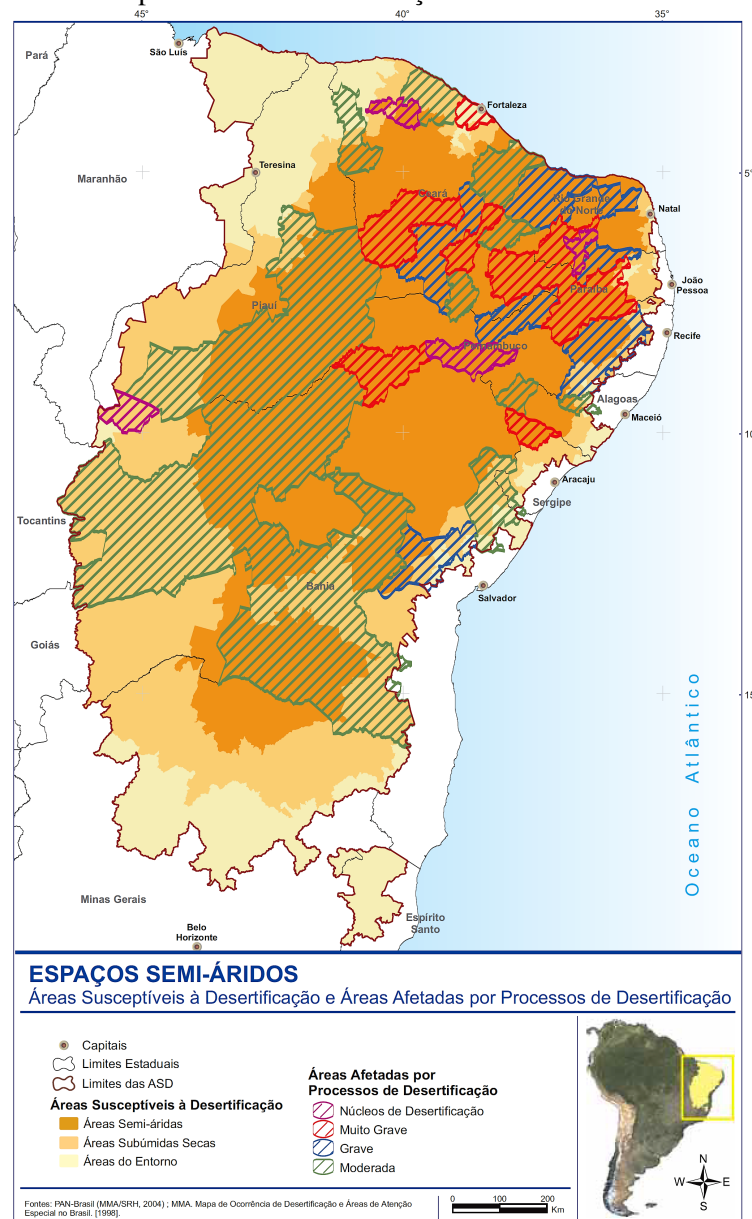
A desertificação está intimamente ligada à alta sobre-exploração dos serviços ecossistêmicos indicados por fenômenos físicos, biológicos e sociais, incluindo a erosão do solo, a redução da biodiversidade e produtividade biológica, mas também por taxas de crescimento populacional altos e gestão da terra insustentável (MACE *et al.*, 2005).

Além disso, o bem-estar humano está em questão, devido aos elevados custos que têm os países em desenvolvimento com impactos desse fenômeno, e são estimados em 4 a 8% do PIB (EMG, UN, 2011). As áreas desertificadas, particularmente nos dias atuais, são geralmente ocupadas por uma população humana com baixo poder aquisitivo, com alta taxa de mortalidade infantil e de fome entre as crianças em todo o mundo (MACE *et al.*, 2005).

Na região semiárida do Brasil, esse processo tem causado graves consequências socioam-

bientais. Sua ocorrência geográfica é observada, especialmente, nos ambientes denominados de “Áreas Susceptíveis à Desertificação (ASD)”, conforme definidas no Plano de Ação Nacional de Combate à Desertificação - Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação (PAN) (BRASIL, 2005). Essas áreas englobam a porção semiárida e sub-úmida seca do território Nacional, abrangendo todos os Estados da Região Nordeste, quatro foram caracterizadas como de alto risco à desertificação conhecidas como Núcleos de Desertificação de Gilbués (PI), Irauçuba (CE), Seridó (PB) e Cabrobó (PE) (BRASIL, 2007) (Figura 4).

Figura 4 – Áreas susceptíveis à desertificação e áreas afetadas por processos de desertificação.



Fonte: BRASIL (2007).

2.3 Avaliação da desertificação utilizando o Sensoriamento Remoto

A detecção rápida e precoce é necessária para evitar a contínua deterioração socioambiental causada pela desertificação (HIGGINBOTTOM; SYMEONAKIS, 2014). Dada a natureza espaço-temporal da desertificação, o grau de desenvolvimento de muitas nações vulneráveis, fazem dos sistemas baseados na observação da terra uma opção viável para o estabelecimento de redes de monitoramento (SYMEONAKIS; DRAKE, 2004; BAI *et al.*, 2008).

Nas últimas duas décadas, os satélites forneceram dados para monitoramento global dos ecossistemas a longo prazo, com vantagens que incluem economia de tempo e ampla varredura espaço-temporal para captar processos biofísicos e eventos de mudança, incluindo distúrbios naturais e antropogênicos (LHERMITTE *et al.*, 2011; ALBALAWI; KUMAR, 2013). Assim, o Sensoriamento Remoto (SR) tem se mostrado uma ferramenta essencial para avaliação da desertificação, sua utilização por instituições, órgãos e acadêmicos têm mostrado sua importância no desenvolvimento de políticas de gestão e planejamento em terras secas da escala local à planetária (ALBALAWI; KUMAR, 2013; STELLMES *et al.*, 2015).

Uma série de indicadores resultantes da observação da terra por sensores orbitais podem ser utilizados para avaliar a desertificação em zonas secas (HOCHSTRASSER *et al.*, 2014). A produtividade biológica é um dos fatores-chave que descrevem o funcionamento de um ecossistema e é explicitamente declarado na definição de desertificação/degradação da terra da UNCCD (BARRIO *et al.*, 2010; EISFELDER *et al.*, 2012; HOCHSTRASSER *et al.*, 2014). Dentre os indicadores da produtividade, a biomassa tem sido comumente empregado (HOCHSTRASSER *et al.*, 2014) a partir da captação distinta da assinatura espectral da vegetação (STELLMES *et al.*, 2015). Um índice de vegetação consolidado internacionalmente é o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (um *proxy* da biomassa vegetal), calculado a partir da informação espectral do vermelho e infravermelho próximo (ROUSE *et al.*, 1973; TUCKER, 1979).

Nessa perspectiva, os métodos baseados em SR para avaliação da desertificação foram desenvolvidos. Dentre eles, um método bem estabelecido foi a *Residual Trend* (RESTREND) (EVANS; GEERKEN, 2004). Este método é relativamente novo e tem o objetivo de distinguir mudanças da vegetação causadas pelas variações climáticas e aquelas induzidas pelas atividades humanas, utilizando análise residual entre do NDVI e dados climáticos, mas comumente a precipitação.

Quanto aos dados de NDVI, os de baixa (*Advanced Very High Resolution Radiometer* [AVHRR] ≥ 1 km) e moderada resolução espacial (*Moderate Resolution Imaging Spectroradio-*

meter [MODIS] ≥ 250 m) são amplamente utilizados para monitorar tendências na produtividade primária, para fins de avaliação da desertificação em estudos de séries temporais em diversas regiões secas do planeta (COLLADO *et al.*, 2002; PRINCE *et al.*, 2009; VERÓN; PARUELO, 2010; AN *et al.*, 2014; ECKERT *et al.*, 2015; IBRAHIM *et al.*, 2015; MIAO *et al.*, 2015; MUNSON *et al.*, 2016; KUNDU *et al.*, 2017; LIAN *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2017; ZEWDIE *et al.*, 2017). As vantagens do emprego desses dados são possuírem mais de 15 anos de observação contínua da superfície do planeta. Entretanto, estudos que utilizaram esses dados possuem limitações em relação a detecção desse fenômeno em escala local, que apresentam fatores explicativos mais diversos para ocorrência da desertificação em dimensões espaciais mais detalhados (LEROUX *et al.*, 2017).

Além disso, o uso do NDVI em terras secas têm algumas limitações bem conhecidas devido à sua sensibilidade ao brilho do solo de fundo, especialmente quando a biomassa esparsa é a influência da interferência do solo, portanto, não é aconselhável aplicar o NDVI em regiões com um valor médio de NDVI $<0,1$ (PRICE, 1993; ELMORE *et al.*, 2000; EISFELDER *et al.*, 2012; HIGGINBOTTOM; SYMEONAKIS, 2014). Alguns índices de vegetação mais avançados superam esses problemas, como o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (HUETE *et al.*, 2002), *Soil-adjusted vegetation index* (SAVI) (HUETE, 1988) e o *Modified Soil-adjusted Vegetation Index* (MSAVI) (QI *et al.*, 1994a; QI *et al.*, 1994b).

Nesse sentido, com o avanço tecnológico e de arquitetura foram desenvolvidas novas formas de armazenamento, processamento e análise de banco de dados geográficos. Uma dessas conquistas foi a plataforma baseada em computação nuvem *Google Earth Engine* (GEE): <https://earthengine.google.com>, que possibilitou utilizar um grande banco de dado geoespacial em escala de petabytes disponíveis gratuitamente, aplicando-se uma variedade de algoritmos em alta performance (GORELICK *et al.*, 2017). Diversos trabalhos científicos têm mostrado sua potencialidade para análises espaciais (HANSEN *et al.*, 2013; STURROCK *et al.*, 2014; HARRIS *et al.*, 2014; LOBELL *et al.*, 2015; PATELA *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2015; DONG *et al.*, 2016; SOULARD *et al.*, 2016; ROBINSON *et al.*, 2017).

O GEE representa um avanço no campo geotecnológico, expandido as oportunidades de caracterizar e monitorar distúrbios nos ecossistemas em escalas locais e regionais, utilizando-se dados orbitais com resolução espacial mais detalhadas, como os provenientes do satélite *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat) (WOODCOCK *et al.*, 2008; LOVELAND; DWYER, 2012). A validade da utilização deste satélite na detecção de áreas desertificadas pode ser um desafio

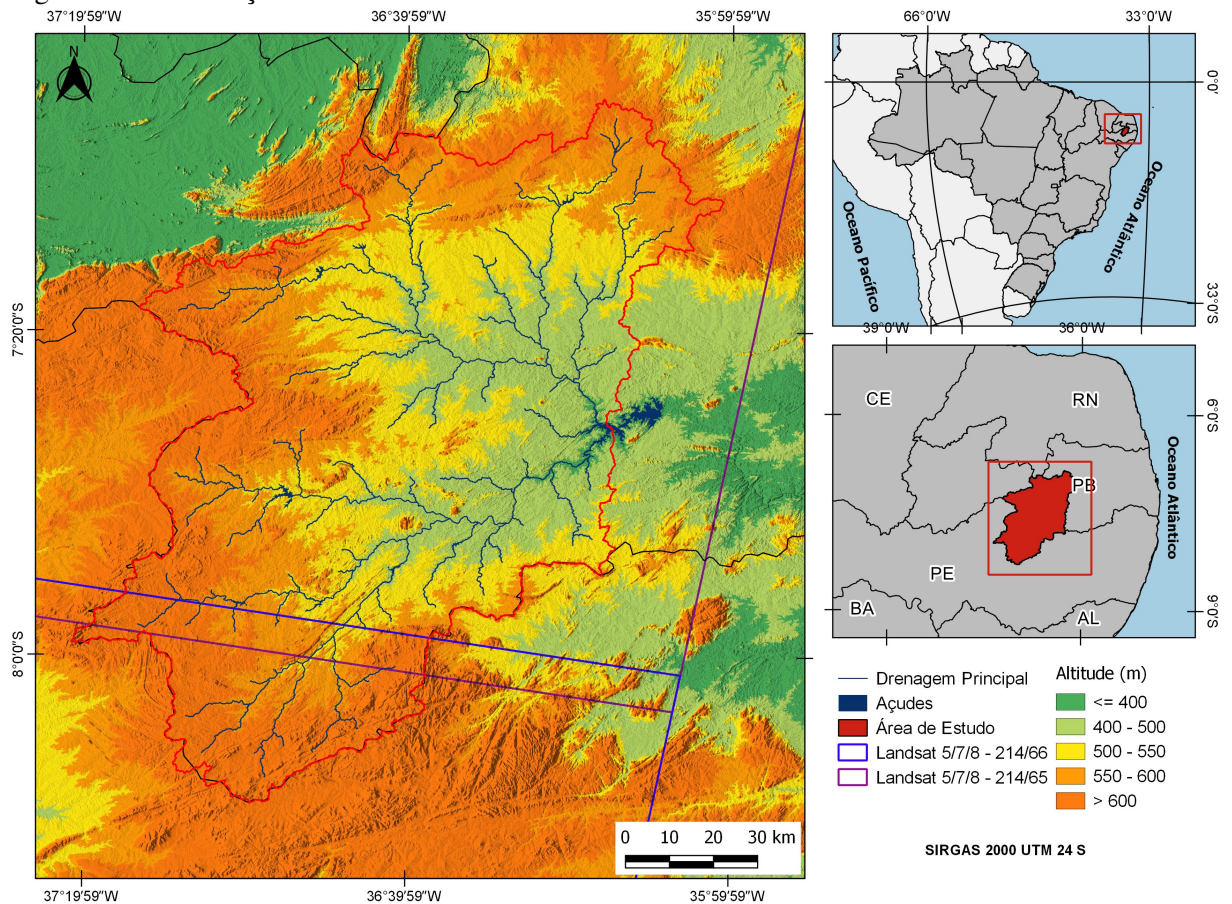
metodológico para reduzir os efeitos atmosféricos (presença de nuvens e sombras), que diminui a disponibilidade de imagens de boa qualidade, gerando ruídos na resolução temporal (BECERRIL-PIÑA *et al.*, 2015). No presente estudo, utilizou-se o GEE para aumentar a qualidade das imagens a partir da abordagem baseada na escolha de melhores pixels e, assim, estas falhas podem ser minimizadas criando-se mosaicos temporais anuais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

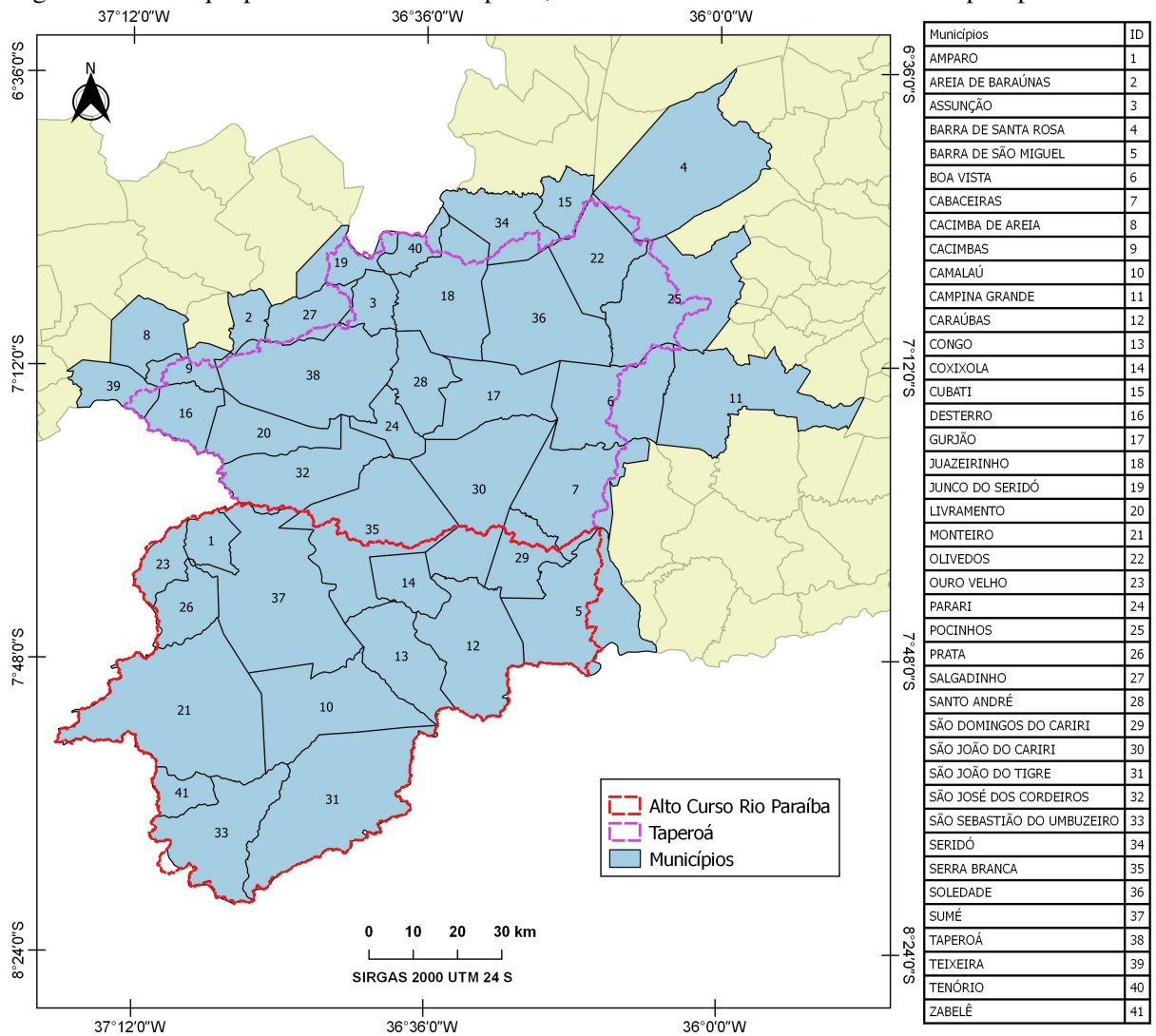
A área de estudo compreende territorialmente ao perímetro semiárido da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba ($8^{\circ}18'15''$; $6^{\circ}51'20''$ S; $37^{\circ}21'26''$; $36^{\circ}01'04''$), que é composta pelas sub-bacias Alto Curso e Taperoá, abrangendo, de forma total ou parcial, 41 municípios e cobrindo uma área de 12.251,315 km². Localiza-se na Mesorregião da Borborema, Microrregião do Cariri Ocidental e Oriental do estado da Paraíba (Nordeste do Brasil) (Figura 5).

Figura 5 – Localização de área de estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6 – Destaque para a sub-bacia do Taperoá, Alto curso do Rio Paraíba e os municípios pertencentes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

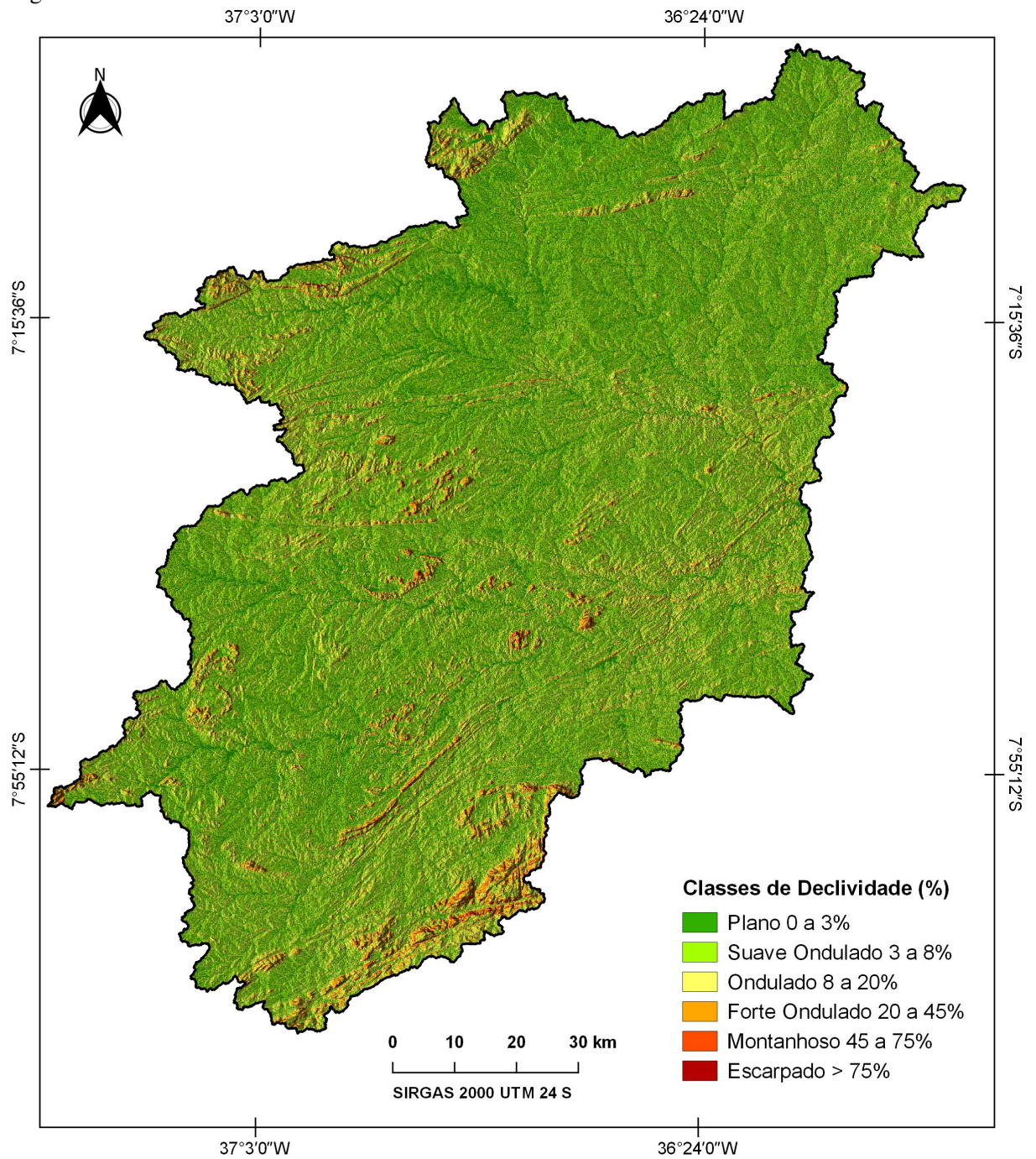
De acordo com a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013), o clima da região é marcado por dos tipos Clima Semiárido quente (Bsh) e nas altitudes mais elevadas o Clima tropical quente e úmido (As) devido aos efeitos orográficos. Durante os meses de novembro a março, a atividade convectiva é influenciada principalmente pela instabilidade provocada pela atuação de ciclones, denominados de Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) originários no oceano Atlântico e sua trajetória normalmente é de leste para oeste (ALVES *et al.*, 1996; FERREIRA; MELLO, 2005). Entre os meses de fevereiro a maio (quadrimestre mais chuvoso), têm-se a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é o principal sistema atmosférico causador de chuvas na região (ALVES *et al.*, 1996; FERREIRA; MELLO, 2005). No período de março a junho, frequentemente ocorre, propagação dos Complexos Convectivos de Mesoescala, que se originam de perturbações ao sul da ZCIT no oceano Atlântico. Eles

costumam sofrer uma intensificação bastante acentuada quando interagem com a topografia, sobretudo com as serras da Borborema (Gomes, Filho *et al.*, 2003).

