

JOSÉ FRANCISCO DA CRUZ NETO

**PROPOSIÇÃO METODOLÓGICA E ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO
SERTÃO CENTRAL DO BRASIL À DESERTIFICAÇÃO: DADOS IN SITU,
MODELAGEM, SENSORIAMENTO REMOTO E MULTICRITÉRIOS**

RECIFE
PERNAMBUCO – BRASIL

2021

JOSÉ FRANCISCO DA CRUZ NETO

**PROPOSIÇÃO METODOLÓGICA E ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO
SERTÃO CENTRAL DO BRASIL À DESERTIFICAÇÃO: DADOS IN SITU,
MODELAGEM, SENSORIAMENTO REMOTO E MULTICRITÉRIOS**

Tese apresentada a Universidade Federal de Rural
de Pernambuco, como parte dos requisitos do
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Agrícola para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva

RECIFE
PERNAMBUCO – BRASIL
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

J71p Cruz Neto, José Francisco da Cruz Neto
PROPOSIÇÃO METODOLÓGICA E ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO SERTÃO CENTRAL DO
BRASIL À DESERTIFICAÇÃO: DADOS IN SITU, MODELAGEM, SENSORIAMENTO REMOTO E
MULTICRITÉRIOS / José Francisco da Cruz Neto Cruz Neto. - 2021.
76 f. : il.

Orientador: Thieres George Freire da Silva.

Coorientador: Heliofábio Barros .

Inclui referências.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2021.

1. Landsat. 2. Mudanças Climáticas. 3. Semiárido . I. Silva, Thieres George Freire da, orient. II. , Heliofábio Barros, coorient. III. Título CDD 630

CDD 630

JOSÉ FRANCISCO DA CRUZ NETO

PROPOSIÇÃO METODOLÓGICA E ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO SERTÃO
CENTRAL DO BRASIL À DESERTIFICAÇÃO: DADOS IN SITU, MODELAGEM,
SENSORIAMENTO REMOTO E MULTICRITÉRIOS

Tese defendida e aprovada em: __/__/__.

Orientador:

Thieres George Freire da Silva – UFRPE

Examinadores:

Prof. Dr. Hernande Pereira da Silva – UFRPE

Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes – UFRPE

Prof. Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio – UFPE

Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes – UFAL

Dedicatória

Ao grande DEUS, todo poderoso, por ter me concedido esse momento de glória e imensa alegria, pois nos momentos de fraqueza foi a TI que depusitei toda minha fé e orações. Agradeço, pois sei que sem SUAS bênçãos não conseguiria chegar até aqui.

Aos meus pais Romildo Francisco da Cruz e Maria José de Araújo Cruz, por todos os ensinamentos e, exemplos por eles repassados.

Aos meus irmãos Fafá, Júnior e Lô por todo apoio nos momentos de decisões e pelas orações a mim dedicadas.

A minha filha Maria Eduarda, um anjo que Deus colocou em minha vida.

Aos meus sobrinhos Edson Neto, Ester e Vitória outra benção em minha vida.

E as mais de 360 mil pessoas que, entre março de 2020 e março de 2021, já perderam suas vidas por causa da Covid-19; fica aqui a minha homenagem. Pois em um momento tão difícil poder estar com saúde e compartilhar ao lado de pessoas que amo esse momento é um motivo de muito agradecimento a Deus.

Agradecimentos

Ao meu orientador e grande amigo, Professor Doutor Thieres George Freire da Silva aqui deixo os meus sinceros agradecimentos, pelo auxílio, discussões, sugestões e conhecimentos compartilhados na orientação desta Tese e a todos os funcionários que fazem parte do Programa de Pós graduação em Engenharia Agrícola UFRPE e da Unidade Acadêmica de Serra Talhada - UAST.

Aos meus colegas e amigos, de Pós Graduação: Diego Sousa, John Lenno, Rafaela, Raguiara, Alan e Juliana.

A todos que fazem parte do Grupo de Agrometeorologia no Semiárido por todo o apoio ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE (processos: APQ-0215-5.01 / 10 e FACEPE - APQ-1159-1.07 / 14).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (processos: 475279/2010-7, 476372/2012-7, 305286/2015-3, 309421/2018-7 e 152251/2018-9).

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (IBPG-1623-5.03/16) pela bolsa de pesquisa e estudo. À Embrapa pelo apoio financeiro por intermédio do Projeto: “Sistemas de cultivos e estratégias de manejo da palma forrageira submetida a diferentes práticas de irrigação complementar no semiárido” – IRRIGPALMA - Código SEG: 22.16.04.028.00.00. À FACEPE pelo apoio financeiro a partir do projeto "Pesquisa e Tecnologias Hídricas para o Desenvolvimento do Semiárido de Pernambuco" (Universitas) (processo: APQ-0030-5.03/17). À Embrapa pelo recurso oriundo da ação: Desenvolver metodologia técnico-científica para a elaboração de zoneamento agrícola de risco climático para a cultura da Palma (Código geral do projeto: 10.18.03.039.00.00)

E a todos os amigos e amigas que de certa forma contribuíram para que esse momento chegasse.

Meu Muito Obrigado!!!

“O desejo sincero e profundo do coração é sempre realizado.
Em minha própria vida tenho verificado a certeza disto.”

Mahatma Gandhi

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	x
GENERAL ABSTRACT.....	xii
1. Introdução geral.....	14
2. Hipóteses	16
3. Objetivos	16
3.1 Objetivos específicos.....	16
CAPÍTULO I.....	17
REVISÃO DE LITERATURA	17
4. Revisão bibliográfica.....	18
4.1. Histórico	18
4.2. Conceitos de desertificação	19
4.3. Panorama da desertificação no Semiárido brasileiro.....	20
4.4 Indicadores de desertificação.....	22
4.5. Impactos da desertificação.....	24
4.6. Técnicas de sensoriamento remoto aplicado aos estudos da desertificação	25
5. Considerações finais.....	26
6. Referências bibliográficas	26
CAPÍTULO II.....	37
PRINCIPAIS AVANÇOS CIENTÍFICOS.....	37
RisDes_Index: um índice para análise do avanço de áreas em desertificação a partir de dados de satélite e sua aplicação em um importante Núcleo do Semiárido brasileiro ...	38
1 Introdução.....	39
2 Material e métodos	42
2.1 Sítios experimentais.....	42

2.2 Dados medidos do balanço de energia à superfície e propriedades físico químicas do solo	44
2.3 Coleta e processamento dos dados orbitais	47
2.4 Produtos e índices de satélite.....	50
2.5 Índices de vegetação e de solo.....	52
2.6 Análise exploratória dos dados.....	54
2.7 Associação entre os produtos de satélite e dados in situ	54
2.8 Proposição do modelo	55
2.9 Aplicação do RisDes_Index para um Núcleo de Desertificação (ND)	55
2.10 Intercomparação entre métodos de avaliação do risco de desertificação	56
2.11. Avaliação da evolução do processo de desertificação no ND de Cabrobó	57
3 Resultados.....	58
3.1 Análise exploratória dos dados.....	58
3.2 Associação entre dados orbitais e dados in situ.....	60
3.3 Modelo proposto para identificação de áreas em desertificação	61
3.4 Intercomparação entre RisDes_Index e os outros métodos com produtos satélite... 63	
3.5 Avaliação da evolução do processo de desertificação no ND de Cabrobó	64
3.5.1 Análise espaço-temporal de indicadores de vegetação.....	64
3.5.2 Análise espaço-temporal da desertificação a partir do RisDes_Index	66
3.6 Associação entre avanço da desertificação, clima e dados socioeconômicos	67
4 Discussão.....	68
5 Conclusões.....	70
Referências	71

CRUZ NETO, J. F. da. **Proposição metodológica e análise da sensibilidade do sertão central do Brasil à desertificação: dados *in situ*, modelagem, sensoriamento remoto e multicritérios**. 2021. 71 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva

RESUMO GERAL

A desertificação tem sido um problema ambiental em todo o mundo, por isso, nos últimos 50 anos tem se intensificado o interesse em relação aos impactos que causa na sociedade e na sustentabilidade em geral. A proposição de um método de identificação da ocorrência de desertificação, que possua associação com dados *in situ*, traz resultados mais assertivos para análise da contribuição de fatores climáticos, sociais e econômicos no avanço desse processo. Neste estudo, objetivou-se propor uma metodologia para avaliação da evolução do processo de desertificação com base em dados de satélite e dados de superfície. A concepção do método (Modelo de Risco de Desertificação) RisDes_Index foi construída a partir de dados *in situ* e de índices oriundos de satélite de um importante Núcleo de Desertificação (ND) do Semiárido brasileiro, i.e., ND de Cabrobó. A análise de componentes principais (ACP) foi usada para julgar a base biofísica do RisDes_Index, por meio da associação de seus resultados com dados micrometeorológicos, propriedades físico químicas e de cobertura vegetal coletados em cinco sítios experimentais: um de uma floresta sazonalmente seca, i.e., a Caatinga; outro de um plantio agrícola de cactácea (i.e., cactus forage); uma área em desertificação; e, dois cultivos irrigados (áreas úmidas) de cana de açúcar, com e sem a manutenção de palhada acima do solo. A evolução do processo de desertificação no ND de Cabrobó foi avaliada a partir da aplicação do RisDes_Index à imagens de quatro anos: 1991, 2001, 2009 e 2016. A contribuição de fatores climáticos, sociais e econômicos no avanço da desertificação foi identificada por meio de uma ACP entre os dados de RisDes_Index e, os dados anuais de evapotranspiração de referência, precipitação pluviométrica e déficit hídrico, e socioeconômicos de efetivo animal, área plantada e produto interno bruto. Por meio da ACP, duas componentes explicaram 84% da variabilidade dos dados, revelando que na área em desertificação estudada houve uma forte associação de variáveis micrometeorológicas (i.e. razão de Bowen - β) e temperatura da superfície do solo com propriedades físicas (e.g. areia total) e químicas (e.g. pH), e cobertura vegetal (índice de área foliar). A proposição do RisDes_Index foi feita com base nas variáveis refletâncias