A área está inserida no Planalto da Borborema, agrupando as compartimentações tectono-estratigráficas: Terreno Rio Grande do Norte e o Domínio Transversal. O Terreno Rio Grande do Norte, compreende Seridó (FSE), uma faixa plataformar a turbidítica neoproterozóica, o Terreno São José do Campestre (TJC), um bloco arqueano/ paleoproterozóico que inclui ainda alóctones. Limita-se com o Domínio Transversal a partir do Lineamento Patos, um limite crustal formado por um feixe de zonas de cisalhamento dúctil (SANTOS *et al.*, 2002). O Domínio Transversal abrange na área, os terrenos Alto Pajeú (TAP), Alto Moxotó (TAM) e Rio Capibaribe (TRC). A elevação varia aproximadamente de 360 a 1.130 m. O relevo apresenta suave e ondulado em sua maior parte (Figura 7).

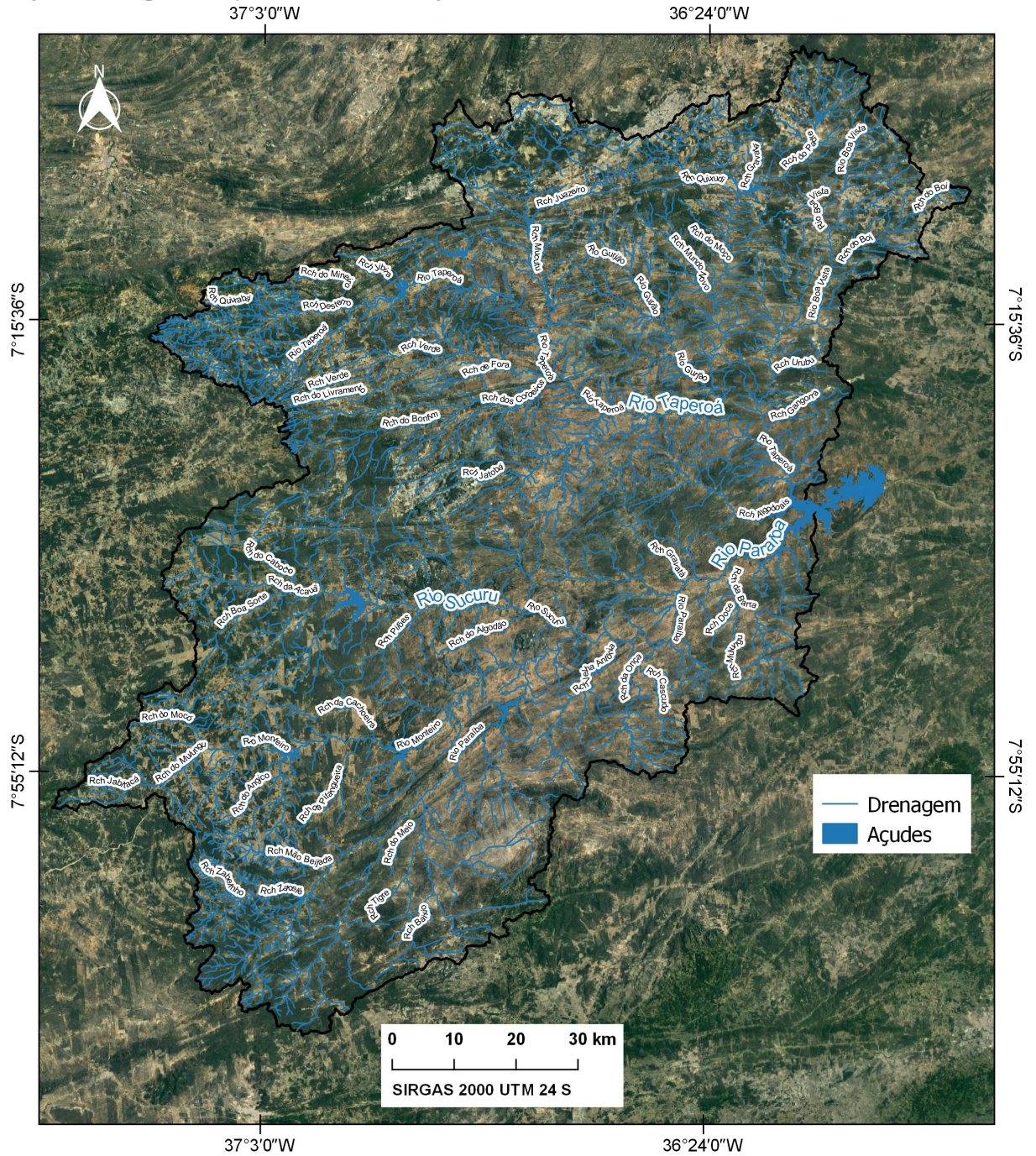
A sub-bacia do Rio Taperaú recebe contribuições dos rios São José dos Cordeiros, Floriano, Soledade e Boa Vista e dos riachos Carneiro, Mucuí e da Serra. Enquanto o Alto Curso do Rio Paraíba tem como curso hídrico principal o rio Paraíba que nasce na confluência dos rios Sucurú e do Meio no limites do município de Sumé-PB. Além dos rios do Meio e Sucurú, que são afluentes pela margem esquerda, nessa região o Paraíba recebe as contribuições dos rios Monteiro e Umbuzeiro, pela margem direita (Figura 8).

Figura 7 – Declividade da área de estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 – Espacialização da rede de drenagem.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A maior parte dos solos da área de estudo são originários de rochas cristalinas, predominantemente rasos, argilosos, pouco lixiviados, com domínio de erosão em lençol e fertilidade variada, embora, nesse último aspecto, predominem boas condições para o desenvolvimento da agricultura (BRASIL, 1972; SOUZA, 2008) (Figura 9 e Tabela 2). Segundo Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), as unidades de solos estão representados na Figura 9, classificação atualizada de com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos de 2018 (SBCS, 2018).

Tabela 2 – Unidades e tipos de solos da área de estudo.

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO TAXONÔMICA	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)
AR	Afloramento de Rocha	69,86	0,572
PVA	Argissolos Vermelho-Amarelos	69,78	0,572
CH	Cambissolos Húmicos	71,57	0,586
LA	Latossolos Amarelos	0,38	0,003
TC	Luvissolos Crômicos	4.361,65	35,733
RY	Neossolos Flúvicos	530,73	4,348
RL	Neossolos Litólicos	4.421,93	36,226
RR	Neossolos Regolíticos	954,10	7,816
SN	Planossolos Nátricos	998,92	8,184
VG	Vertissolos Hidromórficos	727,47	5,960

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota – Com base no mapa de solos da AESA, 1:100000. Classificação atualizada de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos de 2018 (SBCS, 2018).

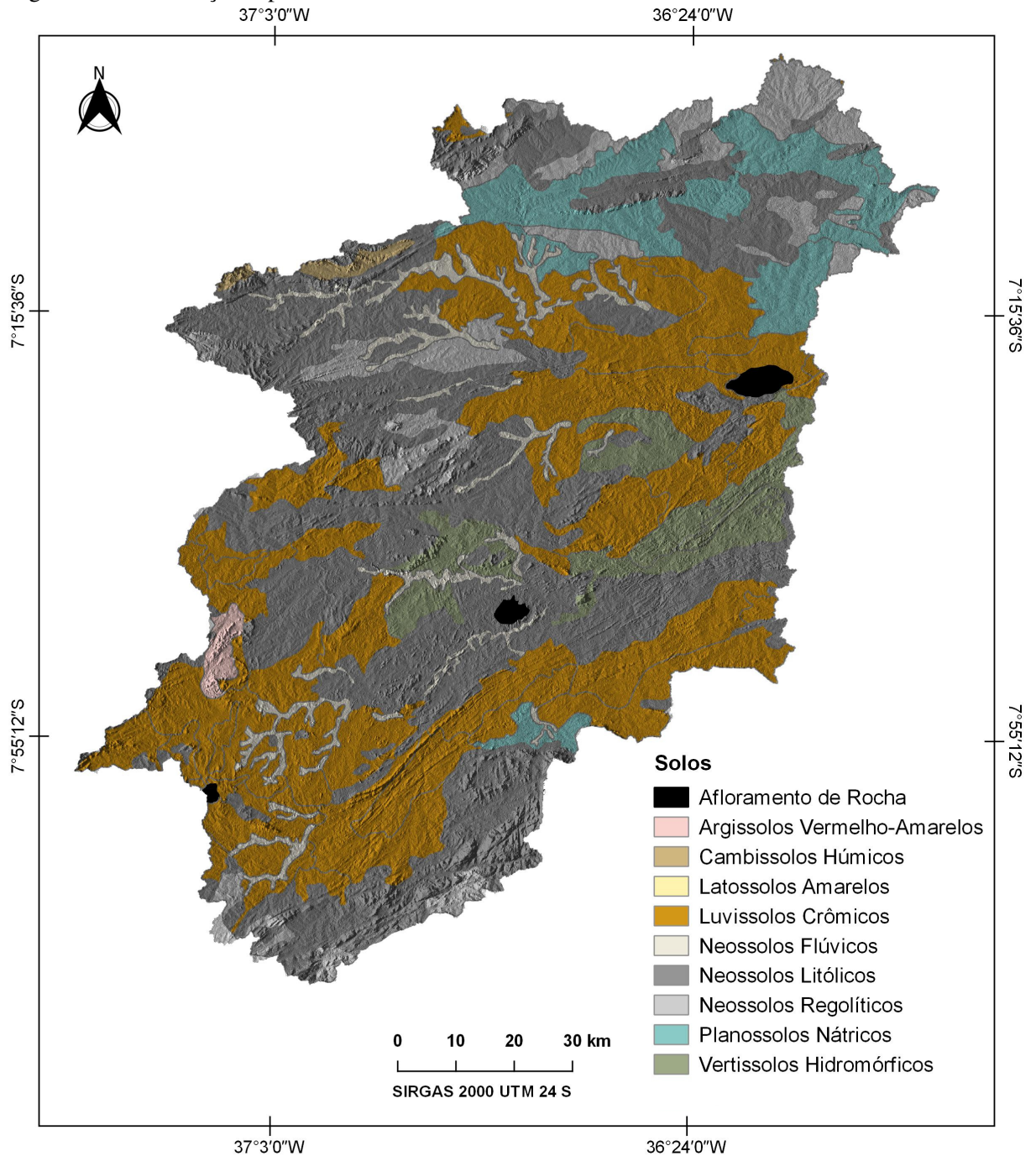
As unidades de solos são descritas a seguir de acordo com BRASIL (1972), Souza (2008):

- Argissolos Vermelho-Amarelos: as áreas que se encontram dentro desta unidade concentram 0,572% do total da área de estudo, com uma extensão de 69,78 km², localizado entre a divisa de Monteiro e Prata. Ocorrem em relevos ondulados a forte ondulados. São profundos sem ultrapassar 150 cm, bem drenados, apresentam reação ácida, com erosão geral moderada. A cobertura vegetal é densa.
- Cambissolos Húmicos: as áreas que se encontram dentro de esta unidade concentram o 0,586% do total da área de estudo, com uma extensão de 71,57 km². Ocorrem em áreas de relevo forte ondulado a montanhoso, com forte declividade. São profundos, fortemente drenados, ácidos ou moderadamente ácidos. Em relação a cobertura vegetal, esta apresenta-se originalmente densa e diversificada.
- Latossolos Amarelos: ocorrem em relevos planos. São solos ácidos, muitos profundos, porosos, friáveis, bem drenados, poucos erodidos. A vegetação original é composta por um tipo de mata seca de alto porte.

- **Luvissolos Crômicos:** as áreas que se encontram dentro de esta unidade concentram o 35,733% do total da área de estudo, com uma extensão de 4.361,65 km². Ocorrem em relevo suave ondulado e raramente ondulado, sendo pouco profundos ou rasos, com PH de baixa acidez e, em alguns casos, básico. Na superfície é comum a ocorrência de cascalhos e calhaus de quartzo (Pavimento Detrítico). Tal como no tipo de solo anterior, a vegetação original é composta por um tipo de mata seca de alto porte.
- **Neossolos Flúvicos:** as áreas que se encontram dentro de esta unidade concentram o 4,348% do total da área de estudo, com uma extensão de 530,73 km². Ocorrem nas áreas de relevo plano ou com ondulações muito suaves, correspondentes as faixas estreitas ao longo dos cursos d'água, provenientes de deposições fluviais. Apresentam fertilidade natural alta, sendo pouco profundos ou profundos, moderadamente ácidos e alcalinos nas camadas inferiores, sem problemas de erosão, com drenagem moderada ou imperfeita. Originalmente eram ocupados por matas ciliares, com elevada presença de espécies de porte arbóreo, entretanto, onde a drenagem mostra-se deficiente, também podem apresentar problemas devido ao acúmulo de sais, o que desfavorece a diversidade, a densidade e o porte das plantas que colonizam esses tipos de solo.
- **Neossolos Litólicos:** as áreas que se encontram dentro de esta unidade concentram o 36,226% do total da área de estudo, com uma extensão de 4.421,93 km². Ocorrem em áreas de relevo suave ondulado a montanhoso, sendo pouco desenvolvido, muito raso ou raso, moderadamente ácido, com drenagem moderada a acentuada. Apresentam rica cobertura vegetal quando isentos de uso.
- **Neossolos Regolíticos:** Ocorrem em áreas de relevo plano, suave ondulado e ondulado, sendo pouco desenvolvidos, muito arenosos, profundos e fortemente drenados. Apresentam cobertura vegetal densa e diversificada.
- **Planossolos Nátricos:** as áreas que se encontram dentro de esta unidade concentram o 8,184% do total da área de estudo, com uma extensão de 998,92 km². Possuem as mesmas características que a classificação anterior, embora apresente maior enriquecimento em sódio, o que torna as caatingas existentes ainda mais empobrecidas.
- **Vertissolos Hidromórficos:** as áreas que se encontram dentro de esta unidade concentram o 5,960% do total da área de estudo, com uma extensão de 727,47 km². Ocorrem nas áreas de relevo suave ondulado a ondulado, em depressões com problemas de drenagem e elevada presença de argilas de alta atividade química, o que confere a esses solos

notável capacidade de dilatação, quando molhados, e contração, quando secos. Nesse processo, nas fendas abertas durante a estação seca, caem materiais da parte superficial que atingem as partes profundas do perfil, enquanto durante a estação chuvosa, devido a expansão das argilas, materiais das partes baixas do perfil são pressionados e podem ser expelidos, existindo assim um auto-revolvimento nesses solos, o que lhes confere elevada fragilidade à erosão. Dessa forma, apesar de, em princípio, apresentarem cobertura vegetal relativamente densa e variada, em caso de desmatamento, ocorrem dificuldades para a sua recolonização por parte de diversas plantas, uma vez que as suas sementes, junto com algumas partículas desse tipo de solo, são arrastadas horizontalmente nesse processo sazonal de expansão/retração. Além dessa característica, em virtude da maior deficiência de drenagem presente em algumas áreas, podem, ocasionalmente, ocorrer problemas em relação ao desenvolvimento das plantas devido ao acúmulo de sais.

Figura 9 – Distribuição espacial dos solos na área de estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota: Com base no mapa de solos da AESA, 1:100000. Classificação atualizada de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos de 2018 (SBCS, 2018).

Com base nas classificações fisionômicas propostas a Caatinga (SOUZA, 2008; BOWDEN, 1973), em geral, os grupos encontrados na área estudada são:

- Caatinga Arbóreo-Arbustiva Fechada, que se caracteriza por serem ambientes de baixo nível de antropismo e apresentam condições biofísicas favoráveis para lhe conferir a dominância de espécies arbóreas e algumas arbustivas, predominantes em topos de encostas e vales de rios (SOUZA, 2008; BOWDEN, 1973).
- Caatinga Arbustiva-Arbórea Fechada, essa fisionomia possui as características parecidas com a anterior, embora com estrato arbustivo dominante sobre o arbóreo, devido limitações impostas por solos menos profundos, baixa umidade e conversão de áreas para pastagem. Essa fisionomia se enquadra na Caatinga Secundária, em avançado estágio sucessão ecológica (SOUZA, 2008; BOWDEN, 1973).
- Arbustiva Fechada, essa fisionomia se configura como uma Caatinga em fase intermediária de sucessão ecológica, corresponde as áreas usadas para atividade agropecuária (SOUZA, 2008; BOWDEN, 1973).
- Caatinga Aberta, são área com estágio avançado de degradação, onde ocorre grandes manchas de solo recobertos apenas por herbáceas (SOUZA, 2008; BOWDEN, 1973).

3.2 Dados de entrada

O GEE foi utilizado para construir “*stacks*” do Landsat *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper+* (ETM+) e *Operational Land Imager* (OLI) do Nível 1, que atendem aos critérios formais de qualidade geométrica da *United States Geological Survey* (USGS). A resolução espacial das imagens Landsat é de 30 m. Utilizou-se o modelo CHIRPS Pentad na sua versão 2.0 (FUNK *et al.*, 2015) para obter estimativas de precipitação espacialmente explícitas. A resolução espacial do CHIRPS Pentad é de $0,05^\circ (\pm 5,5 \text{ km})$ e a resolução temporal abrange um pentad, ou seja, cada um dos primeiros 5 pentads em um mês tem 5 dias. O último pentad contém todos os dias do dia 26 até o final do mês.

3.3 Processamento Digital de Imagens

3.3.1 Criação de mosaicos temporais a partir de seleção medoid

A construção dos mosaicos temporais Landsat foi realizado com o procedimento seleção medoid (FLOOD, 2013; KENNEDY *et al.*, 2018) no GEE, no qual os valores espectrais de

cada pixel das seis bandas (comprimentos de onda óticos dos sensores TM, ETM+ e bandas equivalentes do OLI foram comparados com os valores medianos espectrais daquele pixel em todas as imagens na data daquele ano. A coleta é restrita, e os valores espectrais do pixel mais próximo daquele valor mediano é selecionado, usando a distância espectral euclidiana. O número de pixels válidos obtidos pela seleção *modoid* para o período de 1986 a 2017 podem ser visualizados na Figura 10. Não obstante, a seleção de *modoid* foi efetiva na obtenção de pixels válidos para toda área de estudo, o que melhorou a qualidade das imagens Landsat disponíveis.

3.3.2 SAVI

Em seguida, calculou-se no GEE para cada pixel escolhido o SAVI, que leva conta a relação entre as regiões espectrais vermelha e infravermelha, utilizando um fator de ajuste (L) com valores de 1, 0,5 e 0,3 para cobertura vegetal baixa, média e alta, respectivamente (HUETE, 1988), optou-se neste estudo por 0,5.

É calculado pela equação 3.1:

$$\frac{(1 + L)(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}})}{L + \rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}} \quad (3.1)$$

Em que:

- ρ_{NIR} = banda do infravermelho próximo da imagem do satélite;
- ρ_{RED} = banda do vermelho;
- $L = 0,5$ é o fator de ajuste do solo utilizado.