das bandas (R, B e G), albedo e IAF do satélite *Landsat 5* e 8. Os resultados do *RisDes_Index* mostraram que, em 1991 as áreas desertificadas eram de 38% do total da área do ND de Cabrobó, evoluindo para 51% em 2016. Uma diminuição das áreas de Caatinga foi identificada na ordem de 20%. A aplicação do *RisDes_Index* confirmou o avanço do processo de desertificação no ND de Cabrobó, como consequência da redução dos níveis pluviométricos e, logo, aumento do déficit hídrico, e intensificação do desmatamento para o aumento das áreas com criação de rebanhos. Sugere-se a aplicação do *RisDes_Index* em várias regiões do mundo com propósito de direcionar ações para enfrentamento do avanço do processo de desertificação.

Palavras-chave: Landsat TM, mudanças climáticas, semiárido;

CRUZ NETO, J. F. da. **Methodological proposal and analysis of the sensitivity of the central interior of Brazil to desertification: in situ data, modeling, remote sensing and multicriteria.** 2021. 71 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

Advisor: Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva

GENERAL ABSTRACT

Desertification has been an environmental problem worldwide, so over the past 50 years, interest in the impacts it has had on society and on sustainability in general has intensified. The proposition of a method for identifying the occurrence of desertification, which has an association with data in situ, brings more assertive results for the analysis of the contribution of climatic, social and economic factors in the advancement of this process. This study aimed to propose a methodology for assessing the evolution of the desertification process based on satellite data. The design of the RisDes_Index method was built from data in situ and from satellite indices of an important Desertification Nucleus (ND) in the Brazilian Semiarid, i.e., Cabrobó ND. Principal component analysis (PCA) was used to judge the biophysical basis of RisDes_Index, by associating its results with micrometeorological data, physical chemical properties and vegetation cover collected from five experimental sites: one from a seasonally dry forest, i.e., the Caatinga; another from an agricultural plantation of cactus (i.e., cactus forage); an area in desertification; and, two irrigated crops (wet areas) of sugarcane, with and without the maintenance of straw above the ground. The evolution of the desertification process in the Cabrobó ND was evaluated by applying RisDes_Index to four-year images: 1991, 2001, 2009 and 2016. The contribution of climatic, social and economic factors in the advance of desertification was identified through an ACP between the RisDes_Index data, and the annual reference evapotranspiration data, rainfall and water deficit, and socioeconomic status of animal population, planted area and gross domestic product. Through the ACP, two components explained 84% of the data variability, revealing that in the studied desertification area there was a strong association of micrometeorological variables (i.e. Bowen ratio - β) and soil surface temperature with physical properties (e.g. total sand) and chemical (e.g. pH), and vegetation cover (leaf area index). The RisDes_Index proposal was made based on the reflectance variables of the bands (R, B and G), albedo and IAF of the satellite Landsat 5 and 8. The results of the RisDes_Index

showed that, in 1991, the desertified areas were 38% of the total area of the ND Cabrobó, increasing to 51% in 2016. A decrease in the Caatinga areas was identified in the order of 20%. The application of RisDes_Index confirmed the advance of the desertification process in the ND Cabrobó, as a consequence of the reduction of rainfall levels and, therefore, an increase in the water deficit, and intensification of deforestation to increase the areas with herds. It is suggested the application of RisDes_Index in several regions of the world with the purpose of directing actions to face the advancement of the desertification process.

Keywords: LandSat TM, climate change, semiarid.

1. Introdução geral

A desertificação tem sido um problema ambiental em todo o mundo, e que nos últimos 50 anos houve um interesse crescente para os impactos que a desertificação proporciona no meio ambiente, economia e na sociedade de forma geral. A desertificação é caracterizada como a degradação da terra em áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultantes de vários fatores, incluindo variações climáticas e atividades humanas (UNCCD, 1995). Segundo Briassoulis (2019), a desertificação atualmente afeta mais de um terço das terras do mundo, atingindo países como China, Itália, África do Sul, Estados Unidos da América do Norte, México, Argentina e Brasil.

No Brasil, a desertificação encontra-se presente na região semiárida, mais precisamente nos estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Piauí, Ceará e Bahia, onde estão presentes os Núcleos de Desertificação (ND's) (VASCONCELOS SOBRINHO, 1982). Os ND's tratam-se de áreas de grandes manchas desnudas, com presença ou não de vegetação e sinais claros de erosão do solo (PEREZ-MARIN et al., 2012). Seis áreas são caracterizadas como ND: Núcleo de Gilbués – PI; Núcleo de Irauçuba – CE; Núcleo de Cabrobó – PE; Núcleo de Seridó – RN; Núcleo Cariris Velhos – PB e Núcleo do Sertão do São Francisco – BA, que ocupam uma área de 55.000 km² (BRIASSOULIS, 2019).

Nesses ambientes as consequências decorrentes do processo de desertificação são diversas, podendo está relacionada desde as condições ambientais até as questões sociais. A desertificação promove perda da fertilidade dos solos, diminuição dos recursos hídricos, redução da biodiversidade, perdas na produtividade agrícola e biológica, e abandono das terras devido à incapacidade de produção de elementos essenciais para a sobrevivência humana. Esses efeitos não trazem implicações apenas aos aspectos ambientais, mas também a setores produtivos da sociedade (VIEIRA et al., 2015).

Contudo, muitas controversas surgiram a respeito das causas da desertificação, isso porque existe padrões diferentes para seu surgimento, no Brasil por exemplo a desertificação surgiu em algumas regiões devido ao mal uso dos recursos naturais, como o desmatamento para o uso de madeira como fonte de energia, construções de cercas e casas, a irrigação como suprimento de água para as culturas agrícolas e a falta de manejo correto dos solo (VASCONCELOS SOBRINHO, 1978). Isso tudo é ainda mais agravado devido as condições climáticas da região que apresenta uma alta demanda atmosférica e grande variabilidade da precipitação bem como da vegetação para a maior parte da região semiárida apresenta a característica de caducifólia. Dessa forma, o monitoramento e a avaliação da

desertificação são um conteúdo muito importante no contexto da desertificação. A avaliação criteriosa e precisa da desertificação pode fornecer uma base científica para a tomada de decisões no combate à desertificação. Com isso e devido a grandes quantidades de informações, ciclos curto e amplo banco de dados, menos restrições aos recursos humanos, materiais e assim por diante, o sensoriamento remoto tornou-se uma tecnologia importante para monitorar a desertificação da terra nos últimos 30 anos (WEI et al., 2018).

Pesquisas são desenvolvidas para identificar, quantificar e mitigar os efeitos da desertificação, por meio de metodologias e indicadores utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto. Algumas são mais recentes outras mais antigas, mas em ambos os casos, sempre se busca maior precisão para monitoramento do avanço do processo de desertificação (AKBARI et al., 2020; BRIASSOULIS, 2019; KARAVITIS et al., 2020; OIKONOMOU et al., 2019; XUE et al., 2019). Em um estudo desenvolvido no Platô Wei et al. (2018) desenvolveram modelos utilizando NDVI (Índice de vegetação por diferencia normalizada), albedo (albedo da superfície da terra), MSAVI (índice de vegetação da terra) e TGSÍ (índice de tamanho de grão do solo superficial), para estudos de desertificação e identificaram que esses modelos explicam em média 86,33% os efeitos da desertificação nessa região, além disso constataram que o modelo que leva em consideração Albedo-NDVI apresentam boa precisão para regiões onde a cobertura vegetal é de grande proporção. Com base nesses resultados vale salientar que modelos como esses tem sua eficiência minimizada pra região como o semiárido brasileiro, que apresenta ao longo do ano uma vegetação na sua maioria de baixa densidade o que pode comprometer de certa forma a utilização de modelos como este.

No geral, muitos métodos são questionados, por causa da necessidade de numerosa quantidade de variáveis, outras por serem restritas a alguns locais e outras requererem calibração em locais diferentes dos quais o método foi desenvolvido, isso acaba na maioria das vezes comprometendo os resultados obtidos para essas regiões, o que torna necessário estudos dessa natureza para esses ambientes. Um trabalho que é tido como referência para os estudos sobre desertificação é o de Kosmas et al. (1999), que usa índices na identificação de áreas desertificadas e seus efeitos na região do Mediterrâneo. Mesmo mostrando resultados significativos e representando bem as áreas desertificadas, esse modelo esbarra na grande quantidade de variáveis utilizadas, o que de certa forma inviabiliza a sua utilização para outras regiões do planeta. Assim metodologias que apresentem uma quantidade menor de variáveis e boa eficiência na estimativa deve ser desenvolvidas para que estudos dessa

natureza sejam realizados de forma mais rápida e com uma escala de tempo de estudo mais longo.