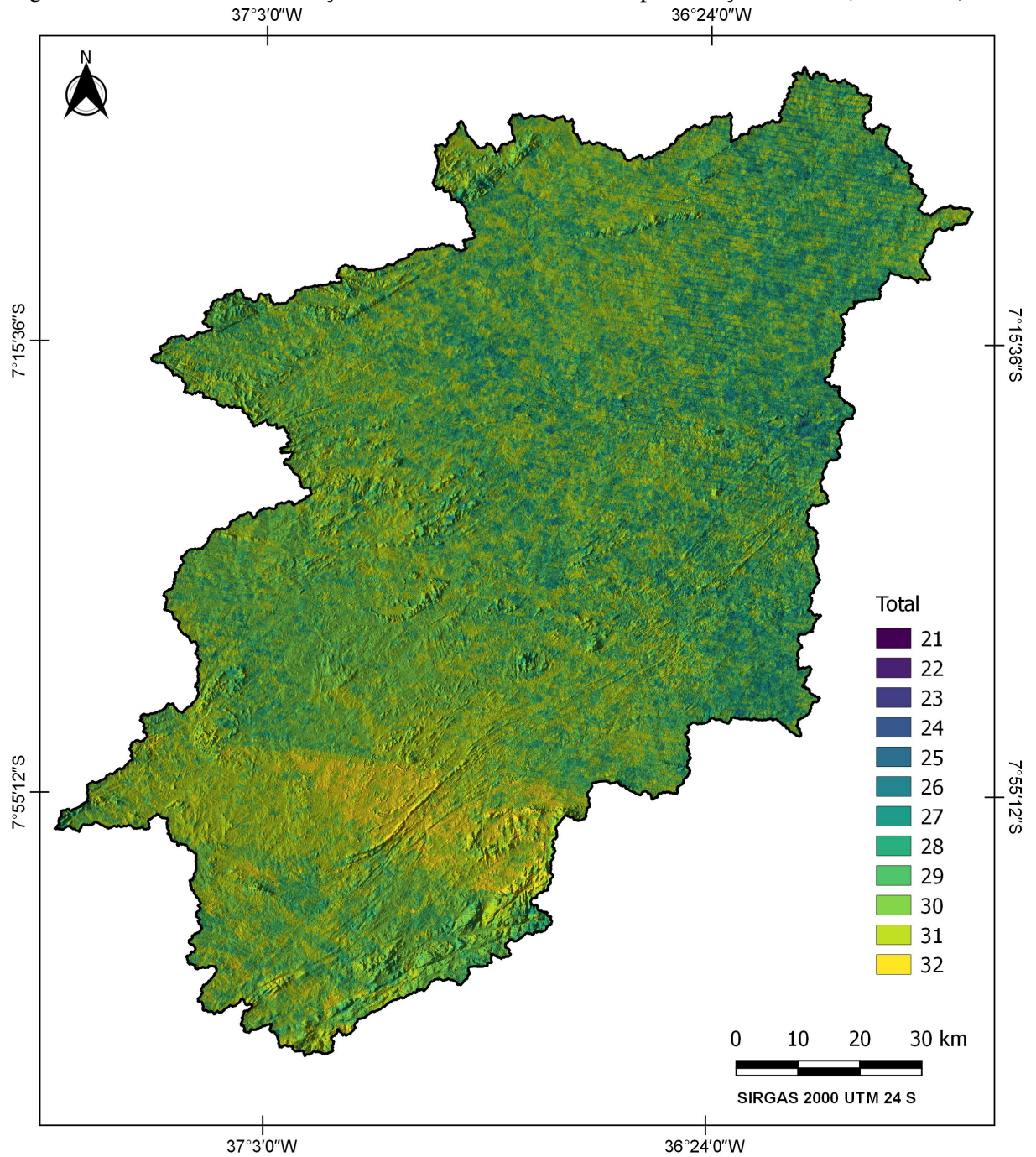
Esse procedimento foi repetido para todos os pixels em nossas áreas de estudo para criar pilhas de SAVI como entrada, para construir a série temporal em nível de pixel. Finalmente, foram calculadas para cada pixel a média espacial e desvio padrão para fornecer um valor anual para a área de estudo.

3.4 Análise dos dados

3.4.1 Análise estatística dos dados de precipitação

As somas dos dados CHIRPS para o período de janeiro a junho foram calculadas para cada pixel na área de estudo. A soma do período dos meses indicados permite capturar a maior parte da precipitação anual que é útil para o crescimento da vegetação das caatingas.

Figura 10 – Número de observações válidas do Landsat obtidas pela seleção medoid (1986-2017).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi utilizado a técnica dos Quantis para qualificar e avaliar ocorrência de anos normais, secos e chuvosos utilizando os percentis P15, P35, P65 e P85, para definir cinco classes de precipitação: Muito Seco (MS) para os 15% menores valores, Seco (S) entre 15% e 35% das observações, Neutro (N) entre 35% e 65%, Chuvoso (C) entre 65% a 85% e Muito Chuvoso (MC) para valores acima de 85% (SILVESTRE *et al.*, 2010). Após esse procedimento, calculamos a média aritmética, desvio padrão (DP), Coeficiente de Variação (CV) e o Calculo da Anomalia Padronizada (AP) 3.2.

$$AP = \frac{\sum_{i=1}^n -\bar{x}}{\sigma} \quad (3.2)$$

3.4.2 Correlação de Pearson

Para avaliar os efeitos da precipitação na dinâmica da vegetação, calculamos os coeficientes de correlação de Pearson para o SAVI e a precipitação para cada pixel obtidos durante os meses de janeiro a junho. Se o coeficiente de correlação for maior que 0, as duas variáveis são correlacionadas positivamente e vice-versa.

É calculado pela equação 3.3:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.3)$$

Em que:

- r = o coeficiente de correlação entre duas variáveis x e y , com um valor variando de -1 a 1, onde um valor absoluto maior indica correlação mais forte;
- i = o ano de 1 a 32 no período de estudado;
- n = o período total de tempo, isto é, 32 anos neste estudo;
- x_i = o SAVI da estação de crescimento no último ano i ;
- y_i = a precipitação da estação de crescimento do ano i ; $\bar{x}$ e $\bar{y}$ = o SAVI e a precipitação total, respectivamente, na estação de crescimento (JFMAMJ) de 1986 a 2017.

Apenas as tendências com coeficientes de correlação de Pearson significativamente diferentes de $p \leq 0.05$ foram consideradas.

3.4.3 O método RESTREND

O método RESTREND proporciona a análise de tendência residual a longo prazo utilizando-se resíduos de índices espectrais de vegetação do modelo de regressão linear (*vide* equação 3.4), tendo a chuva como variável explicativa (EVANS; GEERKEN, 2004; WESSELS *et al.*, 2007; LI *et al.*, 2012b). Tem por base a retirada da influência da variabilidade da precipitação na vegetação e assume outros condicionantes das mudanças da cobertura vegetal como a ação humana. A tendência é apresentada espacialmente com o objetivo de identificar áreas com tendências negativas, ou seja, são caracterizadas pelo processo de desertificação, e tendências positivas que apresentam um quadro de esverdeamento da vegetação ou não afetadas pelo processo de desertificação.

$$y = \alpha + \beta x + \varepsilon, \quad (3.4)$$

Em que:

- y = variável dependente, ou seja, o SAVI;
- x = variável independente;
- α = é uma constante, que representa a interceptação da reta com o eixo vertical;
- β = é outra constante, que representa a inclinação (coeficiente angular) da reta;
- ε = representa a variação de y que não é explicada pelo modelo.

O teste não paramétrico *Mann-Kendall* (MK) será utilizado para detectar as tendências significativas nas análises do RESTREND (HOLLANDER *et al.*, 2013). Neste teste, o conjunto de dados não precisa estar em uma ordem específica e não é afetado por *outliers*. O teste MK de uma série temporal é calculado pelas equações 3.5:

$$E[S] = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j), \quad (3.5)$$

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

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left(n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^p q_k(q_k-1)(2q_k+5) \right),$$

Onde x_i e x_j são os valores de dados da série temporal no tempo i e j , respectivamente; n , o comprimento da série temporal; e q_k , o número de ligações para o valor. Nos casos em que o tamanho da amostra $n > 10$, a variável normal padrão Z_{MK} é calculada usando a equação 3.6:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{E[S]-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & E[S] > 0 \\ 0, & E[S] = 0 \\ \frac{E[S]+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & E[S] < 0 \end{cases}. \quad (3.6)$$

Valores positivos de Z_{MK} indicam tendências crescentes, enquanto valores negativos de Z_{MK} mostram tendências decrescentes. Ao testar as tendências monotônicas crescentes ou decrescentes, a hipótese nula foi rejeitada para um valor absoluto de Z_{MK} maior que $|Z_{MK}| \geq Z_{1-\alpha/2}$ obtido das tabelas de distribuição cumulativa normal padrão, onde α é o nível de significância desejado. Neste estudo, o valor crítico para um valor de 0,05 da tabela normal padrão é de 1,96.

4 RESULTADOS

4.1 Distribuição espacial e variação interanual da precipitação e do SAVI

Analisou-se no perímetro semiárido da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, que compreende as sub-bacias Taperoá e Alto Curso, os dados de precipitação pluvial estimados a partir do modelo CHIRPS para os meses de janeiro a junho no período de 1986-2017. Avaliou-se o comportamento espaço-temporal da variável ao longo do tempo, utilizando-se a média interanual (Figura 11), desvio padrão (Figura 12) e Coeficiente de Variação (CV) (Figura 13).

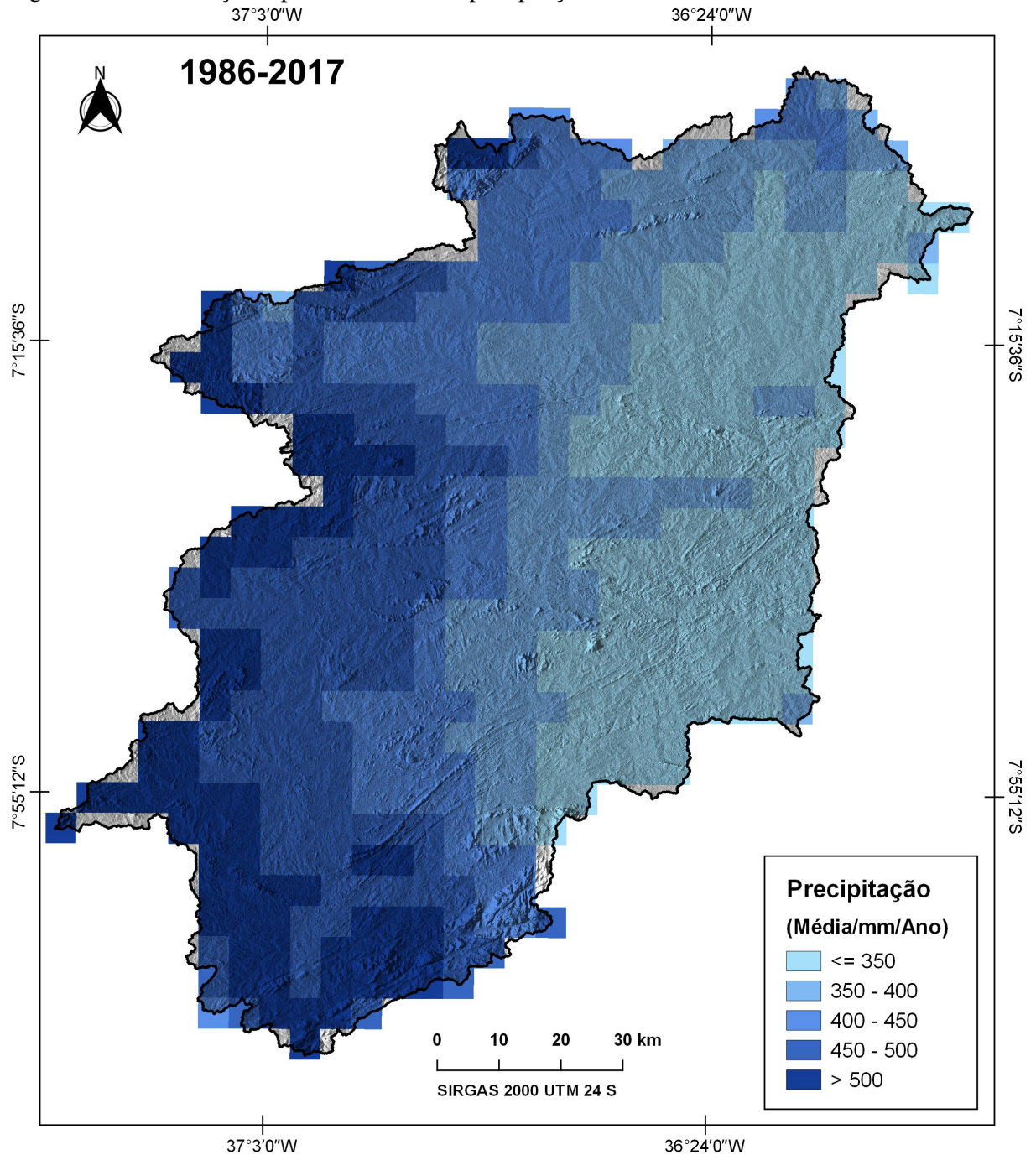
A Figura 11 demonstra a distribuição espacial das médias históricas por base pixel-a-pixel das chuvas, onde os valores acima de 400 mm estão situados no setor ocidental e os valores abaixo de 350 mm se localizam na parte oriental da área.

A Figura 12 apresenta os desvios padrão que resultou em uma variabilidade alta e chuvas irregulares, onde os maiores desvios são encontrados na faixa ocidental da área, caracterizada como a mais úmida.

A distribuição espacial do CV (Figura 13) possui uma ampla variação entre $> 30\%$, com os menores valores nas partes do nordeste e do sudeste, indicando uma maior homogeneidade da precipitação, sendo esse comportamento invertido gradualmente à medida em que se aproxima a região oeste da área estudada.

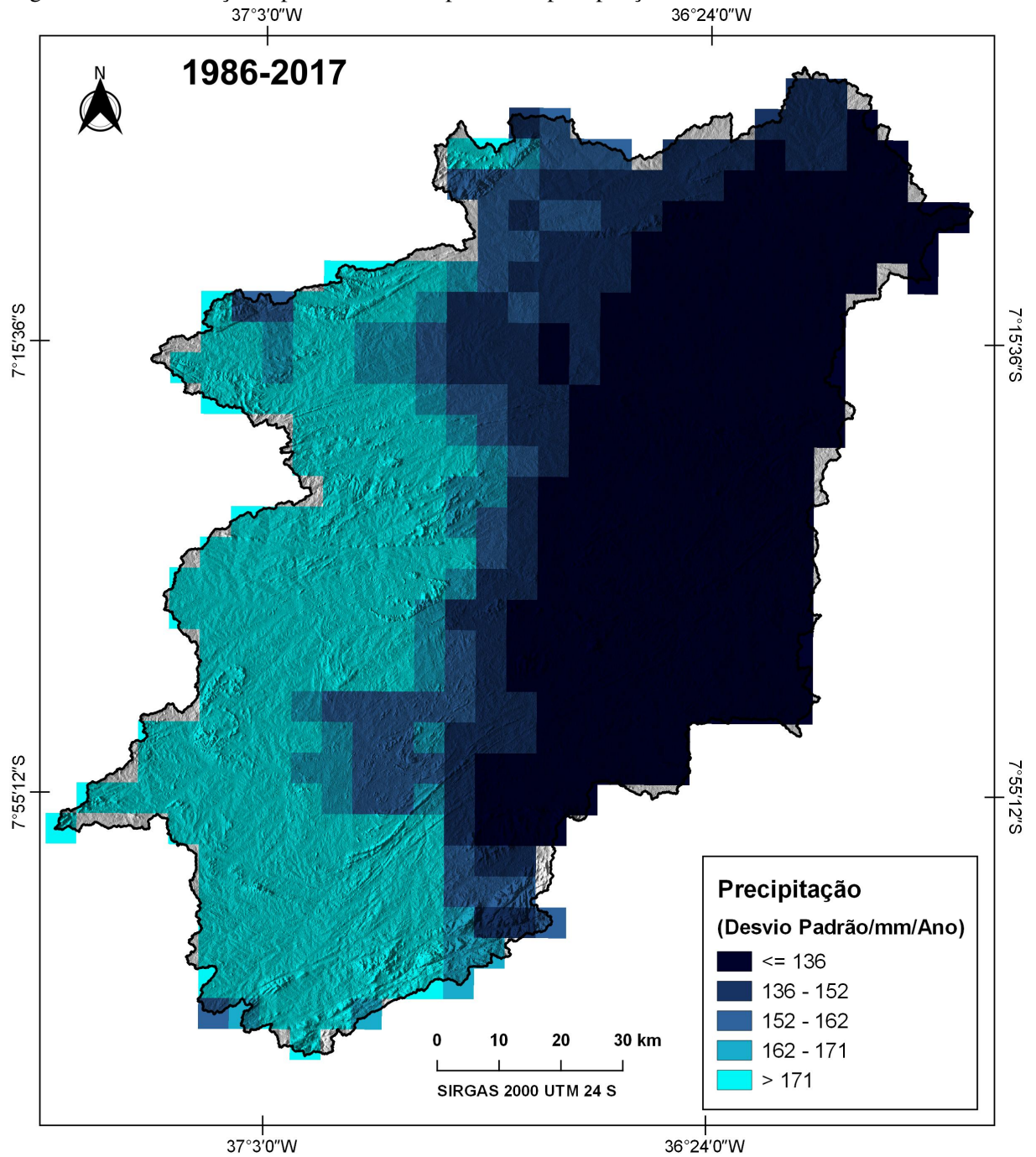
Neste contexto, verificou-se uma grande variabilidade da distribuição da precipitação pluvial na porção oriental da área, demonstrado nas baixas médias históricas e baixa variabilidade, indicando sua predisposição a ocorrências de eventos extremos de seca, que é um dos fatores determinantes para expansão de área afetadas pelo processo de desertificação.

Figura 11 – Distribuição espacial da média da precipitação interanual durante 1986-2017.



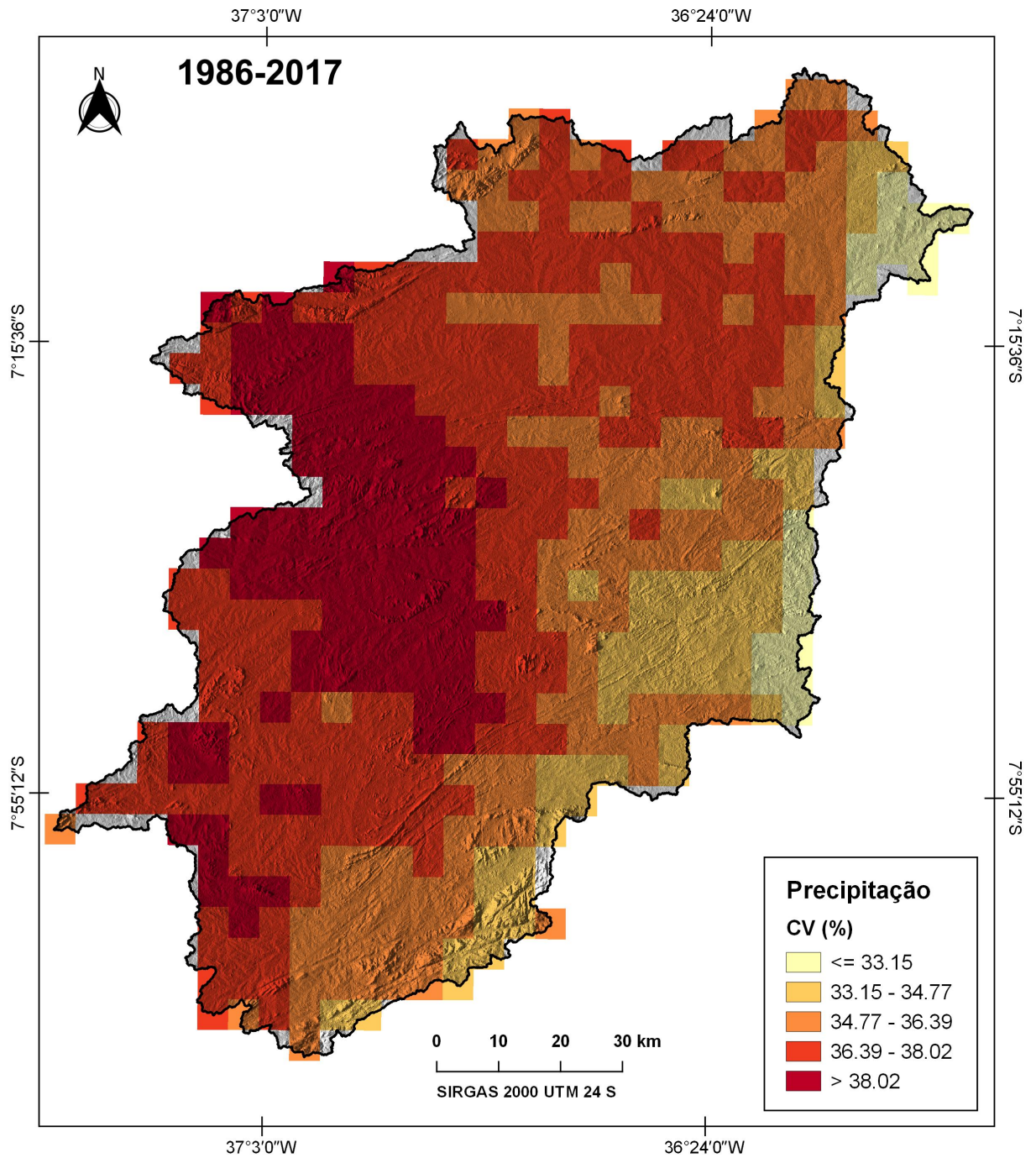
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 – Distribuição espacial do desvio padrão da precipitação interanual durante 1986-2017.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13 – Distribuição espacial do Coeficiente de Variação da precipitação interanual durante 1986-2017.