Dessa forma, deve-se propor indicadores que possibilitem a identificação de áreas com risco à desertificação no Sertão Central do Brasil, além de refinar a entrada de informações de produtos orbitais com base em dados de superfície para que se possa melhorar a precisão na identificação desses ambientes, bem como, propor formas de mitigar os efeitos da desertificação no Semiárido Brasileiro. Assim, a proposição de um método específico para cada região é fundamental no sucesso do combate à desertificação.

2. Hipóteses

Nossa hipótese é que a proposição de um método de identificação da ocorrência de desertificação, que possua associação com dados *in situ*, traz resultados mais assertivos para o julgamento da evolução desse processo e a contribuição de fatores climático socioeconômicos no Semiárido Brasileiro.

3. Objetivos

Neste estudo, objetivou-se propor uma metodologia para análise da sensibilidade do Sertão Central do Brasil ao avanço do processo de desertificação, por meio de dados *in situ*, técnicas de modelagem, sensoriamento remoto e uso de multicritérios.

3.1 Objetivos específicos

- Definir relações de dados orbitais de imagens de satélite com dados *in situ* de Caatinga em conservação, áreas de plantas CAM (*Opuntia sp.*) e em processo de Desertificação;
- Estabelecer indicadores para a identificação do processo de desertificação com base em dados micrometeorológicos e biofísicos da vegetação;
- Comparar métodos de avaliação da sensibilidade de áreas à desertificação;
- Compreender a evolução do processo de desertificação a partir da associação de indicadores, histórico de imagens de satélite e fatores socioeconômico-climáticos.

CAPÍTULO I

REVISÃO DE LITERATURA

4. Revisão bibliográfica

4.1. Histórico

A desertificação é um problema de escala global, que tem tomado notoriedade, por causa da degradação das terras promovida pela ação humana e mudanças climáticas, sobretudo, em regiões de clima árido, semiáridos e subúmidos a secas (KOSMAS et al., 1999; SOMMER et al., 2011). Os primeiros registros foram feitos na década de 30 do Século passado nos estados do meio Oeste Americano, onde se observaram intensos processos de degradação (e.g. aumento do desmatamento, exploração acentuada do solo e dos recursos naturais, seguido de uma grande seca entre os anos de 1929 e 1932) (JUNIOR, 2011). Nessa época, estimou-se que 300.000 km² das terras foram devastadas nos estados de Oklahoma, Kansas, Novo México e Colorado, com subsequente perda econômica (STEBBING, 1935).

Apesar desse registro, o termo desertificação foi proposto pela primeira vez em 1949 por Aubréville, o qual foi usado para caracterizar processos ecológicos ocorridos na África Tropical, em especial, alterações de florestas tropicais em áreas com pouca vegetação. Mas, ao longo dos anos, muitas situações ocorreram em diferentes regiões do mundo. Por exemplo, na década de 60, registrou-se em regiões da África, a perda da capacidade produtiva dos solos e a falta de alimentos, seguida, de fome, seca e guerra, o que culminaram em incremento do fluxo migratório, na década de 70 (FERREIRA et al., 2017; GLANTZ, 1977) de regiões áridas e semiáridas ao Sul do deserto do Sahara, conhecida como Sahel (GLANTZ, 1977).

No Brasil, os primeiros estudos de desertificação foram feitos para o Semiárido por João Vasconcelos Sobrinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco, que no ano de 1974 publicou o artigo “O Deserto Brasileiro”. Nesta obra, Sobrinho indicou os “Núcleos de Desertificação”, localizados na microrregião do Sertão de Inhamuns, Ceará; no município de Gilbués, Piauí; na região do Seridó, Rio Grande do Norte; região dos Cariris Velhos, Paraíba; Sertão Central do estado de Pernambuco; e, no Sertão do São Francisco, Bahia, onde as degradações da cobertura vegetal e do solo atingiram condição de irreversibilidade (VASCONCELOS, 2004).

Hoje, a desertificação é um dos principais problemas ambientais, que promovem prejuízos econômicos e sociais (BRIASSOULIS, 2019). Logo, o seu monitoramento é muito importante para proposição de ações mitigadoras. Diante disto, diversas pesquisas (AKBARI et al., 2020; BRIASSOULIS, 2019; KARAVITIS et al., 2020; OIKONOMOU et al., 2019;

XUE et al., 2019) tem desenvolvido metodologias para que se possa quantificar de forma mais eficiente os níveis de desertificação em diferentes regiões do mundo. No Brasil, alguns métodos já foram aplicados para identificação das áreas em desertificação (FERNANDES, 2010; DANTAS, 2010; SHEYDDER et al., 2011; SOUSA et al., 2007). Contudo, muitas metodologias usadas foram desenvolvidas em outras regiões do planeta, o que reduz a confiabilidade dos resultados (DREGNER, 1984).

4.2. Conceitos de desertificação

Desertificação é um termo que deriva da etiologia “Deserto”. Segundo Conti (2006), o deserto é uma formação natural que ocorre em resultado de fatores climáticos: evaporação potencial maior que a precipitação média anual e precipitação escassa com alta variabilidade anual; combinados a solos rasos; drenagem intermitente; cobertura vegetal esparsa com o predomínio de xerófilas; e baixo índice de ocupação humana. Ao conceito de desertificação, adiciona-se o efeito da ação humana, o que potencializa os danos não só ao meio ambiente, mas também as populações que habitam nessas regiões.

Diversos autores classificam a desertificação com base em fatores humanos, ao tempo geológico, forma de relevo, vegetação e aspectos de impactos econômicos (VERSTRAETE, 1986). Do ponto de vista da ação humana, Gardufio (1977) cita que a desertificação é o empobrecimento de ecossistemas áridos, semiáridos e subúmidos a seco. Quanto ao tempo geológico, Kovada (1980) caracteriza a desertificação como desertos naturais que estão espalhados pela superfície da Terra e que sua existência flutuou no período quaternário, presentes em antigos prados, pradarias, estepes e planícies aluviais. Le Houérou (1977) enfatizou a desertificação como um processo que envolve o relevo e a vegetação, caracterizando-a como uma extensão de paisagem desértica típica, com degradação de vários tipos e formas de vegetação, incluindo as florestas subúmidas. Por sua vez, as Nações Unidas, em 1978, definiram a desertificação como a diminuição do potencial biológico do solo, a produtividade dos ecossistemas.

Como pioneiro no Brasil, Vasconcelos Sobrinho (1977) considera a desertificação como um fenômeno integrador de processos econômicos, sociais e naturais, que destroem o equilíbrio do solo, da vegetação, do ar e da água, bem como a qualidade da vida humana. Para Vasconcelos Sobrinho (1977), a degradação da interface solo, vegetação e recursos hídricos, resultado de condições climáticas, ações humanas, ou de ambas, leva a redução da produtividade primária e perda da capacidade de auto recuperação do solo. Rodrigues (1992)

complementa o conceito de Sobrinho, afirmando que a desertificação pode ser intensificada por atividades como desmatamento, extração de minério, uso inadequado da irrigação e de fertilizantes químicos na produção de alimentos, e sobre pastoreio. Retallack (1991) entende que a desertificação rompe a estabilidade de uma paisagem, dando origem a eventos de erosão, denudação de solos cultiváveis, formação de campos de dunas, e tornam esses ambientes inapropriados para o desenvolvimento de atividades agrícolas e de sobrevivência humana.

Apesar dos diversos conceitos, um comumente adotado é que a desertificação refere-se a uma sequência de alterações regressivas dos solos, da vegetação e do regime hídrico, que conduz à deterioração biológica dos ecossistemas, em consequência de pressões criadas por fatores climáticos e pelas atividades do homem, em ações conjuntas ou separadas (CGEE, 2016).

4.3. Panorama da desertificação no Semiárido brasileiro

No Brasil, a desertificação ocorre de forma restrita no Semiárido brasileiro. Com base no estudo de Vasconcelos Sobrinho (1982), para o Semiárido Brasileiro (SB), seis áreas pilotos exibem processos de degradação do solo e da cobertura vegetal. Essas áreas estão situadas nos estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Piauí, Ceará e Bahia, e os seus limites são usados pelo Ministério do Meio Ambiente como aquelas áreas mais sujeitas à degradação ambiental por meio da desertificação. Essas áreas, denominadas “Núcleos de Desertificação” possuem grandes manchas desnudas, com presença ou não de vegetação e sinais claros de erosão do solo (PEREZ-MARIN, 2012). No Semiárido brasileiro há diversas áreas com os mesmos aspectos encontrados nesses Núcleos, mas a falta de metodologias adequadas ainda não as enquadra como áreas desertificadas ou que estejam enfrentando esse processo. Abaixo são descritos os principais atributos dos “Núcleos de Desertificação” presentes no Semiárido brasileiro.

Núcleo de Gilbués - localizado no extremo sul do estado do Piauí, na região de transição Caatinga: Cerrado (Figura 1). Compreende área afetada de 6.131 km², com 20 mil habitantes (PEREZ-MARIN, 2012). É composto pelos municípios de Gilbués, Monte Alegre do Piauí, Barreiras do Piauí, São Gonçalo do Gurgueia, Santa Filomena e Alto Parnaíba. Nesse núcleo, a desertificação está ligada aos processos erosivos dos solos. As principais ações que contribuem para esse processo ocorrem devido à grande exploração da pecuária e

retirada da vegetação nativa para implantação de culturas que são utilizadas na alimentação animal.

Núcleo de Irauçuba - situado no Oeste do estado do Ceará, região dos Inhamuns, compreende área afetada de 4.099,22 km² dos municípios de Sobral, Forquilha e Irauçuba (PINTO et al., 2009). A principal caracterização desse núcleo está relacionada a categoria de solo presente (Planossolos, háplicos, sódicos e nátricos), a grande ocorrência de erosão laminar avançando para voçorocas, o que empobrece o solo e impossibilita a restituição vegetal da região.

Núcleo de Cabrobó - localizado no Sul do Estado de Pernambuco, região do Sertão Central, onde estão os municípios de Cabrobó, Orocó, Santa Maria da Boa Vista, Belém do São Francisco, Salgueiro, Parnamirim, Itacuruba, Petrolina, Afrânio, Ouricuri, Araripina e Floresta (Figura 1). A área afetada é de 4.960 km² (PEREZ-MARIN, 2012). Silva (2015) relata que a salinização, devido ao mau uso da irrigação, a pecuária e o desmatamento são as maiores causas do processo de desertificação. Essas afirmações também foram identificadas por Sá e Angelotti (2008).

Núcleo de Seridó - situado em parte dos Estados do Rio Grande do Norte - RN e da Paraíba - PB, no Seridó (Figura 1). O Núcleo abrange os municípios de Currais Novos, Cruzeta, Equador, Carnaúba do Dantas, Acari, Parelhas, Caicó, Jardim do Seridó, Ouro Branco, Santana do Seridó e São José do Sabugi no RN, e Santa Luzia e Várzea, na PB. A área afetada é de 2.987 km² (PEREZ-MARIN, 2012). A retirada da lenha para abastecimento das fábricas de cerâmicas que existem na região é considerado o principal fator para o avanço da desertificação na região (PEREIRA NETO, 2016). Além disso, os baixos índices pluviométricos dificultam a regeneração da vegetação, o que agrava o processo (PEREZ-MARIN, 2012).

Núcleo Cariris Velhos - localizado na fração voltada ao Sudoeste da Chapada da Borborema paraibana, região dos Cariris Velhos (Figura 1). Abrange os municípios de Juazeirinho, São João do Cariri, Serra Branca, Cabaceiras, Camalaú e municípios circunvizinhos. A área afetada é de 2.805 km², sobretudo, devido à formação geológica local, baixos índices pluviométricos, desmatamentos e uso inadequado de práticas agrícolas que empobrecem os solos, tornando-os mais vulneráveis ao progresso da desertificação (PEREZ-MARIN, 2012).

Núcleo do Sertão do São Francisco - situado no Nordeste do estado da Bahia, na região do Sertão do São Francisco, compreende uma área afetada de 34.254 km², que abrange

os municípios de Uauá, Macururé, Chorrochó, Abaré, Rodelas, Curaçá, Glória, Jeremoabo, Juazeiro, Canudos e municípios circunvizinhos (PEREZ-MARIN, 2012) (Figura 1). Nesse núcleo, o processo de desertificação tem origem mediante a substituição da vegetação nativa “Caatinga” para implantação de atividades agrícola e pecuária, além de práticas ineficientes de uso dos recursos naturais (SILVA, 2011).

4.4 Indicadores de desertificação

Ao longo dos anos diversos estudos internacionais foram desenvolvidos para entender o processo de desertificação. De início os principais aspectos levados em consideração eram com relação a degradação dos solos ainda nos anos 70 quando os estudos relacionados a desertificação ainda surgiam (BASSO et al., 2000). Com isso foi possível identificar que a forma de se utilizar o solo poderia acelerar ou não esse processo.

Um dos estudos pioneiros é o de Reining (1978), que inspirou o primeiro trabalho realizado no Brasil, desenvolvido por Sobrinho. Este autor listou 34 indicadores, sendo eles divididos em seis categorias: físicos (8 indicadores); biológicos agrícolas (8); uso da terra (6); assentamento das populações (4); biológicos humanos (3); e, processo social (5). Um dos problemas do estudo de Reining (1978) é a falta de informação sobre a mensuração dos dados usados, o que dificulta a replicação do estudo e, ou, aprimoramento do método desenvolvido. É importante salientar que o estudo não levou em consideração o aspecto climático, que é um fator primordial, sobretudo quando se trata da influência do regime pluviométrico no desenvolvimento da vegetação e da promoção de erosão (VIEIRA et al., 2015). No geral, os indicadores de desertificação são classificados em biológicos, físicos, espectrais e socioeconômicos (MARTALO JUNIOR, 2001).

Em diversos estudos foram utilizados indicadores como albedo, NDVI e SAVI para se identificar o grau de desertificação em que as regiões afetadas se encontravam, mas devido ao grau de diferença de desertificação, diferentes texturas de solo são reproduzidas Wei et al. (2018), inviabilizando muitas vezes a utilização desses indicadores. Dessa forma o indicador utilizado para identificar a degradação do solo em áreas desertificadas é o TGSI (índice de tamanho de grão da superfície do solo) (ZHU & WANG, 1990; QING et al. 2018).

Lamchin et al. (2017) descobriram que as maiores correlações estavam entre TGSI e albedo em todos os níveis de desertificação. Isso fornece a hipótese para a construção de um modelo. Combinado com as informações de superfície e orbitais pode-se observar que esses

estudos sobre desertificação se baseiam, principalmente, em combinar vários índices ou em um único modelo, o que facilitaria esse tipo de estudo.

Esse índice (TGSI) está associado às propriedades físicas (composição mecânica) do solo superficial e baseia-se no diâmetro médio ou efetivo de grãos ou partículas minerais individuais (XIÃO et al. 2006). O TGSI reflete o aumento do tamanho do grão do solo superficial, que tem uma correlação positiva com o teor de areia fina do solo superficial. Segundo Lamchin et al. (2017), quanto mais severa a desertificação, mais grosso será o tamanho dos grãos do solo. Valores altos de TGSI são encontrados em áreas com alto teor de areia fina no solo superficial ou baixa proporção de grãos de argila-silte.

De toda forma variáveis como NDVI e albedo são de fundamental importância para a identificação de ambientes desertificados, visto que estudos a longo prazo mostram que, com o aumento da desertificação, a quantidade de vegetação na superfície do solo diminui de forma gradativa e os valores de NDVI diminuem proporcionalmente (WEI et al. 2018). O albedo por exemplo é um dos parâmetros mais importantes do balanço energético da radiação no solo e seus valores podem ser alterados pela umidade do solo, cobertura vegetal e outras condições da superfície do solo que podem caracterizar ambientes desertificados.

O índice de Aridez (IA) é um dos indicadores mais usados na identificação de áreas desertificadas ou que tenha potencial para ocorrência desse fenômeno. Segundo Sales (2002), o IA permite conhecer as limitações impostas pelo clima para a realização de atividades biológicas primárias e, logo, na produtividade agrícola. O IA estabelece a relação entre a precipitação e a evapotranspiração de potencial determinada pelo método de Thornthwaite e foi proposto por (UNEP, 1991). Salvati et al. (2011) realizaram um estudo para identificar os avanços de áreas degradadas na Itália, utilizando 26 ID (Índices de Desertificação), dos quais nove são associados ao clima. Em trabalhos mais recentes, Lin (2018) estabeleceu relações entre dados climáticos e imagens de satélites para a identificação de diferentes tipos de superfícies, indicando que esses estudos podem ser úteis na identificação de áreas degradadas.

Em conjunto com esses indicadores muitos outros são propostos e utilizados em estudos que caracterizam ambientes desertificados, como nos estudos de (AKBARI et al., 2016, 2020; CGEE, 2016; JOSEPH; GBENGA; LANGYIT, 2018; KARAVITIS et al., 2020; KOSMAS et al., 2013; SALVATI; ZITTI; PERINI, 2016; VERÓN et al., 2018; XIAO et al., 2006). Porém, a complexidade e o número grande de variáveis muitas vezes inviabilizam a

aplicação dessas metodologias, além de que, o fator micro meteorológico não é levado em consideração bem como, estudos *in situ* que caracterize melhor o ambiente em estudo.

4.5. Impactos da desertificação

As consequências decorrentes do processo de desertificação são diversas, podendo estar associadas a efeitos ambientais ou até a questão social. Um aspecto que tem influenciado diretamente o avanço do processo de desertificação é o aquecimento global que tem elevado à degradação das terras em escala global (Biskaborn et al., 2019), afetando significativamente o sistema vegetação-solo, com perdas de produtividade e capacidade de regeneração dos solos, causando impactos que agravam o processo de desertificação (Reynolds et al., 2011; Huang et al., 2016).

Segundo Souza (2017), a desertificação leva à redução da produtividade e da diversidade das formas de vida, à degradação acelerada do solo e o aumento dos riscos inerentes à ocupação da terra pelo homem. Atualmente o processo de desertificação atinge cerca de um terço das terras do planeta, atingindo países como Brasil, Estados Unidos da América do Norte, China entre outros.