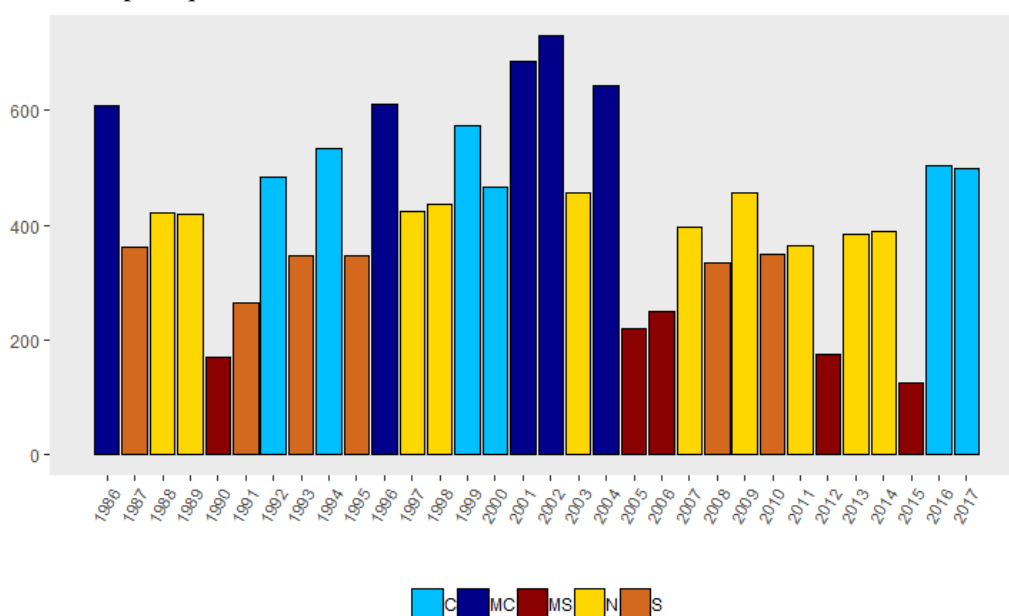


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 14 apresenta o comportamento e qualifica a precipitação em cinco classes conforme o resultado da técnica dos Quantis (SILVESTRE *et al.*, 2010) (descrita na subseção 3.4.1): MS, S, N, C e MC. Foram totalizados 5 anos MS, 6 anos S, 10 anos N, 6 anos C e 5 anos MC. Detalhados a seguir:

- Anos MS (< 258,87 mm) - os anos com grande redução da pluviosidade foram: 1990, 2005, 2006, 2012 e 2015.
- Anos S (258,87 a 364,15 mm) - os anos com pluviosidades ligeiramente reduzidas são: 1987, 1991, 1993, 1995, 2008 e 2010.
- Anos N (364,15 a 458,74 mm) - os anos 1988, 1989, 1997, 1998, 2003, 2007, 2009, 2011, 2013 e 2014 foram classificados como habituais, ou seja, que apresentam uma distribuição anual das chuvas mais próximo das médias gerais.
- Anos C (458,74 a 586,00 mm) - anos com pluviosidade ligeiramente aumentada foram: 1992, 1994, 1999, 2000, 2016 e 2017.
- Anos MC (> 586,00 mm) - anos que apresentaram pluviosidades mais elevadas foram 1986, 1996, 2001, 2002 e 2004.

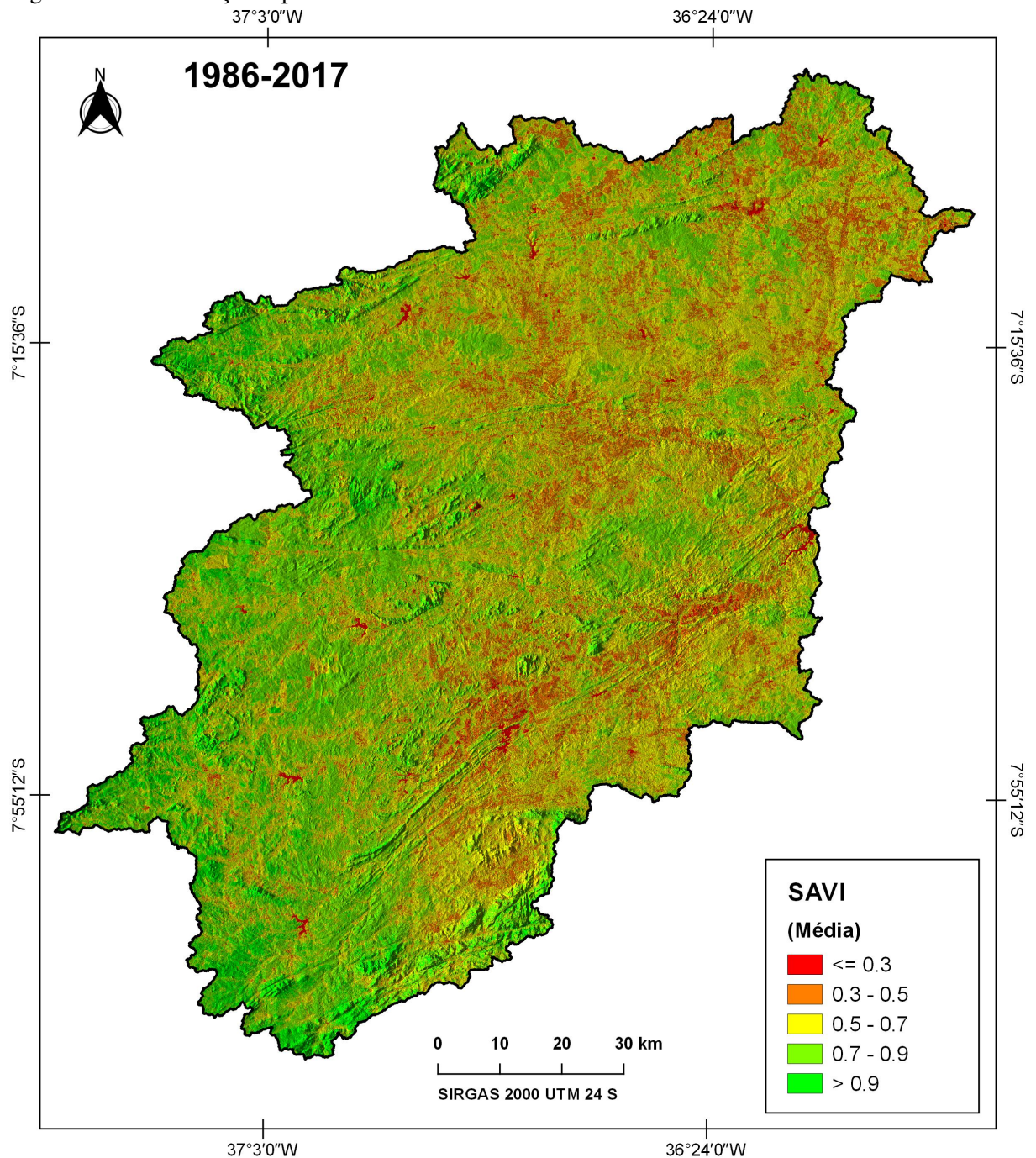
Figura 14 – Síntese do comportamento interanual das chuvas, estabelecendo cinco classes para qualificar as chuvas (MS, S, N, C e MC) durante 1986-2017.



Fonte: Elaborada pelo autor.

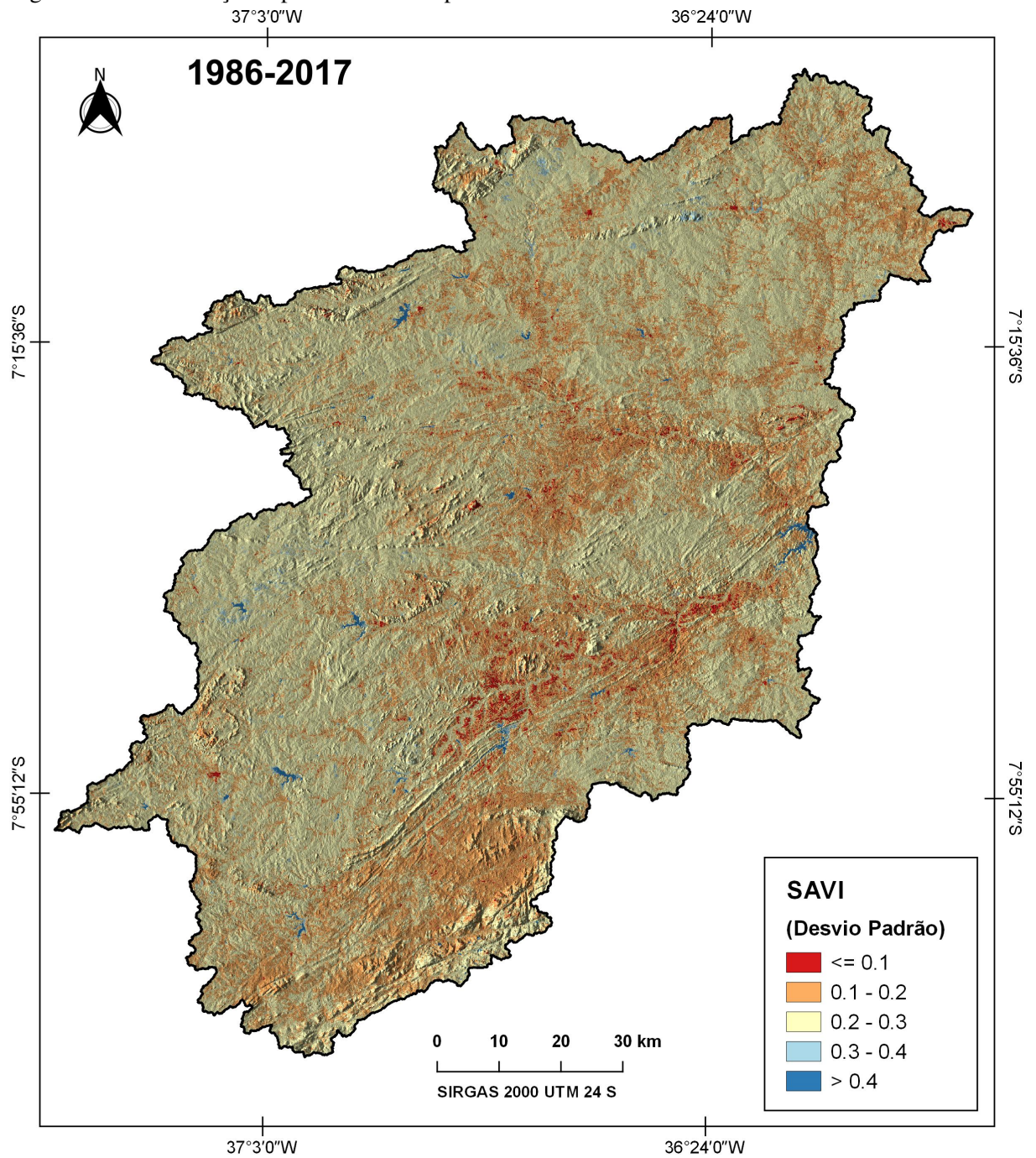
A Figura 15 demonstra a distribuição espacial do SAVI médio dos meses de janeiro a junho para o período 1986-2017. pixels com média de crescimento SAVI $> 0,7$ são definidos como regiões coberta por vegetação, que se encontram localizados principalmente na porção ocidental e em algumas manchas localizadas em topografias mais acentuadas da área de estudo. Em contraste observa-se um quadro de maior degradação histórica da vegetação com SAVI $< 0,3$ por pixel, seguindo os principais rios (Paraíba e Taperoá) da área de estudo.

Figura 15 – Distribuição espacial da média do SAVI durante 1986-2017.



Fonte: Elaborada pelo autor.

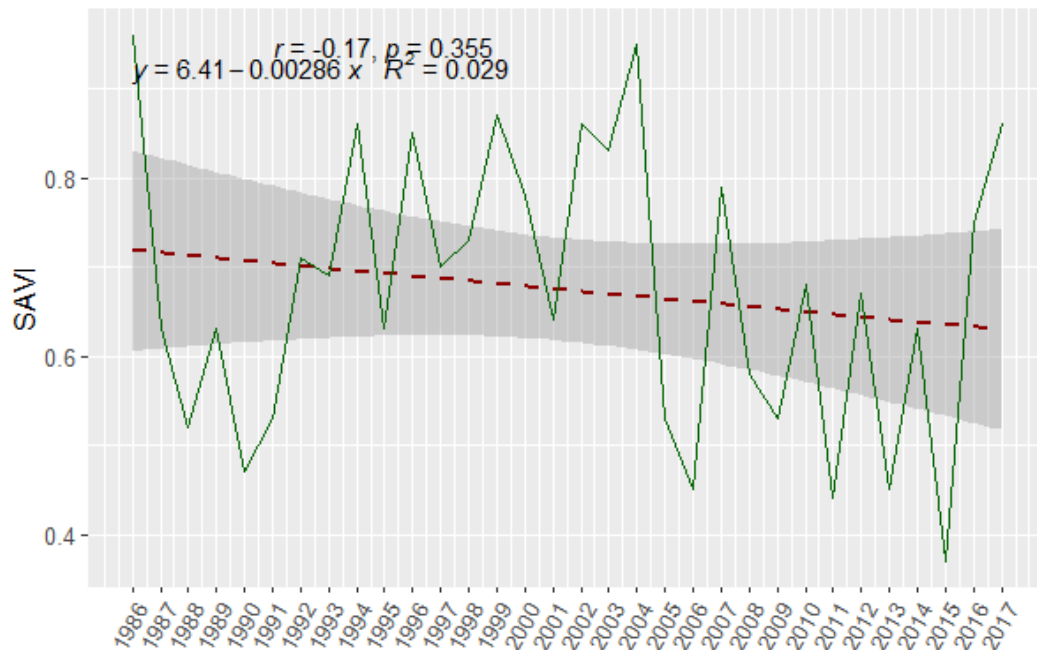
Figura 16 – Distribuição espacial da desvio padrão do SAVI durante 1986-2017.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 17 apresenta tendência linear do SAVI, que mesmo apresentando inclinação negativo não foi significativa ($p=0,355$), indicando que o processo de degradação da biomassa ocorreu a mais tempo de forma intensa e possivelmente de anos antecessores, resultando portanto de um processo histórico de uso e ocupação dos solos.

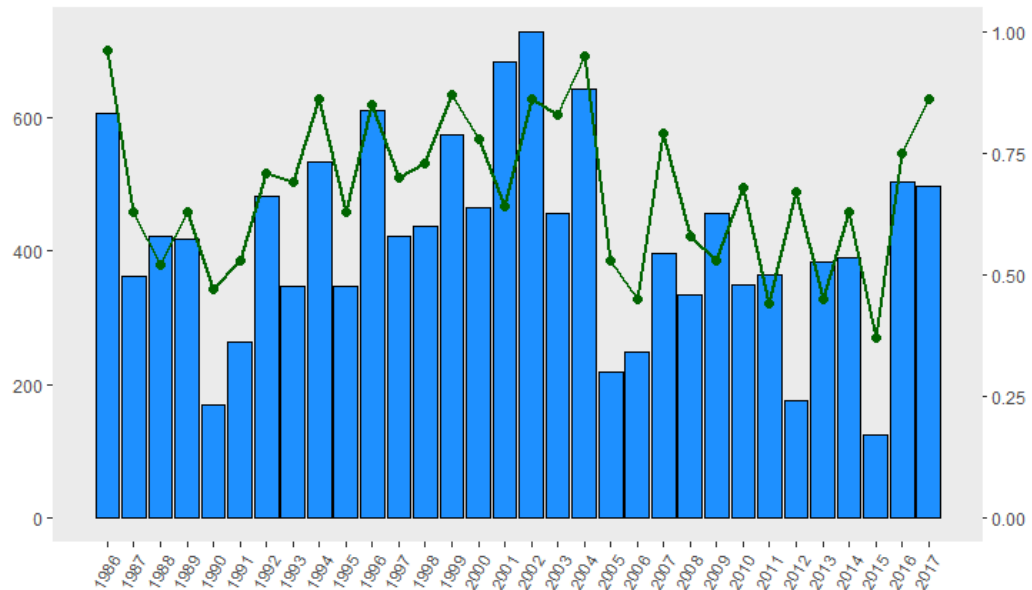
Figura 17 – Variação interanual e tendência linear do SAVI durante 1986-2017.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 18, as barras azuis indicam as médias espaciais das chuvas e linhas verdes representam a média espacial do SAVI. Pode-se observar que o transcurso interanual do SAVI acompanha a precipitação total para os meses estudados.

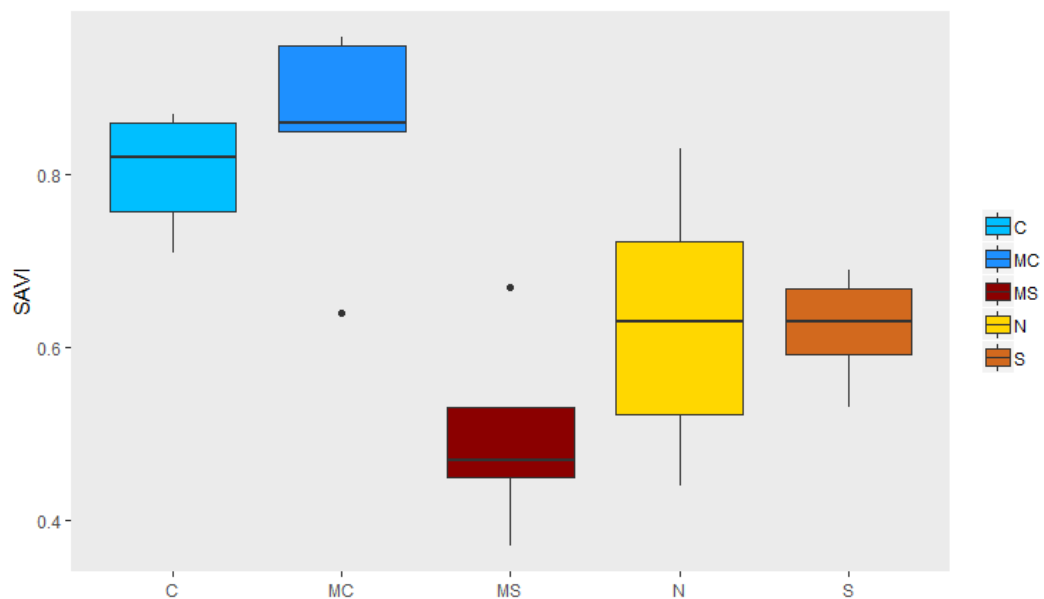
Figura 18 – Variação interanual das chuvas representadas pelas barras azuis e o SAVI exibido pela linha verde durante 1986-2017.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico de caixa mostra que os anos MC ($\text{SAVI}=0,85 \pm 0,14$, $\text{min}=0,71$, $\text{max}=0,87$) e C ($\text{SAVI}=0,80 \pm 0,15$, $\text{min}=0,64$, $\text{max}=0,96$) apresentam os maiores valores do SAVI. Observa-se que nos anos S ($\text{SAVI}=0,62 \pm 0,14$, $\text{min}=0,53$, $\text{max}=0,69$) e MS ($\text{SAVI}=0,50 \pm 0,15$, $\text{min}=0,37$, $\text{max}=0,67$) possuem os menores valores do SAVI (Figura 19).

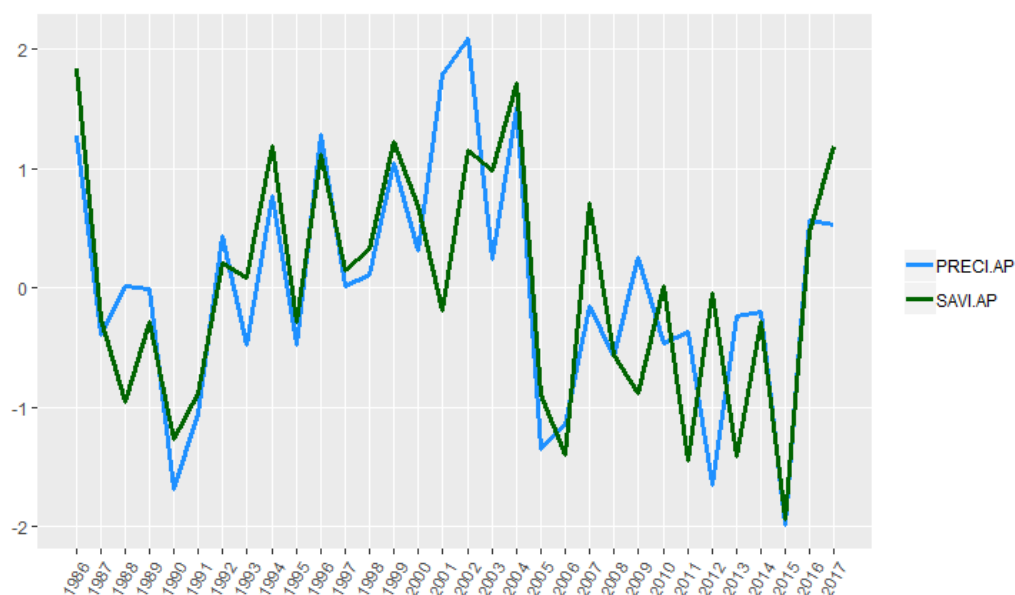
Figura 19 – Valores do SAVI nos anos pluviométricos MS, S, N, C e MC durante 1986-2017.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 20 apresenta as Anomalias Padronizadas do SAVI (SAVI.AP) e Anomalias Padronizadas da Precipitação (PRECI.AP) foram analisados para o período de 1986 a 2017. Os anos de 1990, 2005, 2006, e 2015 teve menor atividade fotossintética ou remoção da cobertura da vegetal. Os anos de 1986, 1996, 1999 e 2002 apresentam aumento do SAVI, principalmente relacionado as distribuições das chuvas. Chama atenção no ano de 2012 que o comportamento de precipitação não acompanha o índice de vegetação, diferente no ocorreu nos demais anos. Uma explicação é a baixa na disponibilidade de imagem para esse ano, que pode ter mascarado o comportamento real da vegetação neste ano específico.

Figura 20 – Variação interanual das anomalias das chuvas e do SAVI durante 1986-2017.



Fonte: Elaborada pelo autor.