De forma alternativa, as mudanças nos tipos de vegetação e na densidade causadas pela desertificação impactam a interação hidrotérmica entre a atmosfera e o solo (Chehbouni et al., 1997, Herb et al., 2008; Yang et al., 2010), e de forma simultânea, o estado térmico do solo afetando intimamente ambientes ecológicos (Wang et al., 2000), perdas de carbono orgânico (Crowther et al., 2016; Bai et al., 2019), atividades microbianas (LAVEE et al., 1998, SEPEHRI et al., 2019) e impactam os processos hidrológicos (CHENG e WU, 2007; WU et al., 2018; CHEN et al., 2020). Esses processos afetam diretamente o albedo da superfície (XIE et al., 2015), e conseqüentemente reduz a umidade do solo (Teufel e Sushama, 2019), causando impactos nas propriedades térmicas e hidráulicas do solo (Niu et al., 2019).

O processo de desertificação proporciona e induz a ambientes desérticos, perda da fertilidade dos solos, diminuição dos recursos hídricos, diminuição da biodiversidade, perdas na produtividade agrícola/biológica e abandono das terras devido à incapacidade de produção de elementos essenciais para a sobrevivência humana (VIEIRA et al., 2015; VIEIRA et al., 2016). Em termos gerais, as principais origens que promovem desertificação e suas respectivas consequências.

4.6. Técnicas de sensoriamento remoto aplicado aos estudos da desertificação

O monitoramento e avaliação da desertificação são conteúdos muito importantes no contexto desse processo que atinge atualmente e afeta mais de um terço das terras do mundo (BRIASSOULIS, 2019). A avaliação científica e precisa desse fenômeno pode fornecer base científica para a tomada de decisões na mitigação da desertificação. Devido à abundância de informações, ciclo curto e amplo escopo de dados, menos restrições aos recursos humanos e materiais e assim por diante, o sensoriamento remoto se tornou uma tecnologia importante para monitorar a desertificação da terra nos últimos 30 anos (PAN & LI, 2013). Dessa forma a avaliação quantitativa dos métodos atuais de sensoriamento remoto para desertificação usados é obtida principalmente através do índice e cobertura vegetal, para obter informações sobre a extensão da desertificação.

A técnica de sensoriamento remoto trata do uso de imagens orbitais como ferramenta para estudos e acompanhamento das mudanças ambientais, sendo atualmente indispensável para análise da variação espaço-temporal de problemas relacionados ao meio ambiente. Para estudos relacionados à desertificação, diferentes autores já constatam a eficiência dessa ferramenta (FERREIRA et al., 2017; PRĂVĂLIE et al., 2020; SALVATI et al., 2011), dado que o computo do nível de cobertura vegetal, facilmente obtido por meio do sensoriamento remoto, tem grande associação com a desertificação.

Muitas são as informações que se pode obter por meio do sensoriamento remoto como, por exemplo os índices de vegetação que são informações úteis, pois estabelece relação direta entre dados radiométricos da superfície e a fitomassa foliar verde (AGAREZ et al., 2001; NOLÊTO, 2005; RUDORFF et al., 2007). Outros indicadores de superfície são: o albedo, FVC (*Fractional Vegetation Cover*), TVDI (*Temperature Vegetation Druyness Index*), MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*), TGSI (*índice de tamanho de grão da superfície do solo*), PDI (*Perpendicular drought index*), TWI (*Topographic Wetness Index*) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) entre outros. De toda forma estudos desenvolvidos em uma escala de tempo pequena e sem dados de superfície não são de certa forma confiáveis para caracterizar ambientes em desertificados (WEI et al. 2018), visto que informações como a vegetação, é muito variável como o efeito de eventos de chuva, o que em escala de tempo pequeno pode mascarar os resultados obtidos apenas por imagens de satélite.

Por meio desses indicadores, Liu et al. (2005), entre os anos de 1995 e 2001, identificaram variações no avanço da desertificação para a região da Ásia central. Estudos

com base em dados de sensoriamento remoto são de fundamental importância, especialmente quando se deseja estudar grandes regiões como é o caso do Semiárido brasileiro (LIN et al., 2017), sobretudo, devido à complexidade que existem nos atuais modelos para identificação de áreas em desertificação, o que dificulta a sua avaliação.

5. Considerações finais

A desertificação é um dos principais problemas ambientais no mundo atualmente, e consiste na degradação de terras e perda da capacidade produtiva dessas áreas, contudo, é importante citar que os avanços encontrados nos estudos relacionados a desertificação são bastante válidos, e que ao passar dos anos tem ajudado na identificação dessas áreas bem como facilitado a busca por soluções que minimizem esses impactos e ajudam a revitalizar esses ambientes. No Brasil, a desertificação se restringe apenas ao Semiárido brasileiro, devido principalmente as condições climáticas da região. Atualmente, muitos são os métodos utilizados para identificar áreas desertificadas ou em processo de desertificação. Vale salientar, que índices de vegetação e de solo são fundamentais para identificação dessas áreas, visto que a ausência de vegetação bem como o estado em que o solo se encontra, podem caracterizar um ambiente desertificado. Outro aspecto importante para a determinação desses índices e a identificação dessas áreas é o Sensoriamento Remoto, ferramenta que auxilia o estudo para grandes áreas, além de fornecer índices que ajudam a identificação de áreas degradadas, pode ser aplicada para grandes regiões, ajudando assim no desenvolvimento de novas metodologias que possam ser utilizadas para a avaliação do risco de desertificação.

6. Referências bibliográficas

ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI M. Surface energy balance algorithms for land. Advance training and Users Manual, **Idaho Implementation**, v. 1.0, p. 98, 2002.

AGAREZ, F. V.; VINCES, R. S; CRUZ, C.; M.; NOGUEIRA, C.; R.; GARAY, I. Utilização de Índice de vegetação na classificação integrada de fragmentos florestais em Mata Atlântica de Tabuleiros no Município de Sooretama, ES. **X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, p. 955–958, 2001.

AKBARI, M.; OWNEGH, M.; ASGARI, H. R.; SADODDIN, A.; KHOSRAV, H. Desertification risk assessment and management program. **Global Journal of Environmental Science and Management**, v. 2, n. 4, p. 365–380, 2016.

AKBARI, M.; SHALAMZARI, M. J.; MEMARIAN, H.; GHOLAMI, A. Monitoring desertification processes using ecological indicators and providing management programs in arid regions of Iran. **Ecological Indicators**, v. 111, n. October 2019, p. 106011, 2020.

BECERRIL-PIÑA, R., MASTACHI-LOZA, C. A., GONZÁLEZ-SOSA, E., DÍAZDELGADO, C., BÂ, K. M. Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. **Journal of Arid Environments**, P 4–13, 2015.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca PAN-Brasil**. Brasília, 2005.

BRIASSOULIS, H. Combating land degradation and desertification: The land-use planning quandary. **Land**, v. 8, n. 2, p. 1–26, 2019.

CELINA, M.; SALES, L. Evolução Dos Estudos De. p. 115–126, 2002.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATEGICOS. Desertificação, degradação da terra e seca no Brasil, Brasília - DF, o. 252, 2016.

CONTI, J. B. O conceito de desertificação. In: Climatologia e estudos da paisagem. Rio Claro, Vol. 03 – n.2, jun/dez, p. 39, 2008.

AQUINO, C. M. S.; DE ALMEIDA, J. A. P.; DE OLIVEIRA, J. G. B. Estudo da cobertura vegetal/uso da terra nos anos de 1987 e 2007 no núcleo de degradação/desertificação de São Raimundo Nonato - Piauí. **RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 25, n. 25, p. 252–278, 2012.

DREGNE, H. 'Desertification--Present and Future', **International Journal for Development Technology**, v. 2, p. 255-259, 1984.

FENG, Q.; MA, H.; JIANG, X.; CAO, S. What Has Caused Desertification in China? **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 1–8, 2015.

FERNANDES, J. D.; DANTAS, A. J. Desertificação no Nordeste: uma aproximação sobre o fenômeno do Rio Grande Norte. **Holos**, v. 3, p. 147, 2010.

FERREIRA, T. R.; DI PACE, T. F.; SILVA, B. B.; DELGADO, J. R. Identification of desertification-sensitive areas in the Brazilian northeast through vegetation indices. **Engenharia Agricola**, v. 37, n. 6, p. 1190–1202, 2017.

GUO, Q.; FU, B.; SHI, P.; CUDAHY, T.; ZHANG, J.; XU, H. Satellite monitoring the spatial-temporal dynamics of desertification in response to climate change and human activities across the Ordos Plateau, China. **Remote Sensing**, 9(6), 1–20, 2017.

JAMIYANSHARAV, K.; OJIMA, D.; PIELKE, R.A.; PARTON, W.; MORGAN, J.; BELTRÁNPRZEKURAT, A.; LECAIN, D.; SMITH, D. Seasonal and interannual variability in surface energy partitioning and vegetation cover with grazing at shortgrass steppe. **Journal Arid Environ.** 75, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.11.008>. 2010.

JAVIS, P.G The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B**, v. 273, p. 593-610, 1976.

JIANG, M.; LIN, Y. Desertification in the south Junggar Basin, 2000–2009: Part II. Model development and trend analysis. **Advances in Space Research**, v. 62, n. 1, p. 16–29, 2018.

GARDUFIO, M. A. 'Technology and Desertification', in UNCOD (1977), p. 319-448, 1977.

GLANTZ, M. H. Dcsertification, Environmental Degradation in and around Arid Lands, Westview Press, p. 346, 1977.

JOSEPH, O.; GBENGA, A. E.; LANGYIT, D. G. Desertification risk analysis and assessment in Northern Nigeria. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 11, n. April, p. 70–82, 2018.

KARAVITISA, C. A; TSESMELISA, D. E.; OIKONOMOUB, P. D.; KAIRISA, O.; CONSTANTINOS KOSMASA, C.; FASSOULIA, R. C.; HESSELD, R.; JETTENE, V.; MOUSTAKASA, N.; TODOROVICA, B.; SKONDRASA, N. A.; VASILAKOUA, C. G.; ALEXANDRISA, S.; KOLOKYTHAF, E.; STAMATAKOSA, D. V.; STRICEVICG, R.; CHATZIGEORGIADISH, E.; BRANDTI, J.; NICKY GEESONI, N.; GIOVANNI QUARANTA, G. A desertification risk assessment decision support tool (DRAST). **Catena**, v. 187, n. June 2019, p. 104413, 2020.

KOSMAS, C.; FERRARA, A.; BRIASOULI, H.; IMESON, A. **The MEDALUS project: Mediterranean desertification and land use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification** European commission. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1999. 94p. Project ENV4 CT 95 0119 (EUR 18882).

KOSMAS, C.; KAIRIS, OR.; KARAVITIS, C. H.; RITSEMA, C.; SALVATI, L.; ACIKALIN,S.; ALCALA´, M.; ALFAMA, P.; ATLHOPHENG, J.; BARRERA, J.; BELGACEM, A.; SOLE´-BENET, A.; BRITO, J.; CHAKER, M.; CHANDA, R.; COELHO, C.; DARKOH, M.; DIAMANTIS, I.; ERMOLAEVA, O.; FASSOULI, M.; FEI, W.; FENG, J.; FERNANDEZ, F.; FERREIRA, A.; GOKCEOGLU, C.; GONZALEZ, D.; GUNGOR, H.; HESSEL, R.; JUYING, J.; KHATTELI, H.; KHITROV, N.; KOUNALAKI, A.; LAOUINA, A.; LOLLINO, P.; LOPES, M.; MAGOLE, L.;MEDINA, L.; MENDOZA, M.; MORAIS, P.; MULALE, K.; OCAKOGLU, F.; OUESSAR, M.; OVALLE, C.; PEREZ, C.; PERKINS, J.; PLIAKAS, F.; POLEMIO, M.; POZO, M.; PRAT, C.; QINKE, Y.; RAMOS, A.; RAMOS, J.; RIQUELME, J.; ROMANENKOV, V.; RUI, L.; SANTALOAIA,

F.; SEBEGO, R.; SGHAIER, M.; SILVA, N.; SIZEMSKAYA, M.; SOARES, J.; SONMEZ, H.; TAAMALLAH, M.; TEZCAN, T.; TORRI, D.; UNGARO, F.; VALENTE, S.; VENITE, J.; ZAGAL, E.; ZEILIGUER, A.; ZHONGING, W.; ZIOGAS, A. Evaluation and Selection of Indicators for Land Degradation and Desertification Monitoring: Methodological Approach. **Environmental Management**, v. 54, n. 5, p. 951–970, 2013.

KOVDA, V. A. Land Aridization and Drought Control, Westview Press, p. 277, 1980.

LE H. H. N. **Recherches Ecologiques et Floristiques sur la Vegetation de la Tunisie Meridionale**, Alger, Institut de Recherches Sahariennes de l'Universit, 1959.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; C.A.B.O.; SOUZA, E.S.; SILVA, I.F. Balanço de energia e evapotranspiração do feijão caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agronômica** (UFC. Impresso), v. 42, p. 65-74, 2011.

LIN, H.; CHEN, Y.; SONG, Q.; FU, P.; CLEVERLY, J.; MAGLIULO, V.; LAW, B.; GOUGH, C. M.; HÖRTNAGL, L.; DI GENNARO, F.; MATTEUCCI, G.; MONTAGNANI, L.; DUCE, P.; SHAO, C.; KATO, T.; BONAL, D.; PAUL-LIMOGES, E.; BERINGER, J.; GRACE, J.; FAN, Z. Quantifying deforestation and forest degradation with thermal response. **Science of the Total Environment**, v. 607–608, n. December, p. 1286–1292, 2017.

LIU, A. Monitoring Desertification in Arid and Semi-arid Areas of China with NOAA- A VHRR and MODIS Data. **Inter- national Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)** 4, pp. 2362–2364, 2005.

LOPES, H. L., CANDEIAS, A. L. B., ACCIOLY, L. J. O., SOBRAL, M. DO C. M., PACHECO, A. P. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. *Revista Brasileira De Engenharia Agricola E Ambiental*, 14(11), 1210–1219, 2010.

LOPES, L. S. O.; SANTOS, R. W. P.; MIGUEL FILHO, M. A. M. Núcleo De Desertificação De Gilbués (Pi): Causas E Intervenções. **Geografia**, v. 20, p. 53–66, 2011.

NOLÊTO, T. M. S. D. J. Suscetibilidade Geoambiental Das Terras Secas Da Microrregião De Sobral Ce a Desertificação. p. 144, 2005.

Ma, Z.; Xie, Y.; Jiao, J.; Wang, X. The Construction and Application of an Aledo-NDVI Based Desertification Monitoring Model. **J. Procedia Environ. Sci.** 2011, 10, 2029–2035.

OIKONOMOU, P. D.; TSESMELIS, E. D.; WASKOM, M. R.; GRIGG, N. S.; KARAVÍTIS, C. A. Enhancing the standardized drought vulnerability index by integrating spatiotemporal information from satellite and in situ data. **Journal of Hydrology**, v. 569, n. November 2018, p. 265–277, 2019.

PEREIRA NETO, M. Uma Revisão Crítica Aos Estudos Sobre Desertificação E O Contexto Geoambiental De Terras Secas. 2016.

PEREZ-MARIN, A. M.; CAVALCANTE, A. M. B.; MEDEIROS, S. S.; TINÔCO, L. B. M.; SALCEDO, I. H. Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro : ocorrência natural ou antrópica ? **Parcerias Estratégicas**, v. 17, n. 34, p. 87–106, 2012.

PRĂVĂLIE, R.; PATRICHE, C.; SĂVULESCUA, I.; SÎRODOEVC, I.; BANDOCA, G.; SFÎCĂ, L. Spatial assessment of land sensitivity to degradation across Romania. A quantitative approach based on the modified MEDALUS methodology. **Catena**, v. 187, n. December 2019, p. 104407, 2020.

PINTO, R. M. S.; CARVALHO, V. C.; ALVALÁ, R. C. S. Mapas de variabilidade temporal do uso e cobertura da terra do núcleo de desertificação de Irauçuba (CE) para utilização em modelos meteorológicos. **Anais... XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2009, Natal. XIV SBSR.

RETALLACK, G.J. **Soils of the past: an introduction to paleopedology**. London, UK: Harper Collins Academic, 1991.

REINING, P. **Handbook on Desertification Indicators Based on the Science Associations' Nairobi Seminar on Desertification**, American Association for the Advancement of Science, p 141, 1978.

ROXO, M. J. Agricultura familiar e Desertificação. **Panorama mundial da desertificação**, n. Foto 1, p. 11–32, 2006.

RODRIGUES, V. Avaliação do quadro da Desertificação no Nordeste do Brasil: Diagnósticos e perspectivas. **Conferência Internacional sobre Impacto das Variações Climáticas e Desenvolvimento Sustentável em Regiões Semiáridas**. Fortaleza, 1992. Disponível em: <http://www.icid18.org/arquivos/volume8_pt.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2019.

RUDORFF, C. D. M.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; VIEIRA, C. A O. Superfícies de resposta espectro-temporal de imagens do sensor MODIS para classificação de área de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciencia Rural**, v. 37, n. 1, p. 118–125, 2007.

SÁ, LÊDO B.; ANGELOTTI, F. A degradação ambiental e a situação atual dos recursos naturais no Semi-Árido. **Mudanças Climáticas E Desertificação No Semi-Árido Brasileiro.**, p. 53–76, 2008.

SALVATI, L. BAJOCCO, S.; CECCARELLI, T.; ZITTI, M.; PERINI, L. Towards a process-based evaluation of land vulnerability to soil degradation in Italy. **Ecological Indicators**, v. 11, n. 5, p. 1216–1227, 2011.

SALVATI, L.; ZITTI, M.; PERINI, L. Fifty Years on: Long-term Patterns of Land Sensitivity to Desertification in Italy. **Land Degradation and Development**, v. 27, n. 2, p. 97–107, 2016.

SAMPAIO, E.; ARAÚJO, M. D. S. B.; SAMPAIO, Y. S. Propensão à desertificação no semi-árido brasileiro. **Revista de Geografia**, v. 22, n. Viii, p. 67–80, 2005.

SILVA, A. K. DE O.; SILVA, H. P. DE B. 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.

SILVA, H. P. DA; RIBEIRO, M. R.; MELO, I. C. DE L. G. H. D. BEZERRA DA S. A. L. DE. Utilização de técnicas de sensoriamento remoto na identificação de áreas sob risco de desertificação no estado de Pernambuco. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, n. 1, p. 9144–9151, 2011.