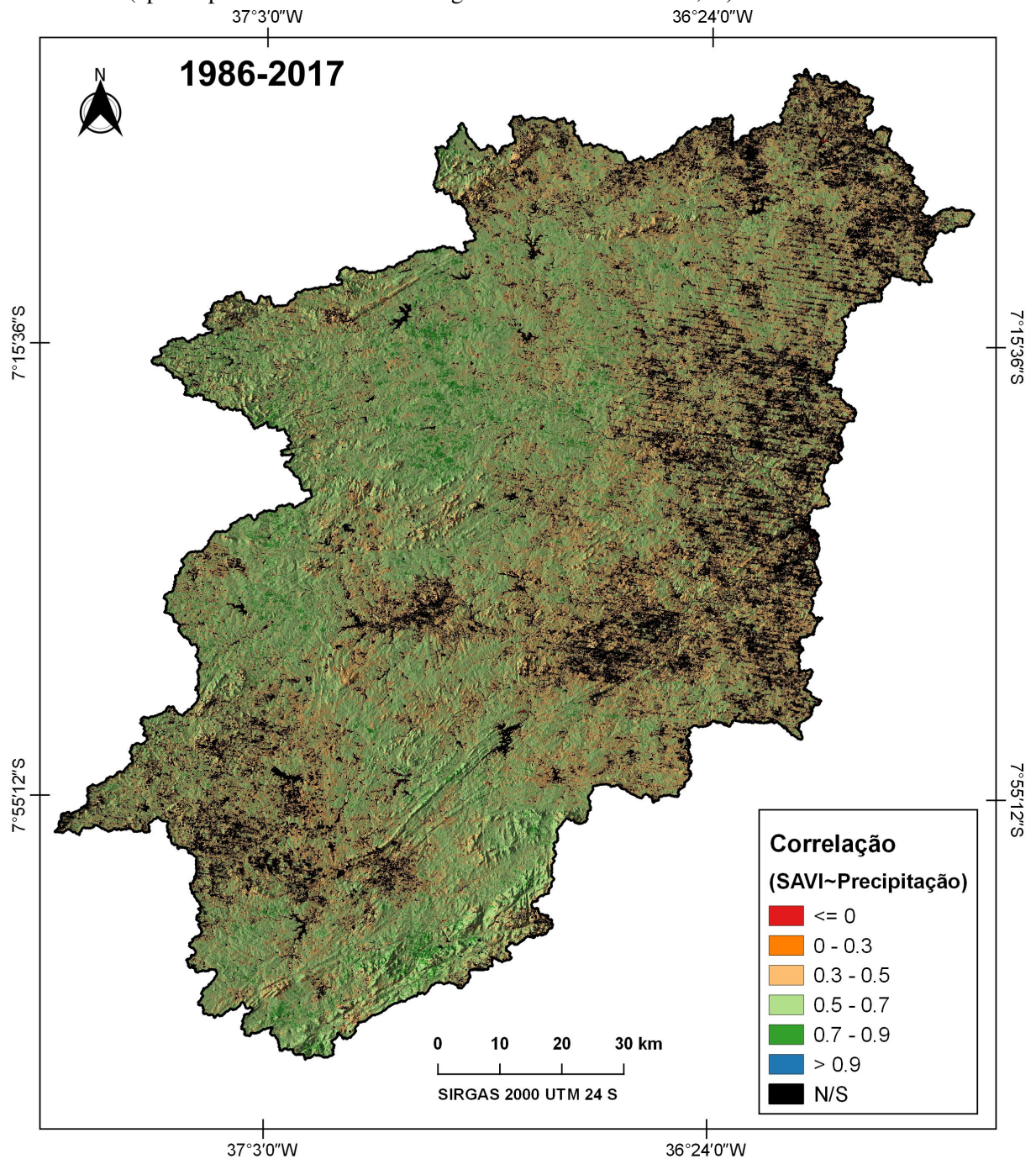
Os resultados deste estudo indicaram que a vegetação respondeu à precipitação pluvial ao longo do tempo. Logo, eventos extremos climáticos (anos muitos chuvosos ou muito secos) podem aumentar ou diminuição consideravelmente a produtividade da vegetação em até $\pm 25\%$, variando de acordo com transcurso da precipitação na área estudo.

4.2 Relação entre SAVI e a precipitação

Os resultados mostraram que, para o período de 1986-2017, o SAVI e precipitação foram significativamente correlacionados ($p \leq 0.05$) para 83,17% dos pixels e apresentaram o coeficiente médio de correlação igual a 0,53. Em relação ao padrão geográfico dos coeficientes de correlação, indica uma relação positiva moderada (0,5 – 0,7) na maior parte da área estudada,

isso significa que existe uma relação linear entre o verde da cobertura vegetal e a quantidade de chuvas ao longo dos anos (Figura 21).

Figura 21 – Coeficientes de Correlação de Pearson entre SAVI e precipitação total durante 1986-2017 (apenas pixels estatisticamente significativos ao nível de 0,05).



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Produtividade da Vegetação e mapeamento de áreas desertificadas

A Tabela 3 apresenta os resultados estatísticos para a análise de tendência linear da produtividade da vegetação na área estudada.

Tabela 3 – Resultados estatísticos da tendência da produtividade da vegetação.

Indicadores	Área Analisada (km ²)	TD (%)	TC (%)	N\S (%)
SAVI trend	12.093,63	34,04	58,57	7,39
SAVI restrend	12.093,63	31,41	26,75	41,85
SAVI restrend (1986-2001)	12.093,63	50,34	38,48	11,17
SAVI restrend (2002-2017)	12.093,63	34,41	15,99	49,59

Fonte: Elaborada pelo autor.

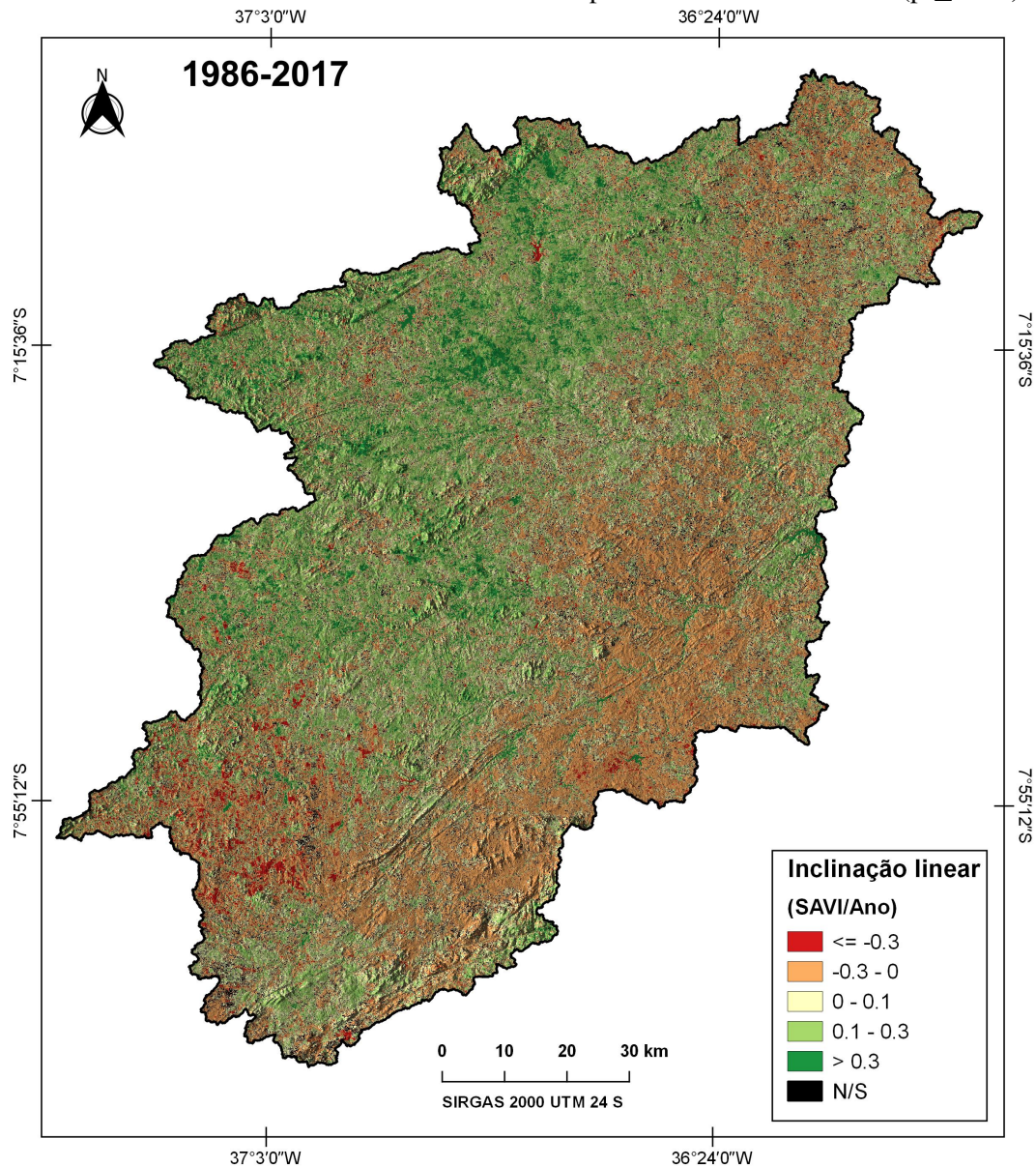
Nota – TD: tendência decrescente significativa; TC: tendência crescente significativa; N\S: Não significativo.

A análise de tendência do SAVI realizada no período de 1986 a 2017 indicaram que 58,57% dos pixels apresentaram tendências crescentes significantes ($p \leq 0.05$) dos valores dos pixels (esverdeamento) e 34,04% dos pixels obtiveram tendências decrescente significantes (escurecimento) ($p \leq 0.05$), os demais 7,39% dos pixels não apresentaram resultados estatísticos significativos (Tabela 3).

O esverdeamento da vegetação, que indica a abundância de clorofila e capacidade fotossintética (SCHUCKNECHT *et al.*, 2013), ocorreu de forma generalizada na porção noroeste e oeste localizado na sub-bacia do rio Taperoá. Na bacia do Alto Paraíba essa dinâmica ocorre geograficamente em manchas, principalmente em topografias mais acentuadas na porção sul e em áreas de Caatinga mais preservada, encontradas na porção centro-norte da bacia. O valor de declive indica que o esverdeamento do SAVI era tipicamente em torno de 0,1 a 0,3 por pixel ao ano, valor que chegou > 0,3 por pixel ao ano em alguns locais com presença de vegetação mais abundante (Figura 22).

Quanto às tendências negativas da vegetação (escurecimento), representando a diminuição da atividade fotossintética, por ausência da cobertura vegetal, estas dominaram principalmente a porção oriental das sub-bacias estudadas e na parte sudoeste que encontra nos limites do município de Monteiro-PB, variando em torno de -0,01 a -0,3 dos valores do SAVI pixel ao ano (Figura 22). Nas áreas desertificadas ocorrem pouca renovação da biomassa, representando assim a dificuldade do ambiente a longo prazo a recuperação espontânea da vegetação.

Figura 22 – Valores da inclinação linear de regressão linear para as tendências de SAVI durante o período 1986-2017. Deve-se observar que a inclinação > 0 indica tendência de SAVI positiva e recuperação de vegetação, enquanto a inclinação < 0 indica tendência negativa de SAVI e degradação da vegetação. A significância estatística foi testada usando teste não paramétrico Mann-Kendall ($p \leq 0.05$).



Fonte: Elaborada pelo autor.

O $SAVI_{\text{residual}}$ resultado das diferenças entre o $SAVI_{\text{observado}}$ e o $SAVI_{\text{predito}}$ (ajustado pela precipitação) foi regredido no tempo para controlar os efeitos da variação inter-anual das chuvas. Neste estudo, uma tendência residual negativa foi observada em 31,41% dos pixels e 26,75% dos pixels apresentaram tendência residual positiva, enquanto os demais 41,85% não apresentaram resultados significativos (Tabela 3).

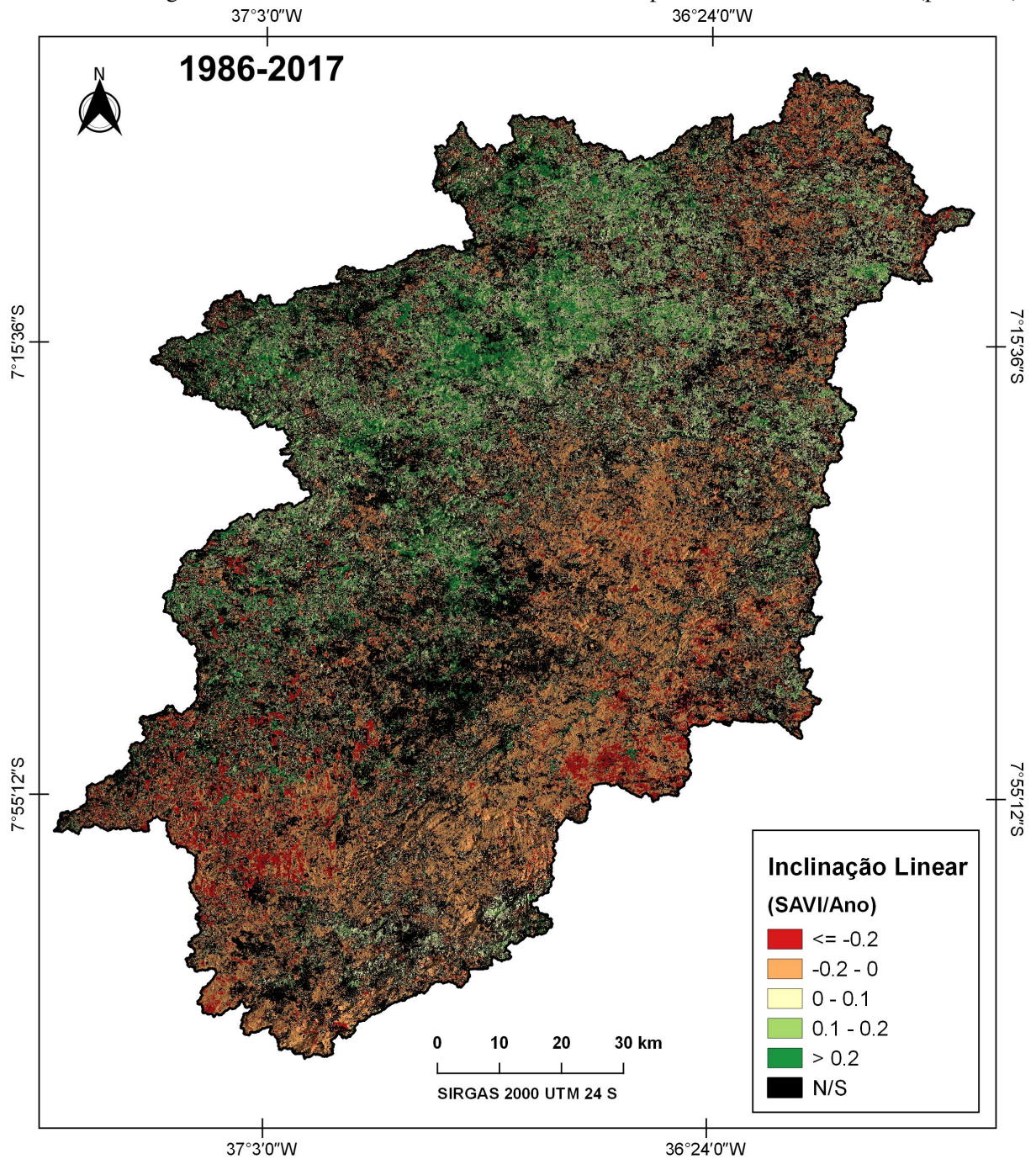
O valor de declive indica resultados positivos em torno de 0,1 a 0,2 por pixel ao ano, chegando a $> 0,3$ em alguns locais de vegetação mais preservada. Quanto as tendências negativas variaram em torno de -0,01 a -0,2 dos valores do SAVI pixel ao ano. Uma tendência residual negativa foi observada nas partes sul e nordeste da área estudada, indicando que a precipitação é insuficiente para a vegetação crescer nessas áreas (Figura 23).

Os resíduos do SAVI foram maiores nas partes norte e oeste, indicando que a precipitação foi suficiente para que houvesse recuperação da vegetação nos últimos 32 anos. Assim, a cobertura vegetal teve aumento nessas áreas (Figura 23).

Durante 1986-2001, uma tendência residual negativa foi observada em 50,34% dos pixels e 38,48% dos pixels apresentaram tendência residual positiva, ao passo que os demais 11,17% não apresentaram resultados significativos (Tabela 3 e Figura 24).

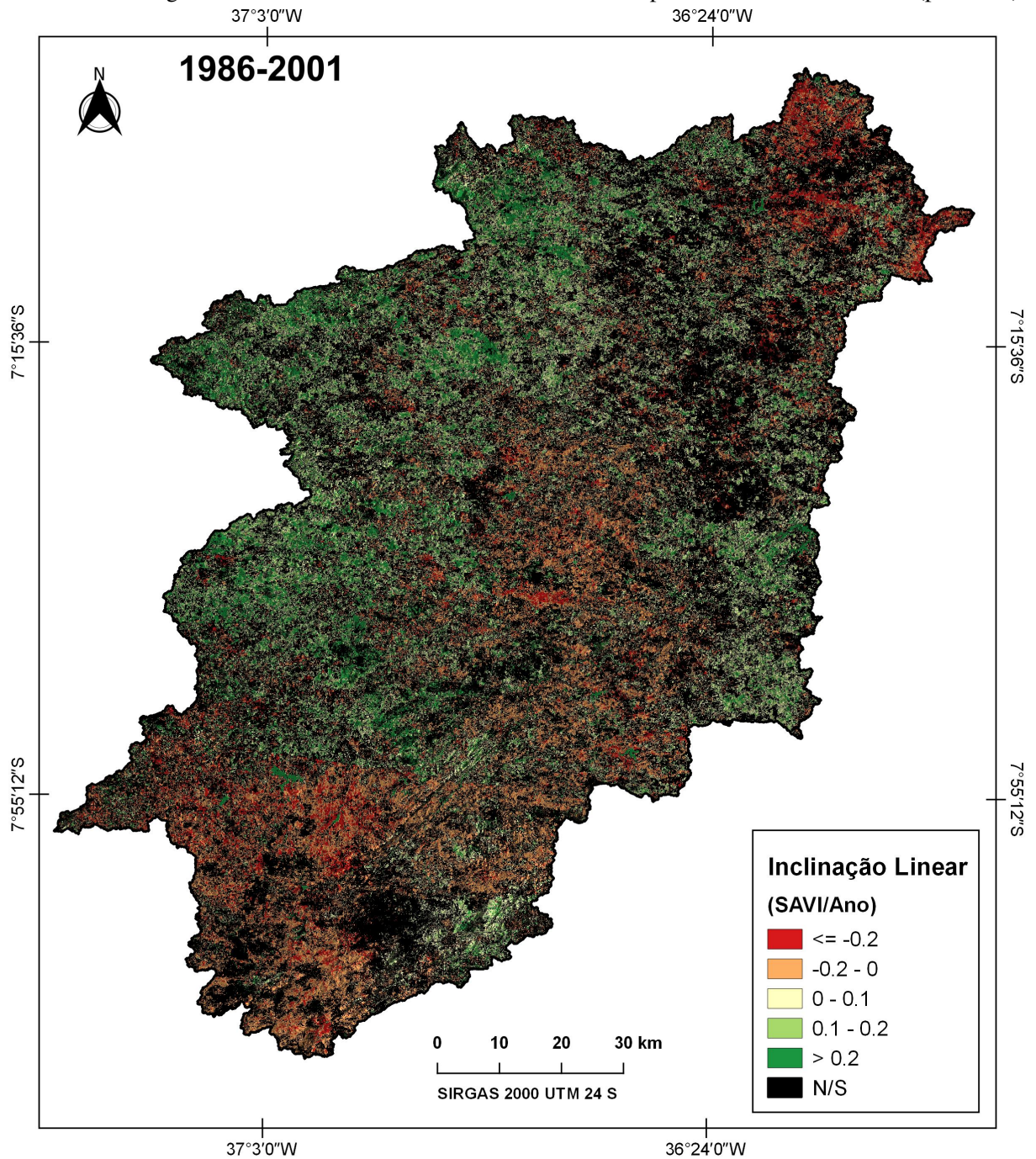
No período de 2002-2017, uma tendência residual negativa foi observada em 34% dos pixels e 16% dos pixels apresentaram tendência residual positiva, enquanto os demais 50% não apresentaram resultados significativos (Tabela 3 e Figura 25). Isso sugere que as atividades humanas tiveram maior efeito sobre a cobertura vegetal em geral nos primeiros 16 anos do período de estudo (1986-2017). No entanto, em relação a recuperação da vegetação, nos últimos 16 anos (2002-2017) esta foi 22,48% menor que no período de 1986-2001.

Figura 23 – Valores da inclinação linear de regressão linear para as tendências de $SAVI_{residual}$, removendo os efeitos da variabilidade da precipitação durante o período 1986-2017. Deve-se observar que a inclinação >0 indica tendência de $SAVI_{residual}$ positiva e recuperação de vegetação, enquanto a inclinação <0 indica tendência negativa de $SAVI_{residual}$ e degradação da vegetação. A significância estatística foi testada usando teste não paramétrico Mann-Kendall ($p \leq 0.05$).



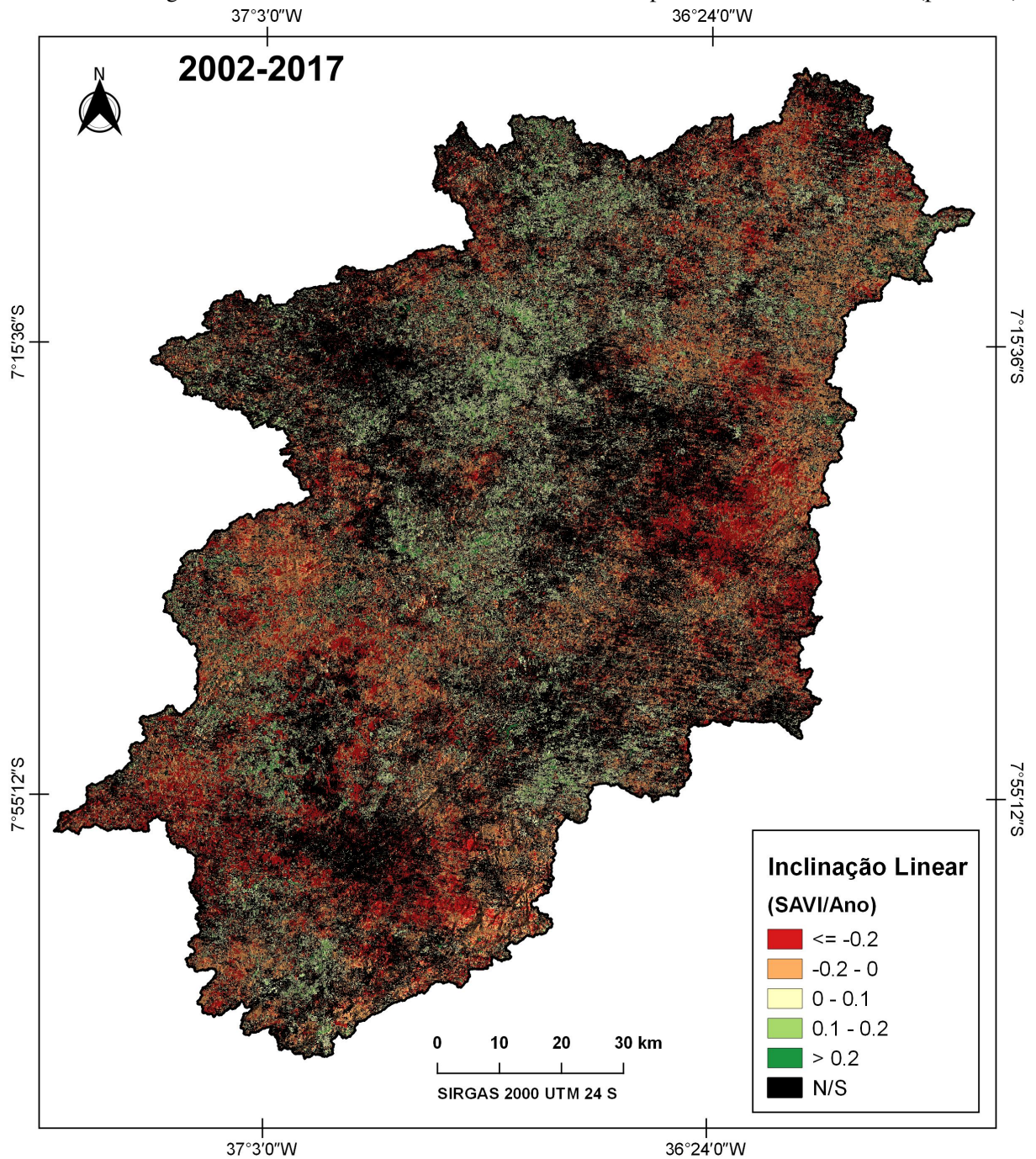
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Valores da inclinação linear de regressão linear para as tendências de $SAVI_{residual}$, removendo os efeitos da variabilidade da precipitação durante o período 2001-2017. Deve-se observar que a inclinação >0 indica tendência de $SAVI_{residual}$ positiva e recuperação de vegetação, enquanto a inclinação <0 indica tendência negativa de $SAVI_{residual}$ e degradação da vegetação. A significância estatística foi testada usando teste não paramétrico Mann-Kendall ($p \leq 0.05$).



Fonte: Elaborada pelo autor.

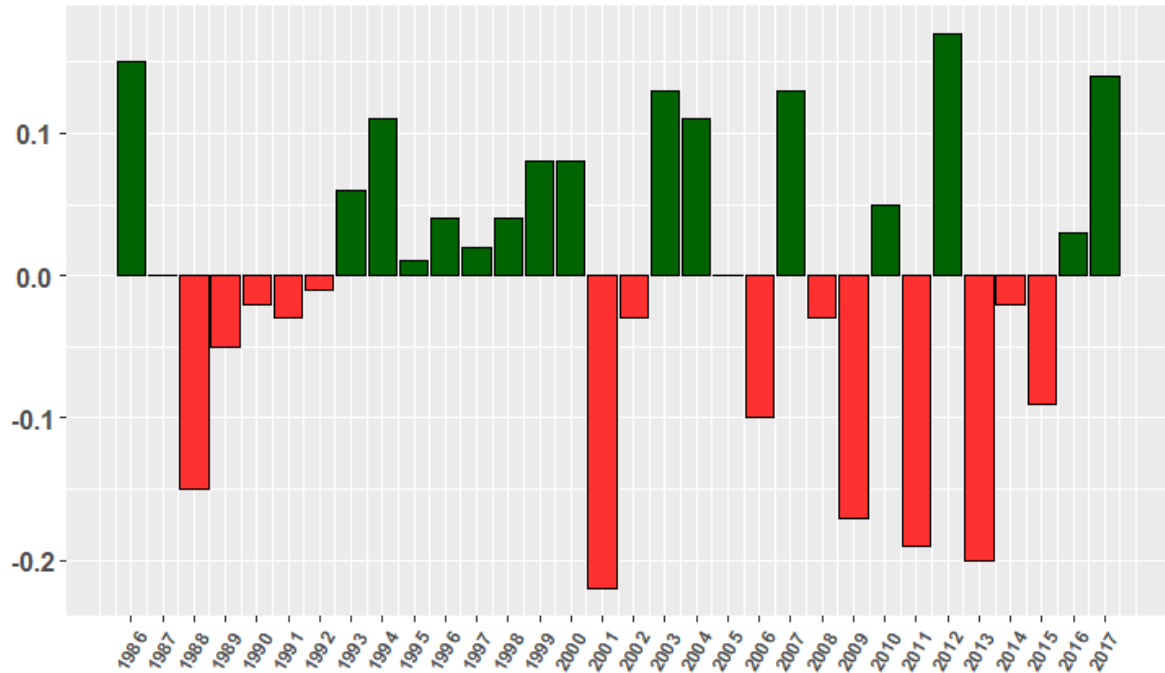
Figura 25 – Valores da inclinação linear de regressão linear para as tendências de $SAVI_{residual}$, removendo os efeitos da variabilidade da precipitação durante o período 2002-2017. Deve-se observar que a inclinação >0 indica tendência de $SAVI_{residual}$ positiva e recuperação de vegetação, enquanto a inclinação <0 indica tendência negativa de $SAVI_{residual}$ e degradação da vegetação. A significância estatística foi testada usando teste não paramétrico Mann-Kendall ($p \leq 0.05$).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 26, os anos de 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 2001, 2002, 2006, 2008, 2009, 2011, 2013, 2014 e 2015 demonstraram resíduos negativos durante o período do estudo. Nestes anos a vegetação da região era menos verde que em um ano médio geral.

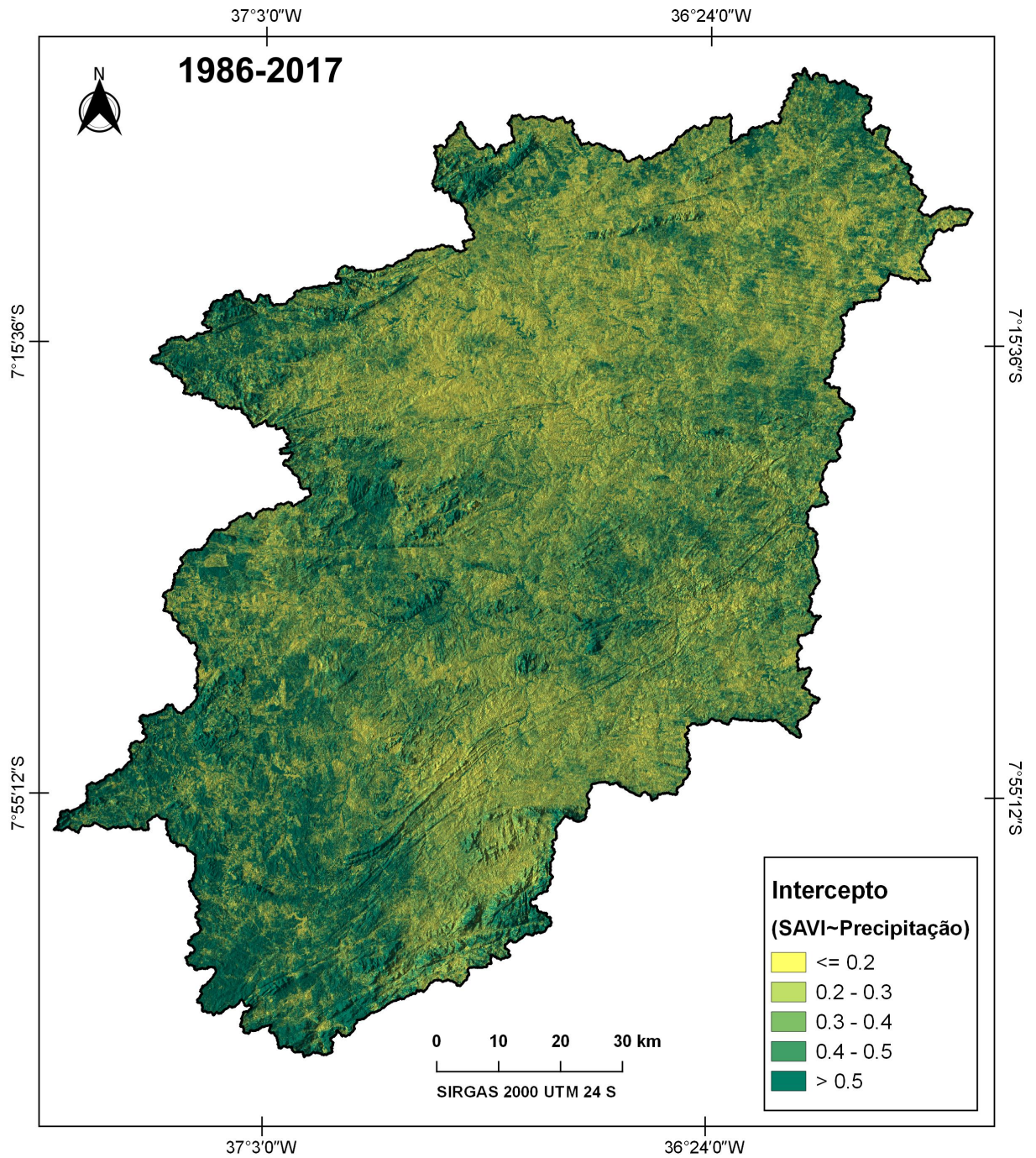
Figura 26 – Comportamento temporal dos resíduos anuais de SAVI do RESTREND durante 1986-2017.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O intercepto (Figura 27) representa o SAVI previsto quando a precipitação é zero. De forma geral os valores por-pixel do SAVI se mantiveram acima de zero, como maior observado na porção ocidental que obteve valores acima de 0,5 por pixel, o que demonstra que a vegetação apresenta uma boa resposta as variações climáticas existentes na área. Como padrão, a maior parte da área obteve valores em torno de 0,3.

Figura 27 – Valores do intercepto dos valores de regressão linear para SAVI precipitação durante 1986-2017.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 DISCUSSÃO

5.1 Distribuição espacial e variação interanual da precipitação e do SAVI

No tocante a variação da pluviosidade, Souza *et al.* (2004) afirmam que existe uma vulnerabilidade climática regional que traz consequências marcantes para seu quadro natural e econômico. Estudos anteriores apontam a existência de irregularidades das chuvas no setor oriental da área estudada conforme também apontado neste estudo, ou seja, mostram que os valores mínimos de precipitação coincidiram com os valores máximos do índice de aridez, diferentemente do setor ocidental que é mais chuvoso (ALVES *et al.*, 2017). Isso pode ser explicado pela localização das vertentes a barlavento, que recebem mais umidade das chuvas, observando que provavelmente as massas de ar úmidas advindas do oceano Atlântico, mesmas aquelas da atuação da ZCIT, que se desloca do Hemisfério Norte para o Hemisfério Sul no primeiro semestre do ano, podem ter dificuldades para alcançar a porção Oriental, e quando alcançam apresentam pouca umidade (ALVES *et al.*, 2015).

Do mesmo modo, as massas úmidas provenientes da porção Oeste do Estado precipitam-se quando encontram as barreiras orográficas da região estudada (ALVES *et al.*, 2015). Existe ainda a influência das anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos oceanos Atlântico e Pacífico sobre a precipitação da região estudada, principalmente pela atuação do ENOS e do Dipolo do Atlântico no clima do semiárido brasileiro (ANTONIO *et al.*, 2007).

Em relação a degradação vegetal observada, pode ser explicado pelo processo de ocupação humana do setor oeste da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba durante o período colonial (século XVII), onde devido à necessidade de explorar economicamente as terras para prática da pecuária extensiva, surgiu os primeiros e expressivos assentamentos humanos, principalmente seguindo os cursos dos rios principais (Rio Paraíba e Taperoá) (LIMA; ARTIGAS, 2013; SOUZA *et al.*, 2015b; SOUZA; SOUZA, 2016). Além disso, as áreas de várzeas favoreceram à prática extrativista e agrícola, acarretando mudanças expressivas da cobertura vegetal presente originalmente (LIMA; ARTIGAS, 2013; SOUZA *et al.*, 2015b; SOUZA; SOUZA, 2016).

Não obstante, Barbosa e Lakshmi Kumar (2016) aponta que em geral eventos de El Niño estão associados a condições do índice de vegetação abaixo da média, enquanto o oposto é verdade durante os eventos de La Niña. Afirma ainda que quanto maior a anomalia negativa do índice de vegetação, maior é a redução de biomassa, sobreposto à influência do ENOS, no entanto, as variações nas Temperaturas da Superfície do Mar (TSM) do Atlântico tropical

também estão ligadas as mudanças das condições da vegetação na área estudada (BARBOSA; Lakshmi Kumar, 2016). O comportamento da vegetação caatinga apresenta dependência dos extremos de precipitação do que o da região do Leste, composto pelo bioma Mata Atlântica (ANTONIO *et al.*, 2007).

Neste contexto, a literatura científica tem apontado as estiagens prolongadas (secas) como um dos principais fatores naturais no processo de desertificação, contribuindo decisivamente com a degradação do solo e a diminuição da resiliência ecológica (DIOUF; LAMBIN, 2001; REYNOLDS *et al.*, 2007), fator explícito no conceito de desertificação da UNCCD (UNCCD, 1994) (vide seção 2.2).

5.2 Relação entre SAVI e a precipitação

No semiárido brasileiro, estudos tem apontado a correlação positiva da precipitação anual e a produtividade da vegetação em comparação com a média de longo prazo e vice-versa, afirmando ainda que a dinâmica da vegetação é explicada principalmente pela disponibilidade e variabilidade espaço-temporal da precipitação, ou seja, o fornecimento de umidade que é necessária para o crescimento da vegetação (ERASMI *et al.*, 2014; ALVES *et al.*, 2015; BARBOSA; Lakshmi Kumar, 2016).

5.3 Produtividade da Vegetação e mapeamento de áreas desertificadas

Alguns estudos descreveram um aumento recente da produção de biomassa em ecossistemas do semiárido brasileiro (SCHUCKNECHT *et al.*, 2013; ERASMI *et al.*, 2014), comportamento este também observado em Sahel nos últimos por outros estudos (EKLUNDH; OLSSON, 2003; ANYAMBA; TUCKER, 2005; NICHOLSON *et al.*, 1998; HELLDÉN; TOTTRUP, 2008; FENSHOLT *et al.*, 2012; EASTMAN *et al.*, 2013; IBRAHIM *et al.*, 2015). Assim, processos ecológicos como a migração de espécies e extinções locais também favorecem o empobrecimento da vegetação, que é evidência de degradação contínua da terra (HERRMANN; TAPPAN, 2013; BRANDT *et al.*, 2014; IBRAHIM *et al.*, 2015).

Entretanto, as a diminuição da atividade fotossintética em algumas áreas podem ser atribuídas aos impactos espaço-temporais da variabilidade climática extrema na região, em resposta as anomalias das temperaturas da superfície do mar no oceano tropical (BARBOSA *et al.*, 2006), reforçando o papel fundamental das chuvas e a sua relação com a biomassa.

A pastagem e a agricultura são uns dos principais condutores humanos para a mudança da vegetação nas terras secas do mundo (XU *et al.*, 2018). Neste contexto, as áreas potencialmente degradadas no recorte temporal do presente estudo foram historicamente exploradas e ocupadas durante o início do século XIX, marcado pelo ciclo econômico do algodão, muitas áreas de pastagem nativa foram convertidas para áreas de cultivo do algodão, as áreas de pastagens foram transferidos para terras anteriormente pouco utilizadas, incorporando a essa atividade alguns tipos de solos que eram naturalmente mais restritivos a qualquer tipo de uso econômico, como os Planossolos. Logo, um tipo de caatinga mais esparsa e de baixa diversidade marcaram algumas paisagens, iniciando-se assim a expansão das áreas com níveis mais elevados de desertificação (SOUZA; SOUZA, 2016).

Além disso, como demonstrado neste pesquisa, durante fortes estiagens o processo de desmatamento pode ser intensificado, causando danos à vegetação, uma vez que já estando submetidas a elevado estresse hídrico, algumas espécies não resistiam às modificações mais expressivas (SOUZA; SOUZA, 2016).

Vale salientar que a injeção de capital pelos programas assistencialistas governamentais, como o Bolsa Família, favoreceu a mitigação dos impactos das secas cíclicas nas populações vulneráveis economicamente da área estudada, que desmatava de forma predatória a vegetação para exploração de recursos madeireiro para principalmente a produção de combustível (carvão e lenha) e construção civil, e das partes paletáveis da planta para subsistência humana e animal durante as estiagens mais intensas (SOUZA; SOUZA, 2016; SOUZA *et al.*, 2016).

A partir do método RESTREND foi possível identificar as áreas com tendências residuais negativas em uma resolução espacial de 30 m e, portanto, podem ter sofrido uma redução significativa da vegetação. Em escala nacional foi realizado o mapeamento das áreas susceptíveis à desertificação, estando a área de estudo localizada em um nível muito grave de desertificação (BRASIL, 2007). Este estudo contribui melhorando significativamente detecção de áreas degradadas em escalas locais e regionais em ambientes secos, tendo em vista que a maioria dos estudos foram realizados em escalas menos detalhadas (WESSELS *et al.*, 2007; LI *et al.*, 2012a; IBRAHIM *et al.*, 2015; HE *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2016; KUNDU *et al.*, 2017; VERÓN *et al.*, 2017), além disso, possibilitou a utilização do SAVI, que foi criado especialmente para superar a limitação do NDVI quanto a influência da interferência do solo em ambientes secos.

Neste estudo foi utilizado a precipitação total da estação de crescimento da vegetação o que pode representar uma simplificação excessiva da relação mais complexa entre disponibilidade

de água e produção primária em áreas secas (WESSELS *et al.*, 2007). Como sugestão, é importante incorporar outras variáveis socioambientais explicativas, como por exemplo, Souza *et al.* (2015a) atribuíram às altas temperaturas das camadas mais superficiais dos solos (2cm e 5cm) como um fator além da precipitação que contribuiu no processo de desertificação na área estudada, em função do desmatamento acelerado pelo qual passaram algumas áreas, uma vez que grande parte das sementes das espécies da caatinga não conseguem germinar em temperaturas que vem atingindo níveis superiores aos 35°C a essas profundidades por praticamente todo o ano.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseados nas técnicas e métodos de pesquisa adotados na presente pesquisa, tecemos as seguintes considerações finais:

- Sobre a dinâmica interanual do SAVI e da precipitação para o período de 1986 a 2017, a parte ocidental é mais afetada pelo processo de desertificação;
- Por meio dos dados Landsat foi possível analisar um padrão de comportamento da vegetação e a indicação e quantificação áreas mais afetadas pela degradação;
- Existe uma relação linear entre os dados de precipitação e o crescimento da vegetação;
- A vegetação naturalmente possui uma boa resiliência quanto as variações climáticas locais, no entanto, eventos extremos de precipitação podem afetar consideravelmente os valores do SAVI, o que pode resultar na redução de biomassa;
- Por meio da Análise de Regressão Linear foi possível compreender quando as mudanças dos valores do SAVI estão ocorrendo no ano;
- No período de 2002 a 2017, foi observado a partir de séries temporais do SAVI a diminuição da atividade fotossintética de parte da vegetação em ambientes com moderada degradação, o que indica que é necessário a realização de políticas de conservação e gestão territorial dessas áreas;
- A partir do método RESTREND foi possível mapear as áreas afetadas pela degradação da terra e em recuperação ambiental nas sub-bacias do Rio Taperoá e Alto Curso Rio Paraíba de forma confiável e levando em consideração processos biofísicos locais e regionais;
- As áreas identificadas como potencialmente degradadas neste estudo são consistentes com o que as publicações científicas anteriores apresentaram;
- Finalmente, o Google Earth Engine proporcionou processar uma grande quantidade de imagens Landsat, fornecendo dados consistentes para estudos de avaliação do processo de desertificação, antes restritas a imagens com resolução espacial grosseira, o que limitava o entendimento desse processo em escalas mais complexas, como é caso das bacias hidrográficas. Neste contexto, o presente estudo implantou o método RESTREND no GEE, contribuindo para o desenvolvimento de futuras pesquisas e políticas de mitigação do processo de desertificação em terras secas.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, Aziz Nacib. Problemática da desertificação e da savanização no Brasil intertropical. Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo, v. 53, 1977. Citado na página 25.
- ÆGISDÓTTIR, Stefanía; GERSTEIN, Lawrence H. Icelanders' and U.S. nationals' expectations about counseling: The role of nationality, sex, and Holland's typology. **Journal of Cross-Cultural Psychology**, v. 35, n. 6, p. 734–748, 2004. ISSN 00220221. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2459959>>. Citado na página 20.
- ALBALAWI, Eman K; KUMAR, Lalit. Using remote sensing technology to detect, model and map desertification: a review. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 11, n. 2, p. 791–797, 2013. Citado na página 31.
- ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; De Moraes Gonçalves, José Leonardo; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, dec 2013. ISSN 16101227. Disponível em: <http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen{_}s{_}climate{_}classification{_}map{_}for{_}>. Citado na página 35.
- ALVES, José M. Brabo; FERREIRA, Nivaldo S.; REPELLI, Carlos A. Um estudo diagnóstico das características atmosféricas associadas a atuação de um vórtice ciclônico de altos níveis sobre atlântico tropical sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 11, n. 112, p. 44–58, 1996. Citado na página 35.
- ALVES, Telma Lucia Bezerra; AZEVEDO, Pedro Vieira de; Costa dos Santos, Carlos Antonio. Influence of climate variability on land degradation (desertification) in the watershed of the upper Paraíba River. **Theoretical and Applied Climatology**, Theoretical and Applied Climatology, v. 127, n. 3-4, p. 741–751, 2017. ISSN 14344483. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00704-015-1661-1>>. Citado na página 68.
- ALVES, Telma Lucia Bezerra; AZEVEDO, Pedro Vieira de; FARIAS, André Aires de. Comportamento da precipitação pluvial e sua relação com o relevo nas microrregiões do Cariri Oriental e Ocidental do estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 6, p. 1601–1614, 2015. ISSN 1984-2295. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 69.
- AN, Youzhi; GAO, Wei; GAO, Zhiqiang. Characterizing land condition variability in Northern China from 1982 to 2011. **Environmental Earth Sciences**, v. 72, n. 3, p. 663–676, 2014. ISSN 18666299. Citado na página 32.
- ANTONIO, Carlos; DOS, Costa; BARBOSA, Ivaldo. Analysis of indices of extremes for the semi-arid of Brazil and its relations with SST and NDVI. n. November 2016, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 69.
- ANYAMBA, A.; TUCKER, C.J. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. **Journal of Arid Environments**, v. 63, n. 3, p. 596–614, nov 2005. ISSN 01401963. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140196305000510>>. Citado na página 69.
- AUBRÉVILLE, André. **Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale**. Paris: Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, 1949. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

BAI, Z. G.; DENT, D. L.; OLSSON, L.; SCHAEPMAN, M. E. Proxy global assessment of land degradation. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 3, p. 223–234, sep 2008. ISSN 02660032. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>>. Citado na página 31.