SILVA, I. A. S.; SILVA, J. C. B.; SILVA, K. A.; BARROS, J. R. Estudo da Desertificação em Gilbués-Piauí: Caracterização Física, Variabilidade Climática e Impactos Ambientais. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 28, n. 3, p. 172–187, 2011.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005a.

SOMMER, S.; ZUCCA, C.; GRAINGER, A.; CHERLET, M. ZOUGMORE, R.; SOKONA, Y.; HILL, J.; DELLA, R.; ROEHRIG, J.; WANG, G. Application of indicator systems for monitoring and assessment of desertification from national to global scales. **Land Degradation and Development**, v. 22, n. 2, p. 184–197, 2011.

STEBBING, E. P. 1935, 'The Encroaching Sahara', **Geographical Journal**, v. 86, p. 509-510, 1935.

SOUSA, R. F.; BARBOSA, M. P.; MORAIS NETO, J. M.; FERNANDES, M. F. Estudo Do Processo Da Desertificação E Das Vulnerabilidades Do Município De Cabaceiras-Paraíba. **SOUSA, R. F. et al. ESTUDO DO PROCESSO DA DESERTIFICAÇÃO E DAS VULNERABILIDADES DO MUNICÍPIO DE CABACEIRAS-PARAÍBA. n. 83, p. 89-102**, n. 83, p. 89–102, 2007.

SOUZA, J. A. DE A. R. F. DE S. ABORDAGENS SOBRE O PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO: UMA REVISÃO DAS EVIDÊNCIAS NO RIO GRANDE DO NORTE. **Geosul**, v. 32, n. 65, p. 122–143, 2017.

SYMEONAKIS, E.; KARATHANASIS, N. KOUKOULAS, S.; PANAGOPOULOS, G. Monitoring Sensitivity to Land Degradation and Desertification with the Environmentally Sensitive Area Index: The Case of Lesbos Island. **Land Degradation and Development**, v. 27, n. 6, p. 1562–1573, 2016.

Sun, G.; Noormets, A.; Gavazzi, M.J.; McNulty, S. G.; Chen, J.; Domec, J. C.; King, J. S.; Amatya, D.M.; Skaggs, R.W. Energy and water balance of two contrasting loblolly pine plantations on the lower coastal plain of North Carolina, USA. *For. Ecol. Manage.* 259, 1299–1310. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.016>. 2010.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. Ph. D. Thesis, Idaho: University of Idaho, 378 p., 2003.

UNEP - United Nations Environment Programme. **Status of desertification and implementation of the United Nations Plan of Action to Combat Desertification**. Nairóbi: UNEP, 1991.

VASCONCELOS, C. H.; NOVO, E. M. L. DE M. Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens-fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat5, na região do reservatório de Tucuruí - PA. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 487–493, 2004.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Processos de desertificação no Nordeste do Brasil: sua gênese e sua contenção**. Recife: Sudene, 1982.

VERÓN, S. R. BLANCO, L. J.; TEXEIRA, M. A.; IRISSARI, G. N.; PARUELO, J. M. Desertification and ecosystem services supply: The case of the Arid Chaco of South America. **Journal of Arid Environments**, v. 159, n. October 2017, p. 66–74, 2018.

VERSTRAETE, M. M. Defining desertification: A review. **Climatic Change**, v. 9, n. 1–2, p. 5–18, 1986.

VIEIRA, R. M. S. P.; SESTINI, M. F.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA, M. O.; OMETTO, J. P. H. B.; VALLES, G. F. Avaliação do impacto da desertificação no ambiente e na população do Semiárido brasileiro por meio de uma base de dados geográficos. **Sustentabilidade em debate**, v. 7, n. Brasília, p. 52–68, 2016.

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSON, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P. M. A.; VALLES, G. F.; CREPANI, E.; OLIVEIRA, S. B. P.; SOUZA, M. S. B.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, n. 1, p. 347–360, 18 mar. 2015.

VIEIRA, N. M. **Estudo geomorfológico das voçorocas de Franca - SP**. Tese (Doutorado em História) - Instituto de História e Serviço Social, Universidade Estadual Paulista, Franca, p. 225, 1978.

XIAO, J.; TATEISHI, R.; BAYAER, W. Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 12, p. 2411–2422, 2006.

XIAO, X.; ZHANG, Q.; BRASWELL, B.; URBANSKI, S.; BOLES, S.; WOFYSY, S.; MOORE, B.; OJIMA, D. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. **Remote Sensing of Environment**, v.91, p.256-270, 2004.

XUE, J.; GUI, D.; LEI, J.; SUM, H.; ZENG, F.; MAO, D.; JIM, Q.; LIU, Y. Oasisification: An unable evasive process in fighting against desertification for the sustainable development of arid and semiarid regions of China. **Catena**, v. 179, n. February 2018, p. 197–209, 2019.

XU, D.; KANG, X.; QIU, D.; ZHUANG, D. Quantitative assessment of desertification using Landsat data on a regional scale – a case study in the Ordos Plateau, China. **Sensors**, n.9, p.1738-1753, 2009.

CAPÍTULO II

PRINCIPAIS AVANÇOS CIENTÍFICOS

RisDes_Index: um índice para análise do avanço de áreas em desertificação a partir de dados de satélite e sua aplicação em um importante Núcleo do Semiárido brasileiro

Resumo: A proposição de um método de identificação da ocorrência de desertificação, que possua associação com dados *in situ*, traz resultados mais assertivos para análise da contribuição de fatores climáticos, sociais e econômicos na avanço desse processo. Neste estudo, objetivou-se propor uma metodologia para avaliação da evolução do processo de desertificação com base em dados de satélite. A concepção do método RisDes_Index foi construída a partir de dados *in situ* e de produtos de imagens de satélites oriundos de cinco sítios experimentais situados no Semiárido brasileiro: um de uma floresta sazonalmente seca, i.e., a Caatinga; outro de um plantio agrícola de cactácea (i.e., cactus forage); uma área em desertificação; e, dois cultivos irrigados (áreas úmidas) de cana de açúcar, com e sem a manutenção de palhada acima do solo. A análise de componentes principais (ACP) foi usada para julgar a base biofísica do RisDes_Index, por meio da associação de seus resultados com dados micrometeorológicos, propriedades físico químicas e de cobertura vegetal coletados nos cinco sítios experimentais. O RisDes_Index foi aplicado a um importante Núcleo de Desertificação (ND) do Semiárido brasileiro, i.e., ND de Cabrobó. A evolução do processo de desertificação no ND de Cabrobó foi avaliada a partir da aplicação do RisDes_Index à imagens de quatro anos: 1991, 2001, 2009 e 2016. A contribuição de fatores climáticos, sociais e econômicos no avanço da desertificação foi identificada por meio de uma ACP entre os dados de RisDes_Index e, os dados anuais de evapotranspiração de referência, precipitação pluviométrica, déficit hídrico, e socioeconômicos de efetivo animal, área plantada e produto interno bruto. Por meio da ACP, duas componentes explicaram 84% da variabilidade dos dados, revelando que na área em desertificação estudada houve uma forte associação de variáveis micrometeorológicas (i.e. razão de Bowen - β) e temperatura da superfície do solo com propriedades físicas (e.g. areia total) e químicas (e.g. pH), e cobertura vegetal (índice de área foliar). A proposição do RisDes_Index foi realizada com base nas variáveis refletâncias das bandas (R, B e G), albedo e IAF do satélite *Landsat* 5 e 8. Os resultados do RisDes_Index mostraram que, em 1991 as áreas desertificadas eram de 38% do total da área do ND de Cabrobó, evoluindo para 51% em 2016. Uma diminuição das áreas de Caatinga foi identificada na ordem de 20%. A aplicação do RisDes_Index confirmou o avanço do processo de desertificação no ND de Cabrobó, como consequência da redução dos níveis pluviométricos e, logo, aumento do déficit hídrico, e intensificação do

desmatamento para o aumento das áreas com criação de rebanhos. Sugere-se a aplicação do RisDes_Index em várias regiões do mundo com propósito de direcionar ações para enfretamento do avanço do processo de desertificação.

Palavras chaves: Semiárido; LandSat; Mudanças Climáticas.

1 Introdução

A desertificação é um problema ambiental que ocorre em todo o mundo, e que nos últimos 50 anos tem sido mais discutido, por causa dos impactos causados ao Meio Ambiente, Economia e na Sociedade (Joseph et al., 2018; Karavitis et al., 2020). A desertificação é caracterizada como a degradação da terra em áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de fatores climáticas e de atividades humanas (UNCCD, 1995). Atualmente, a desertificação afeta mais de 1/3 das terras do mundo, atingindo países como China, Itália, África do Sul, Estados Unidos da América do Norte, México, Argentina e Brasil (Briassoulis, 2019; Akbari et al., 2020).

No Brasil, a desertificação é mais evidente na região semiárida dos estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Piauí, Ceará e Bahia, onde estão presentes os Núcleos de Desertificação (ND's) (Vasconcelos e Sobrinho, 1982). Os ND's tratam-se de áreas de grandes manchas desnudas, com presença ou não de vegetação e sinais claros de erosão do solo (Perez-Marin et al., 2012). Seis áreas são caracterizadas como ND's: Núcleo de Gilbués - PI; Núcleo de Irauçuba - CE; Núcleo de Cabrobó - PE; Núcleo de Seridó - RN; Núcleo Cariris Velhos - PB e Núcleo do Sertão do São Francisco - BA, que ocupam uma área de 55.000 km² (Briassoulis, 2019; Leite et al., 2019).