BARBOSA, H. A.; HUETE, A. R.; BAETHGEN, W. E. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 67, n. 2, p. 288–307, oct 2006. ISSN 01401963. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140196306000796>>. Citado na página 69.

BARBOSA, H. A.; Lakshmi Kumar, T. V. Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, Elsevier Ltd, v. 124, p. 377–387, 2016. ISSN 1095922X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.08.015>>. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 69.

BARRIO, Gabriel del; PUIGDEFABREGAS, Juan; SANJUAN, Maria E; STELLMES, Marion; RUIZ, Alberto. Assessment and monitoring of land condition in the Iberian Peninsula, 1989–2000. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier Inc., v. 114, n. 8, p. 1817–1832, aug 2010. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.009http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425710000970>>. Citado na página 31.

BASTIN, Jean-François; BERRAHMOUNI, Nora; GRAINGER, Alan; MANIATIS, Danae; MOLLICONE, Danilo; MOORE, Rebecca; PATRIARCA, Chiara; PICARD, Nicolas; SPARROW, Ben; ABRAHAM, Elena Maria; ALOUI, Kamel; ATESOGLU, Ayhan; ATTORE, Fabio; BASSÜLLÜ, {c{C}}a{u{g}}lar; BEY, Adia; GARZUGLIA, Monica; GARCÍA-MONTERO, Luis G.; GROOT, Nikée; GUERIN, Greg; LAESTADIUS, Lars; LOWE, Andrew J.; MAMANE, Bako. The extent of forest in dryland biomes. **Science**, v. 638, n. May, p. 635–638, 2017. ISSN 0036-8075. Citado na página 15.

BECERRIL-PIÑA, Rocio; MASTACHI-LOZA, Carlos Alberto; GONZÁLEZ-SOSA, Enrique; DÍAZ-DELGADO, Carlos; BÂ, Khalidou M. Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. **Journal of Arid Environments**, v. 120, p. 4–13, sep 2015. ISSN 1095922X. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140196315000932>>. Citado na página 33.

BOWDEN, John. The influence of moonlight on catches of insects in light-traps in Africa. Part I. The moon and moonlight. **Bulletin of Entomological Research**, v. 63, n. 1, p. 113–128, 1973. ISSN 14752670. Citado na página 43.

BRANDT, Martin; ROMANKIEWICZ, Clemens; SPIEKERMANN, Raphael; SAMIMI, Cyrus. Environmental change in time series – An interdisciplinary study in the Sahel of Mali and Senegal. **Journal of Arid Environments**, v. 105, p. 52–63, jun 2014. ISSN 01401963. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140196314000536>>. Citado na página 69.

BRASIL. **Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura/Sudene, 1972. Citado na página 39.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca PAN-Brasil**. Brasília: MMA, 2005. v. 1. 213 p. ISBN 8587166662. Citado na página 30.

_____. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação no Brasil**. Brasília: MMA, 2007. 134 p. ISBN 9788577380756. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 70.

BRAUCH, Hans Günter. Desertification - a new security challenge for the Mediterranean? Policy agenda for recognising and coping with fatal outcomes of global environmental change and potentially violent societal consequences. In: **Desertification in the Mediterranean region: a security issue**. Valencia: Springer, 2006. p. 11–85. Citado na página 24.

CAMARGO, Luis Henrique Ramos de. Geografia, epistemologia e método da complexidade. **Sociedade & Natureza**, v. 15, n. 29, p. 133–150, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

CAMARGO, Luis Henrique Ramos de; GUERRA, Antonio José Texeira. A Geografia da Complexidade: Aplicação das Teorias da Auto-Organização ao Espaço Geográfico In: Contribuições à História e à Epistemologia da Geografia. In: VITTE, Antonio Carlos (Ed.). **Contribuições à história e à epistemologia da geografia**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. Citado na página 18.

CAPRA, Fritjof. **O ponto de mutação**. [S.l.: s.n.], 1982. 1–432 p. ISBN 8535900322. Citado na página 17.

CARACRISTI, Isorlanda. Processos de desertificação no Nordeste brasileiro. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, v. 9, n. 1, p. 31–43, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 21.

CHOU, Nan-Ting; DREGNE, H E. Desertification control: cost/benefit analysis. **Desertification control bulletin**, 1993. Citado na página 26.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Análise de sistemas em geografia**. São Paulo: Editora Hucitec, Editora da Universidade de São Paulo, 1979. 106 p. Citado na página 18.

_____. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 256 p. ISBN 9788521201779. Disponível em: <<http://www.blucher.com.br/produto/01779/modelagem-de-sistemas-ambientais>>. Citado na página 18.

CHRISTOFOLETTI, Anderson Luís Hebling. Sistemas dinâmicos: as abordagens da teoria do caos e da geometria fractal em geografia. In: VITTE, Antonio Carlos; GUERRA, Antonio José Texeira (Ed.). **Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. Bertrand Brasil. 5. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011. p. 87–127. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

COLLADO, Alfredo D.; CHUVIECO, Emilio; CAMARASA, Ana. Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-rangeland boundary of Argentina. **Journal of Arid Environments**, v. 52, n. 1, p. 121–133, 2002. ISSN 01401963. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140196301909802>>. Citado na página 32.

CONACHER, Arthur. Land Degradation and Desertification: History, Nature, Causes, Consequences, and Solutions. **Water Resources Management**, v. 1, p. 1–, 2004. Citado na página 21.

CONTI, José Bueno. **A Geografia física e as relações sociedade/natureza no mundo tropical**. 2. ed. São Paulo: Humanitas Publicações - FFLCH/USP, 2002. 36 p. ISBN 8586087122. Citado na página 27.

_____. O conceito de desertificação. **Climatologia e Estudos da Paisagem**, v. 3, n. 2, p. 39–52, 2008. Citado na página 21.

DAVIS, Diana K. **Resurrecting the granary of Rome: environmental history and French colonial expansion in North Africa**. Athens: Ohio University Press, 2007. v. 58. Citado na página 24.

_____. Deserts and drylands before the age of desertification. In: BEHNKE, Roy; MORTIMORE, Michael (Ed.). **The End of Desertification?** Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. p. 203–223. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 27.

_____. Between Sand and Sea: Constructing Mediterranean Plant Ecology. In: LAVE, Rebecca; BIERMANN, Christine; LANE, Stuart N (Ed.). **The Palgrave Handbook of Critical Physical Geography**. Cham: Springer, 2018. p. 129–151. Citado na página 23.

De Jong, Rogier; VERBESSELT, Jan; ZEILEIS, Achim; SCHAEPMAN, Michael E. Shifts in global vegetation activity trends. **Remote Sensing**, v. 5, n. 3, p. 1117–1133, mar 2013. ISSN 20724292. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/5/3/1117/>>. Nenhuma citação no texto.

DIOUF, A.; LAMBIN, E. F. Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: Remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal. **Journal of Arid Environments**, v. 48, n. 2, p. 129–148, 2001. ISSN 01401963. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 69.

D'ODORICO, Paolo; BHATTACHAN, Abinash; DAVIS, Kyle F.; RAVI, Sujith; RUNYAN, Christiane W. Global desertification: Drivers and feedbacks. **Advances in Water Resources**, Elsevier Ltd, v. 51, p. 326–344, jan 2013. ISSN 03091708. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.01.013><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0309170812000231>>. Citado 5 vezes nas páginas 15, 24, 25, 27 e 29.

DONG, Jinwei; XIAO, Xiangming; MENARGUEZ, Michael A.; ZHANG, Geli; QIN, Yuanwei; THAU, David; BIRADAR, Chandrashekar; MOORE, Berrien. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier Inc., v. 185, p. 142–154, 2016. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.016>>. Citado na página 32.

DREGNE, Harold E. Guarded Optimism for the Future of Arid Lands: Aridity and Land Degradation. **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, v. 27, n. 8, p. 16–33, oct 1985. ISSN 0013-9157. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00139157.1985.9931298>>. Citado na página 26.

DREGNE, H E. Soil erosion: cause and effect. **Land Use Policy**, Elsevier, v. 4, n. 4, p. 412–418, 1987. Citado na página 26.

DREGNE, H. E. Land Degradation in the Drylands. **Arid Land Research and Management**, v. 16, n. 2, p. 99–132, jan 2002. ISSN 1532-4982. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/153249802317304422>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 29.

DUQUE, José Guimarães. **O Nordeste e as lavouras xerófilas**. 3. ed. Mossoró: ESAM / Fundação Guimarães Duque, 1980. Citado na página 26.

EASTMAN, J.; SANGERMANO, Florencia; MACHADO, Elia; ROGAN, John; ANYAMBA, Assaf. Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011. **Remote Sensing**, v. 5, n. 10, p. 4799–4818, sep 2013. ISSN 2072-4292. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/5/10/4799>>. Citado na página 69.

ECKERT, Sandra; HÜSLER, Fabia; LINIGER, Hanspeter; HODEL, Elias. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. **Journal of Arid Environments**, Elsevier Ltd, v. 113, p. 16–28, feb 2015. ISSN 1095922X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.09.001><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140196314001797>>. Citado na página 32.

EISFELDER, Christina; KUENZER, Claudia; DECH, Stefan. Derivation of biomass information for semi-arid areas using remote-sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 9, p. 2937–2984, may 2012. ISSN 0143-1161. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2011.620034>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

EKLUNDH, Lars; OLSSON, Lennart. Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 8, apr 2003. ISSN 00948276. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2002GL016772>>. Citado na página 69.

ELMORE, Andrew J.; MUSTARD, John F.; MANNING, Sara J.; LOBELL, David B. Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments. **Remote Sensing of Environment**, v. 73, n. 1, p. 87–102, 2000. ISSN 00344257. Citado na página 32.

EMBERGER, Louis. Aperçu générale [de la végétation]. **La Science au Maroc**, p. 149–182, 1934. Citado na página 23.

ENCARNAÇÃO, Sara. **Espaço Geográfico e Complexidade: Modelação do crescimento das áreas construídas na aglomeração de Lisboa**. 217 p. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa, 2011. Disponível em: <http://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CDIQFjAD&url=http://run.unl.pt/bitstream/10362/7206/1/TeseDoutoramentoSaraEncarnacao.pdf&ei=s_MjVc2iCYzdUabOg2g&usg=AFQjCNEZx6Tb4T5oyhTs_F7>. Citado na página 19.

ERASMI, Stefan; SCHUCKNECHT, Anne; BARBOSA, Marx P.; MATSCHULLAT, Joerg. Vegetation greenness in northeastern brazil and its relation to ENSO warm events. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 3041–3058, apr 2014. ISSN 20724292. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/6/4/3041/>>. Citado na página 69.

EVANS, Jason; GEERKEN, Roland. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. **Journal of Arid Environments**, v. 57, n. 4, p. 535–554, 2004. ISSN 01401963. Citado 3 vezes nas páginas 16, 31 e 47.

FENSHOLT, Rasmus; LANGANKE, Tobias; RASMUSSEN, Kjeld; REENBERG, Anette; PRINCE, Stephen D.; TUCKER, Compton; SCHOLLES, Robert J.; LE, Quang Bao; BONDEAU, Alberte; EASTMAN, Ron; EPSTEIN, Howard; GAUGHAN, Andrea E.; HELLDEN, Ulf; MBOW, Cheikh; OLSSON, Lennart; PARUELO, Jose; SCHWEITZER, Christian; SEAQUIST, Jonathan; WESSELS, Konrad. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007 — an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. **Remote Sensing of Environment**, v. 121, p. 144–158, jun 2012. ISSN 00344257. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425712000545>>. Citado na página 69.

FENSHOLT, Rasmus; SANDHOLT, Inge; RASMUSSEN, Michael Schultz. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment

using in situ measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 3-4, p. 490–507, 2004. ISSN 00344257. Nenhuma citação no texto.

FERREIRA, Antonio Geraldo; MELLO, Namir Giovanni da Silva. Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes Sobre a Região Nordeste Do Brasil E a Influência Dos Oceanos Pacífico E Atlântico No Clima Da Região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15–28, dec 2005. ISSN 2237-8642. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25215>>. Citado na página 35.

FLOOD, Neil. Seasonal composite landsat TM/ETM+ Images using the medoid (a multi-dimensional median). **Remote Sensing**, v. 5, n. 12, p. 6481–6500, 2013. ISSN 20724292. Citado na página 43.

FUNK, Chris; PETERSON, Pete; LANDSFELD, Martin; PEDREROS, Diego; VERDIN, James; SHUKLA, Shraddhanand; HUSAK, Gregory; ROWLAND, James; HARRISON, Laura; HOELL, Andrew; MICHAELSEN, Joel. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 1–21, 2015. ISSN 20524463. Citado na página 43.

Gomes, Filho, Manoel F; GALVÃO, Carlos O; RICARTE, Rita M; SILVA, Maria C L; PONTES, Alana De L; BECKER, Carmem T. Contribuição da precipitação de mesoescala para o volume de água armazenada no reservatório de Boqueirão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 399–402, 2003. Citado na página 36.

GOMES, Rodrigo Dutra; ESPINDOLA, Carlos Roberto. Interdisciplinaridade sistêmica e estudos geográficos ambientais. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n. 16, p. 95–114, 2007. Citado na página 17.

GORELICK, Noel; HANCHER, Matt; DIXON, Mike; ILYUSHCHENKO, Simon; THAU, David; MOORE, Rebecca. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, n. 10, p. 18–27, jul 2017. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425708002198><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425717302900>>. Citado na página 32.

GORSE, Jean Eugene; STEEDS, David R. **Desertification in the Sahelian and Sudanian zones of West Africa**. Washington: World Bank, 1987. Citado na página 26.

GOUDIE, Andrew. **The human impact on the natural environment**. 3. ed. Oxford: Basil Blackwell Ltd., 1990. 388 p. ISBN 0631172289. Citado na página 26.

GRAETZ, R D. Desertification: a tale of two feedbacks. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 1991. Citado na página 26.

GREGORY, K. J. **A natureza da Geografia Física**. Rio de Janeiro: Bertrand, 1992. 183 p. Citado na página 18.

GRIMM, Volker; WISSEL, Christian. Babel, or the ecological stability discussions: An inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion. **Oecologia**, v. 109, n. 3, p. 323–334, 1997. ISSN 00298549. Citado na página 20.

GROVE, Richard H. **Green imperialism: Colonial expansion, tropical Island Edens and the origins of environmentalism, 1600–1860**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 540 p. ISBN 9789004310087. Citado na página 22.

_____. **Ecology, Climate and Empire: Colonialism and Global Environmental History, 1400-1940**. [S.l.: s.n.], 1997. 237 p. ISSN 10845453. ISBN 1874267189. Citado na página 22.

HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R.; HANCHER, M.; TURUBANOVA, S. A.; TYUKAVINA, A.; THAU, D.; STEHMAN, S. V.; GOETZ, S. J.; LOVELAND, T. R.; KOMMAREDDY, A.; EGOROV, A.; CHINI, L.; JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. **Science**, v. 342, n. 6160, p. 850–853, 2013. ISSN 10959203. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1244693>>. Citado na página 32.

HARRIS, A.; CARR, A. S.; DASH, J. Remote sensing of vegetation cover dynamics and resilience across southern Africa. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Elsevier B.V., v. 28, n. 1, p. 131–139, 2014. ISSN 15698432. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.11.014>>. Citado na página 32.

HE, Chunyang; TIAN, Jie; GAO, Bin; ZHAO, Yuanyuan. Differentiating climate- and human-induced drivers of grassland degradation in the Liao River Basin, China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 1, 2015. ISSN 15732959. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 70.

HELLDÉN, Ulf. Desertification-Tim for An Assessment? **Ambio**, v. 20, n. 8, p. 372–383, 1991. Citado na página 26.

HELLDÉN, Ulf; TOTTRUP, Christian. Regional desertification: A global synthesis. **Global and Planetary Change**, v. 64, n. 3-4, p. 169–176, dec 2008. ISSN 09218181. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921818108001276>>. Citado na página 69.

HERRMANN, S.M.; TAPPAN, G.G. Vegetation impoverishment despite greening: A case study from central Senegal. **Journal of Arid Environments**, v. 90, p. 55–66, mar 2013. ISSN 01401963. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140196312002911>>. Citado na página 69.

HIGGINBOTTOM, Thomas P.; SYMEONAKIS, Elias. Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: Current frameworks and future directions. **Remote Sensing**, v. 6, n. 10, p. 9552–9575, 2014. ISSN 20724292. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

HOCHSTRASSER, T.; MILLINGTON, James D. A.; PAPANASTASIS, Vasilios P.; PARSONS, Anthony J.; ROGGERO, Pier Paolo; BRAZIER, Richard E.; ESTRANY, Joan; FARINA, Almo; PUTTOCK, Alan. The Study of Land Degradation in Drylands: State of the Art. In: MUELLER, Eva Nora; WAINWRIGHT, John; PARSONS, Anthony J.; TURNBULL, Laura (Ed.). **Patterns of Land Degradation in Drylands**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 13–54. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 31.

HOLLANDER, Myles; WOLFE, Douglas A; CHICKEN, Eric. **Nonparametric statistical methods**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. v. 751. Citado na página 47.

HOLLING, C S. Resilience and Stability of Ecological Systems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 4, n. 1, p. 1–23, 1973. ISSN 0066-4162. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>>. Citado na página 20.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, H.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. F. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195–213, 2002. Disponível em: <https://ac-els-cdn-com.sire.ub.edu/S0034425702000962/1-s2.0-S0034425702000962-main.pdf?{_}tid=420e9dda-1821-11e8-b53d-00000aacb35d{\&}acdnat=1519339356{_}ef83dc686b96e75a110fbad>. Citado na página 32.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295–309, 1988. ISSN 00344257. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 44.

HUMBOLDT, Alexander Von; BONPLAND, Aimé. **Personal narrative of travels to the equinoctial regions of the new Continent, 1799–1804 (Vol. IV)**. London: Printed for Longman, Hurst, Rees, Orme and Brown, 1819. 573 p. ISBN 9789004310087. Citado na página 22.

IBRAHIM, Yahaya Z.; BALZTER, Heiko; KADUK, Jörg; TUCKER, Compton J. Land degradation assessment using residual trend analysis of GIMMS NDVI3g, soil moisture and rainfall in Sub-Saharan West Africa from 1982 to 2012. **Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 5471–5494, apr 2015. ISSN 20724292. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/7/5/5471>>. Citado 4 vezes nas páginas 16, 32, 69 e 70.

JELTSCH, Florian; TURNBULL, Laura; SCARSOGLIO, Stefania; ALADOS, Concepcion L.; GALLART, Francesc; MUELLER, Eva Nora; BARBIER, Nicolas; MILLINGTON, James D. A.; WAINWRIGHT, John; WIECZOREK, Mareike; GRIMM, Volker. Resilience, Self-Organization, Complexity and Pattern Formation. In: MUELLER, Eva Nora; WAINWRIGHT, John; PARSONS, Anthony J.; TURNBULL, Laura (Ed.). **Patterns of Land Degradation in Drylands**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. p. 55–84. ISBN 978-94-007-5727-1. Citado na página 20.

JOHNSON, Douglas L. The Human Dimensions of Desertification. **Economic Geography**, v. 53, n. 4, p. 317, oct 1977. ISSN 00130095. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/142968?origin=crossref>>. Citado na página 25.

KENNEDY, Robert E.; YANG, Zhiqiang; GORELICK, Noel; BRAATEN, Justin; CAVALCANTE, Lucas; COHEN, Warren B.; HEALEY, Sean. Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 10, n. 5, p. 1–10, 2018. ISSN 20724292. Citado na página 43.

KREBS, Charles J. **The balance of nature? Ecological issues in the conservation of species and communities**. Illinois: University of Chicago Press, 1992. v. 7. 139 p. ISSN 01695347. ISBN 0-226-66830-4. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016953479290160D>>. Citado na página 20.

KUHN, Thomas S. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: Perspectiva S.A, 1998. v. 5. 257 p. Citado na página 17.

KUNDU, Arnab; PATEL, N. R.; SAHA, S. K.; DUTTA, Dipanwita. Desertification in western Rajasthan (India): an assessment using remote sensing derived rain-use efficiency and residual trend methods. **Natural Hazards**, Springer Netherlands, v. 86, n. 1, p. 297–313, mar 2017. ISSN 15730840. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11069-016-2689-y>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 32 e 70.

LAVAUDEN, L. Les forêts du Sahara. **Revue Eaux et Forêts**, v. 7, n. 65, p. 329–341, 1927. Citado na página 24.

Le Houérou, H N. The nature and causes of desertization. **Desertification: environmental degradation in and around arid lands**. Westview Press: Boulder, 1977. Citado na página 25.

LEROUX, Louise; BÉGUÉ, Agnès; Lo Seen, Danny; JOLIVOT, Audrey; KAYITAKIRE, Francois. Driving forces of recent vegetation changes in the Sahel: Lessons learned from regional and local level analyses. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier Inc., v. 191, p. 38–54, 2017. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.014>>. Citado na página 32.

LHERMITTE, S.; VERBESSELT, J.; VERSTRAETEN, W.W.; COPPIN, P. A comparison of time series similarity measures for classification and change detection of ecosystem dynamics. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier Inc., v. 115, n. 12, p. 3129–3152, dec 2011. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.020http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425711002446>>. Citado na página 31.

LI, Ang; WU, Jianguo; HUANG, Jianhui. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: A critical application of RESTREND in inner Mongolia. **Landscape Ecology**, v. 27, n. 7, p. 969–982, 2012. ISSN 09212973. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 70.

LI, Suying; VERBURG, Peter H.; LV, Shihai; WU, Jingle; LI, Xiaobing. Spatial analysis of the driving factors of grassland degradation under conditions of climate change and intensive use in Inner Mongolia, China. **Regional Environmental Change**, v. 12, n. 3, p. 461–474, 2012. ISSN 14363798. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 47.

LI, Xiaosong; WANG, Hongyan; ZHOU, Shufang; SUN, Bin; GAO, Zhihai. Did ecological engineering projects have a significant effect on large-scale vegetation restoration in Beijing-Tianjin Sand Source Region, China? A remote sensing approach. **Chinese Geographical Science**, v. 26, n. 2, p. 216–228, 2016. ISSN 1993064X. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 70.

LIAN, Jie; ZHAO, Xueyong; LI, Xin; ZHANG, Tonghui; WANG, Shaokun; LUO, Yongqing; ZHU, Yangchun; FENG, Jing. Detecting sustainability of desertification reversion: Vegetation trend analysis in part of the agro-pastoral transitional zone in Inner Mongolia, China. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 2, p. 211, feb 2017. ISSN 20711050. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2071-1050/9/2/211>>. Citado na página 32.

LIMA, Valéria Raquel Porto de; ARTIGAS, Rafael Camara. Propuesta de ordenación para la conservación y manejo de los recursos naturales en el bioma de caatinga. **Mercator**, v. 11, n. 29, p. 191–210, 2013. Citado na página 68.

LIMBERGER, Leila. Abordagem Sistêmica E Complexidade Na Geografia. **Geografia**, v. 15, n. 2, p. 95–109, 2006. Citado na página 18.

LIU, Fengshan; CHEN, Ying; LU, Haiying; SHAO, Hongbo. Albedo indicating land degradation around the Badain Jaran Desert for better land resources utilization. **Science of the Total Environment**, Elsevier B.V., v. 578, p. 67–73, 2017. ISSN 18791026. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.171>>. Citado na página 32.

LOBELL, David B.; THAU, David; SEIFERT, Christopher; ENGLE, Eric; LITTLE, Bertis. A scalable satellite-based crop yield mapper. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier Inc., v. 164, p. 324–333, 2015. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.021>>. Citado na página 32.

LOVELAND, Thomas R.; DWYER, John L. Landsat: Building a strong future. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier B.V., v. 122, n. October 2000, p. 22–29, jul 2012. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.022><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425712000351>>. Citado na página 32.

MACE, G; MASUNDIRE, H; BAILLIE, J. **Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends, Vol 1**. 1. ed. Washington: Island Press, 2005. 79–115 p. ISBN 1559632275. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en{%&}btnG=Search{%&}q=intitle:Ecosystems+and+human+well-being:+current+stateand+tr>>. Citado na página 29.

MAINGUET, Monique. What is Desertification?: Definitions and Evolution of the Concept. In: MAINGUE, Monique (Ed.). **Desertification**. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994. p. 1–16. Citado na página 27.

_____. **L'homme et la sécheresse**. Paris: Masson, Collection Géographie,, 1995. Citado na página 29.

_____. Desertification: Global Degradation of Drylands. In: BRAUCH, Hans Günter; MARQUINA, Antonio; SELIM, Mohammad El-sayed; LIOTTA, Peter H; ROGERS, Paul F. (Ed.). **Security and Environment in the Mediterranean**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003. p. 645–653. Citado na página 27.

MARENGO, Jose A.; BERNASCONI, Mauro. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v. 129, n. 1-2, p. 103–115, 2015. ISSN 01650009. Citado na página 15.

MAURER, Brian A. **A hierarchical concept of ecosystems**. Princeton: Princeton University Press, 1987. v. 2. 26–27 p. ISSN 01695347. ISBN 0691084378. Citado na página 20.

MIAO, Lijuan; YE, Peilong; HE, Bin; CHEN, Lizi; CUI, Xuefeng. Future climate impact on the desertification in the dry land asia using AVHRR GIMMS NDVI3g data. **Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 3863–3877, 2015. ISSN 20724292. Citado na página 32.

MINER, Edmon. Subsídio ao Plano de Ação Mundial para Combater a Desertificação–Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). **Revista Brasileira de Geografia, Rio de Janeiro**, v. 42, n. 3, p. 612–637, 1980. Citado na página 26.

MUNSON, Seth M.; LONG, A. Lexine; WALLACE, Cynthia S.A.; WEBB, Robert H. Cumulative drought and land-use impacts on perennial vegetation across a North American dryland region. **Applied Vegetation Science**, v. 19, n. 3, p. 430–441, jul 2016. ISSN 1654109X. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/avsc.12228>>. Citado na página 32.

MYNENI, R.B.; WILLIAMS, D.L. On the relationship between FAPAR and NDVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 3, p. 200–211, sep 1994. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0034425794900167>>. Nenhuma citação no texto.

NASCIMENTO, Flávio Rodrigues do. O fenômeno da desertificação. **Goiânia: UFG**, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 21, 25, 26 e 27.

NICHOLSON, S. E.; TUCKER, C. J.; BA, M. B. Desertification, Drought, and Surface Vegetation: An Example from the West African Sahel. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 5, p. 815–829, 1998. ISSN 00030007. Citado na página 69.

NIMER, Edmon. Desertificação; realidade ou mito? **Revista Brasileira de Geografia**, v. 50, n. 1, p. 7–40, 1988. Citado na página 26.

PATELA, Nirav N.; ANGIULI, Emanuele; GAMBA, Paolo; GAUGHAN, Andrea; LISINI, Gianni; STEVENS, Forrest R.; TATEM, Andrew J.; TRIANNI, Giovanna. Multitemporal settlement and population mapping from landsat using google earth engine. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Elsevier B.V., v. 35, n. PB, p. 199–208, 2015. ISSN 1872826X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.005>>. Citado na página 32.

PENMAN, H. L. The physical bases of irrigation control. **The physical bases of irrigation control.**, London, 1952. Citado na página 28.

PEREIRA, Inocêncio J. J. F.; NASCIMENTO, Flávio Rodrigues do. Panoramada desertificação em Chicualacuala (África do Sul). **Mercator**, v. 12, n. 29, p. 171–189, 2013. Citado na página 29.

PERINI, Luigi; CECCARELLI, Tomaso; ZITTI, Marco; SALVATI, Luca. Insight desertification process: bio-physical and socio-economic drivers in Italy. **Journal of Agrometeorology**, v. 3, p. 45–55, 2009. Citado na página 15.

PRICE, J.C. Estimating leaf area index from satellite data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 3, p. 727–734, may 1993. ISSN 01962892. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/225538/>>. Citado na página 32.

PRINCE, S. D.; BECKER-RESHEF, I.; RISHMAWI, K. Detection and mapping of long-term land degradation using local net production scaling: Application to Zimbabwe. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier Inc., v. 113, n. 5, p. 1046–1057, 2009. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.016>>. Citado na página 32.

PRINCE, Stephen D.; TUCKER, Compton J. Satellite remote sensing of rangelands in Botswana II. NOAA AVHRR and herbaceous vegetation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 1555–1570, nov 1986. ISSN 0143-1161. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431168608948953>>. Nenhuma citação no texto.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 48, n. 2, p. 119–126, 1994. ISSN 00344257. Citado na página 32.

QI, J.; KERR, Y.; CHEHBOUNI, A. External factor consideration in vegetation index development. **Proceedings of 6th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing**, n. July, p. 723–730, 1994. Citado na página 32.

RAPP, A. A Review of Desertification in Africa. **Water, Vegetation and Man. Secretariat for International Ecology, Stockholm**, 1974. Citado na página 25.

REYNOLDS, J. F.; SMITH, D. M. S.; LAMBIN, E. F.; TURNER, B. L.; MORTIMORE, M.; BATTERBURY, S. P. J.; DOWNING, T. E.; DOWLATABADI, H.; FERNANDEZ, R. J.; HERRICK, J. E.; HUBER-SANNWALD, E.; JIANG, H.; LEEMANS, R.; LYNAM, T.; MAESTRE, F. T.; AYARZA, M.; WALKER, B. Global Desertification: Building a Science for Dryland Development. **Science**, v. 316, n. 5826, p. 847–851, may 2007. ISSN 0036-8075. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17495163><http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1131634>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 69.

ROBINSON, Nathaniel P.; ALLRED, Brady W.; JONES, Matthew O.; MORENO, Alvaro; KIMBALL, John S.; NAUGLE, David E.; ERICKSON, Tyler A.; RICHARDSON, Andrew D. A dynamic landsat derived normalized difference vegetation index (NDVI) product for the conterminous United States. **Remote Sensing**, v. 9, n. 8, p. 863, 2017. ISSN 20724292. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/9/8/863>>. Citado na página 32.

ROCHETTE, Réne Marceau. Le Sahel en lutte contre la désertification: leçons d'expériences. 1989. Citado na página 26.

RODRIGUES, Valdemar; LINHARES, M C; Oliveira Galvão, A L; GORGÔNIO, A. Avaliação do quadro da desertificação no Nordeste do Brasil: diagnóstico e perspectivas. In: **Conferência Internacional sobre Impactos de Variações Climáticas e desenvolvimento Sustentável em Regiões Semi-Aridas. Proceedings... Fortaleza, Brasil**. [S.l.: s.n.], 1992. p. 2375–2408. Citado na página 26.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: **Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium**. [s.n.], 1973. v. 1, p. 309–317. ISBN 0027-8424. ISSN 00344257. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>>. Citado na página 31.

RUBIO, Jose. Desertification: Definiciones. Marco Conceptual. In: **Seminário Desertificación y Cambio Climático**. Valencia: Centro de Investigaciones sobre Desertificación – CIDE/Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP), C.S.I.C, 1995. Citado na página 27.

SAMPAIO, E S B. Overview of the Brazilian caatinga. In: **Seasonally dry tropical forests**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2009. p. 35–63. Citado na página 15.

SANTOS, Edilton José dos; FERREIRA, Cícero Alves; Silva, Jr, José Maria F. da. **Geologia e recursos minerais do estado da Paraíba**. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2002. 142 p. Citado na página 36.

SBCS, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa Agroindústria Tropical, 2018. ISSN 09266690. ISBN 978-85-7035-359-7. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 42.

SCHUCKNECHT, Anne; ERASMI, Stefan; NIEMEYER, Irmgard; MATSCHULLAT, Jörg. Assessing vegetation variability and trends in north-eastern Brazil using AVHRR and MODIS NDVI time series. **European Journal of Remote Sensing**, v. 46, n. 1, p. 40–59, 2013. ISSN 11298596. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 69.

SILVA, Andrezza Karla de Oliveira; SILVA, Helena Paula de Barros. O Processo De Desertificação E Seus Impactos Sobre Os Recursos Naturais E Sociais No Município De Cabrobó – Pernambuco – Brasil. **Revista Eletrônica de Humanidades do Curso de Ciências Sociais da UNIFAP**, v. 8, p. 203–215, 2015. Disponível em: <<https://periodicos.unifap.br/index.php/pracs/article/viewArticle/1315>>. Citado na página 24.

SILVESTRE, Miriam Rodrigues; SANT'ANNA, NETO, João Lima; FLORES, Edilson Ferreira. Critérios estatísticos para definir anos padrão: uma contribuição à climatologia geográfica. **Revista Formação**, v. 2, n. 20, p. 23–53, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 53.

SOULARD, Christopher E.; ALBANO, Christine M.; VILLARREAL, Miguel L.; WALKER, Jessica J. Continuous 1985-2012 Landsat monitoring to assess fire effects on meadows in Yosemite National Park, California. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, p. 1–16, 2016. ISSN 20724292. Citado na página 32.

SOUZA, Bartolomeu Israel. **Cariri paraibano: do silêncio do lugar à desertificação**. 198 p. Tese (Tese) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 39 e 43.

SOUZA, Bartolomeu Israel; ROSENDO, Eliamin Eldan Queiroz; BIZERRA, Dennys da Silva; MELO, Haerte Durgel Araujo Coutinho de; MEDEIROS, Joseilson Ramos de; ITOZAMIR, Williton. Intervenções governamentais recentes nos cariris velhos da Paraíba - Brasil: reflexos na agropecuária, na degradação das terras e na cidadania. **GEOgraphia**, n. 37, p. 154–177, 2016. Citado na página 70.

SOUZA, Bartolomeu Israel De; MACEDO, Monica Larissa Aires; SILVA, Glauciene Justino Ferreira da. Temperatura dos solos e suas influencias na regeneração natural da Caatinga nos Cariris Velhos - PB. **R. Ra'e Ga**, v. 35, p. 261–287, 2015. Citado na página 71.

SOUZA, Bartolomeu Israel de; QUEIROZ, Rubens Teixeira; CARDOSO, Eini Celly Moraes. Degradação e riscos à desertificação no Alto Curso do rio Paraíba - PB/Brasil. **Revista da Anpege**, v. 11, n. 16, p. 201–222, 2015. ISSN 1679768X. Disponível em: <<http://anpege.org.br/revista/ojs-2.4.6/index.php/anpege08/article/download/460/241>>. Citado na página 68.

SOUZA, Bartolomeu I. de; SILANS, Alain M. B. P. de; SANTOS, José B. dos. Contribuição ao estudo da desertificação na Bacia do Taperoá. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2-3, p. 292–298, 2004. ISSN 1082-989X. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci{arttext}{&pid=S1415-43662004000200019{&lng=p>>. Citado na página 68.

SOUZA, Bartolomeu Israel de; SOUZA, Ramon Santos. Processo de ocupação dos Cariris Velhos – PB e efeitos na cobertura vegetal: contribuição à Biogeografia Cultural do semiárido. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 2, p. 229–258, 2016. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333248759001>>. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 70.

STELLMES, Marion; SONNENSCHNEIN, Ruth; RÖDER, Achim; UDELHOVEN, Thomas. Land Degradation Assessment and Monitoring of Drylands. In: THENKABAIL, P. S. (Ed.). **Remote Sensing of Water Resources, Disasters, and Urban Studies**. Boca Raton: CRC Press, 2015. v. 3, p. 417. Citado na página 31.

STURROCK, Hugh Jw; COHEN, Justin M.; KEIL, Petr; TATEM, Andrew J.; Le Menach, Arnaud; NTSALINTSHALI, Nyasatu E.; HSIANG, Michelle S.; GOSLING, Roland D. Fine-scale malaria risk mapping from routine aggregated case data. **Malaria Journal**, v. 13, n. 1, p. 421, 2014. ISSN 14752875. Disponível em: <<http://malariajournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/1475-2875-13-421>>. Citado na página 32.

SYMEONAKIS, E.; DRAKE, N. Monitoring desertification and land degradation over sub-saharan africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 3, p. 573–592, 2004. ISSN 13665901. Citado na página 31.

THORNTHWAITE, Charles Warren. **Atlas of climatic types in the United States 1900-1939**. Washington: Departament of Agriculture/Forest Service: Miscel Publ., nº 421, 1941. Citado na página 28.

TUCKER, Compton J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127–150, 1979. ISSN 00344257. Citado na página 31.

TUCKER, Compton J.; JUSTICE, Christopher O.; PRINCE, S. D. Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 1571–1581, nov 1986. ISSN 0143-1161. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431168608948954>>. Nenhuma citação no texto.

UNCCD. **Elaboration of an international convention to combat desertification in countries experiencig serious drought and/or desertification, particularly in Africa**. 1994. 1–58 p. Citado 3 vezes nas páginas 15, 29 e 69.

UNCOD, United Nations Conference on Desertification. Plan of Action and Resolutions. In: **United Nations Conference on Desertification, Nairobi, Kenya**. Nairobi. Printed in New York: UN, 1977. Citado na página 25.

_____. **United Nations Conference on Desertification, 29 August – 9 September 1977. Round-Up, Plan of Action and Resolutions**. New York: United Nations, 1977. Disponível em: <<http://www.ciesin.org/docs/002-478/002-478.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.

UNEP, United Nations Environment Programme. **World Atlas of Desertification**. 2. ed. London: Arnold, 1997. 192 p. Citado na página 27.

Van den Elsen, Erik; JETTEN, Victor. Combatting desertification using a multidisciplinary approach. **Catena**, v. 128, p. 211–213, may 2015. ISSN 03418162. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S034181621400277X>>. Citado na página 15.

VASCONCELOS-SOBRINHO, João de. **O deserto brasileiro**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1977. Citado na página 25.

VERÓN, Santiago R.; BLANCO, Lisandro J.; TEXEIRA, Marcos A.; IRISARRI, J. Gonzalo N.; PARUELO, José M. Desertification and ecosystem services supply: The case of the Arid Chaco of South America. **Journal of Arid Environments**, n. December 2016, 2017. ISSN 1095922X. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 70.

VERÓN, Santiago R.; PARUELO, José M. Desertification alters the response of vegetation to changes in precipitation. **Journal of Applied Ecology**, v. 47, n. 6, p. 1233–1241, 2010. ISSN 00218901. Citado na página 32.

VERSTRAETE, Michel M.; SCHOLLES, Robert J.; SMITH, Mark Stafford. Climate and desertification: Looking at an old problem through new lenses. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 7, n. 8, p. 421–428, oct 2009. ISSN 15409295. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1890/080119>>. Citado na página 25.

VICENTE, Luiz Eduardo; Perez, Filho, Archimedes. Abordagem sistêmica e geografia. **GEOGRAFIA**, v. 28, n. 3, p. 323–344, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

WALKER, Brian; HOLLING, C. S.; CARPENTER, Stephen R.; KINZIG, Ann. Resilience, Adaptability and Transformability in Social – ecological Systems. **Ecology and Society**, v. 9, n. 2, p. 5, 2004. ISSN 1708-3087. Disponível em: <<http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>>. Citado na página 20.

WESSELS, K. J.; PRINCE, S. D.; MALHERBE, J.; SMALL, J.; FROST, P. E.; VANZYL, D. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. **Journal of Arid Environments**, v. 68, n. 2, p. 271–297, 2007. ISSN 01401963. Citado 4 vezes nas páginas 16, 47, 70 e 71.

WESSELS, K. J.; PRINCE, S. D.; ZAMBATIS, N.; MACFADYEN, S.; FROST, P. E.; Van Zyl, D. Relationship between herbaceous biomass and 1-km² Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) NDVI in Kruger National Park, South Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 5, p. 951–973, mar 2006. ISSN 0143-1161. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160500169098>>. Nenhuma citação no texto.

WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R.; ANDERSON, M.; BELWARD, A.; BINDSCHADLER, R.; COHEN, W.; GAO, F.; GOWARD, S. N.; HELDER, D.; HELMER, E.; NEMANI, R.; OREOPOULOS, L.; SCHOTT, J.; THENKABAIL, P. S.; VERMOTE, E. F.; VOGELMANN, J.; WULDER, M. A.; WYNNE, R. Free Access to Landsat Imagery. **Science**, v. 320, n. 5879, p. 1011a–1011a, may 2008. ISSN 0036-8075. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.320.5879.1011a>>. Citado na página 32.

XU, Lili; TU, Zhenfa; ZHOU, Yuke; YU, Guangming. Profiling human-induced vegetation change in the Horqin Sandy Land of China using time series datasets. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 4, 2018. ISSN 20711050. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 70.

ZEWDIE, Worku; CSAPLOVICS, Elmar; INOSTROZA, Luis. Monitoring ecosystem dynamics in northwestern Ethiopia using NDVI and climate variables to assess long term trends in dryland vegetation variability. **Applied Geography**, Elsevier Ltd, v. 79, p. 167–178, 2017. ISSN 01436228. Citado na página 32.

ZHA, Yong; GAO, Jay. Characteristics of desertification and its rehabilitation in China. **Journal of Arid Environments**, v. 37, n. 3, p. 419–432, 1997. ISSN 01401963. Citado na página 27.

ZHANG, Qingling; LI, Bin; THAU, David; MOORE, Rebecca. Building a better Urban picture: Combining day and night remote sensing imagery. **Remote Sensing**, v. 7, n. 9, p. 11887–11913, 2015. ISSN 20724292. Citado na página 32.