Nesses ambientes, as consequências decorrentes do processo de desertificação são desde as condições ambientais até as questões sociais. A desertificação promove perda da fertilidade dos solos, diminuição dos recursos hídricos, redução da biodiversidade e perdas na capacidade produtividade do solo, que culmina no abandono das terras, por parte dos produtores, por causa da incapacidade de produção (Vieira et al., 2015; Ferreira et al., 2017; Garcia et al., 2019).

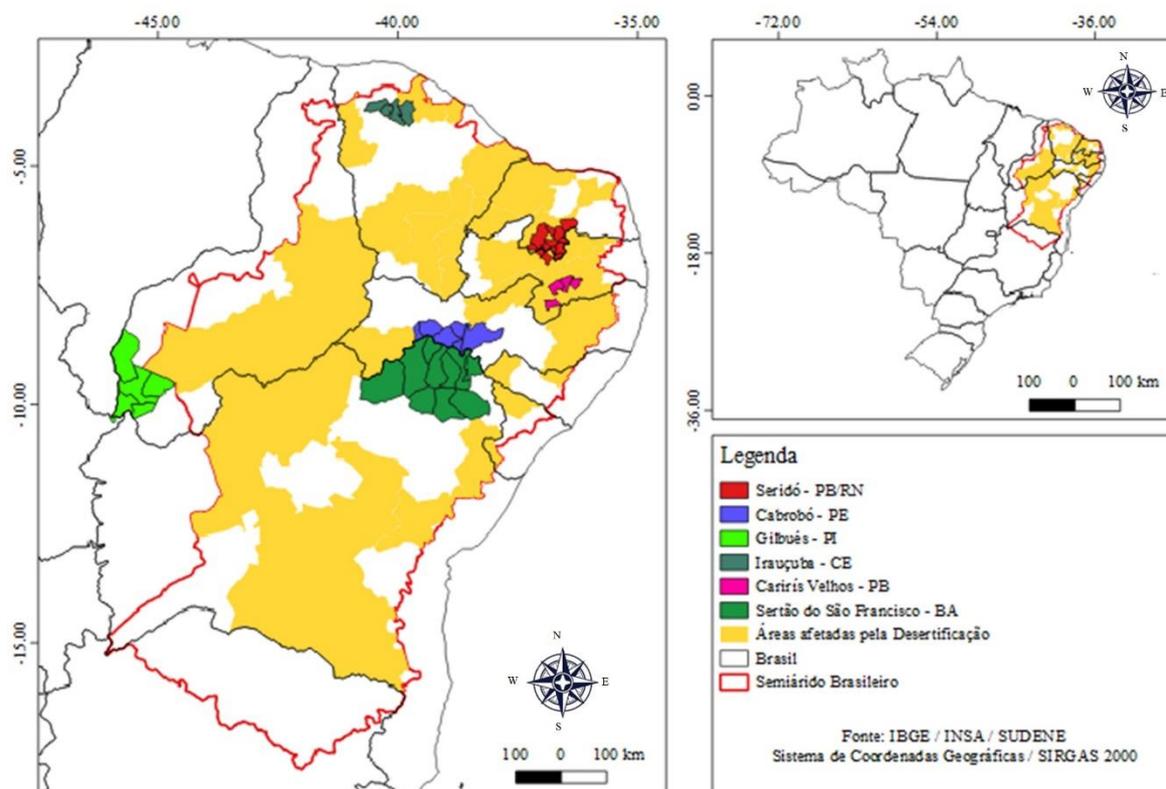


Figura 1. Localização dos Núcleos de Desertificação (ND's) no Semiárido brasileiro definidos com base na metodologia do Índice de Aridez ($IA = P ETP^{-1}$, onde P é a precipitação pluviométrica anual e ETP é a evapotranspiração potencial anual).

Contudo, muitas controversas surgem a respeito da causa da desertificação, isso porque existe padrões diferentes para seu surgimento. No Brasil, por exemplo, a desertificação pode ter surgido em algumas regiões devido ao mal uso dos recursos naturais, como o desmatamento para o uso de madeira como fonte de energia, construções de cercas e casas; irrigação como suprimento de água para as culturas agrícolas e a falta de manejo correto do solo (Bezerra et al., 2019; Garcia et al., 2019; Leite et al., 2019) e por questões climáticas, em que a alta demanda atmosférica combinada ao baixo regime pluviométrico gera um déficit hídrico demasiado e caducifolia na vegetação (Perez-Marin et al., 2012; Araújo et al., 2017; Ferreira et al., 2018).

Neste estudo há dúvidas quanto aos fatores responsáveis pelo avanço da desertificação e de suas respectivas contribuições. Para esse esclarecimento, o monitoramento e avaliação das mudanças ambientais é muito importante (Ferreira et al., 2018; Lima et al., 2017). A avaliação criteriosa a partir de indicadores de detecção do processo de desertificação permite o correto planejamento e tomada de decisão para controle

ou adaptação. Pesquisas são desenvolvidas para mensurar e mitigar os efeitos da desertificação, por meio de metodologias, que utilizam técnicas de Sensoriamento remoto - SR. Algumas são mais recentes outras mais antigas, mas em ambos os casos, sempre se busca maior precisão para monitoramento do avanço do processo de desertificação (Akbari et al., 2020; Briassoulis, 2019; Karavitis et al., 2020; Oikonomou et al., 2019; Xue et al., 2019).

O índice de Aridez (IA) é um dos indicadores mais usados na identificação de áreas desertificadas ou que tenha potencial para ocorrência desse fenômeno. O IA considera a razão entre a precipitação e a evapotranspiração potencial e permite avaliar as limitações impostas pelo clima para realização de atividades biológicas primárias e, logo, na produtividade agrícola (UNEP, 1991; Sales, 2002). Porém, a falta de homogeneidade dos bancos de dados e uma série confiável de informações inviabiliza estudos ao longo do tempo, sendo imprescindível o uso de dados estimados para a sua realização (ALMEIDA et al., 2020; LOPES et al., 2015).

Um trabalho que é referência para os estudos sobre desertificação é o de Kosmas et al. (1999), que usa índices na identificação de áreas desertificadas e seus efeitos na região do Mediterrâneo. Este método apresenta bons resultados na identificação de áreas desertificadas (Karavitis et al., 2020; Vieira, 2015; Salvati et al., 2011), porém esbarra na grande quantidade de variáveis utilizadas o que de certa forma inviabiliza a sua utilização para outras regiões do planeta. Assim, métodos que necessitam de uma menor quantidade de variáveis e possuam boa eficiência devem ser desenvolvidos melhor para avaliação do avanço do processo de desertificação.

Nesse sentido, o sensoriamento remoto (SR) é uma ferramenta muito útil para buscar soluções, e isso vem tomando cada vez mais notoriedade nos últimos 30 anos (Tomasella et al., 2018; Verón et al., 2018). Em um estudo desenvolvido no Platô da Mongólia, Wei et al. (2018) desenvolveram um método com base no NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada), α (albedo da superfície da terra), MSAVI (índice de vegetação da terra) e TGSi (índice de tamanho de grão do solo superficial) para estudos de desertificação. Nesse estudo, identificaram-se que essas variáveis explicam em torno de 86% dos efeitos da desertificação. O modelo que considerou o Albedo-NDVI exibiu boa precisão para regiões de cobertura vegetal de maior porte. Segundo os autores, os modelos propostos têm baixa eficiência em regiões semiáridas, por causa da flutuação da densidade foliar da vegetação ao longo do ano. Outro modelo que utiliza produtos de satélite para identificação de áreas em processo de desertificação é o proposto por Pan & Li (2013), que leva em consideração o albedo da

superfície e características da vegetação, porém necessita do ajuste do albedo para áreas onde o modelo será aplicado. As características da vegetação caatinga compromete alguns modelos que são capazes de identificar áreas em processo de desertificação (Tomasella et al., 2018; Araújo et al., 2008; Soares et al., 2011).

Dessa forma, a proposição de indicadores que combinem produtos orbitais que possuem consonância com dados de superfície pode melhorar a precisão na identificação de áreas com avanço do processo de desertificação, auxiliando assim em ações de mitigação no Semiárido Brasileiro. Nossa hipótese é que a proposição de um método de identificação da ocorrência de desertificação, que possua associação com dados *in situ*, traz resultados mais assertivos para o julgamento da evolução desse processo e a contribuição de fatores climático e socioeconômicos. Neste estudo, objetivou-se propor uma metodologia para análise da sensibilidade do Sertão Central do Brasil ao avanço do processo de desertificação, por meio de dados *in situ*, técnicas de modelagem, sensoriamento remoto e uso de multicritérios. Especificamente, (i) definiu-se um índice com base em produtos orbitais que possuíssem associação com dados micrometeorológicos, biofísicos da vegetação e de solo de paisagens presentes no Semiárido brasileiro (Caatinga, cultivo agrícola de cactácea, cultivos irrigados e áreas em processo de desertificação); (ii) comparou-se métodos de análise da sensibilidade de áreas à desertificação; (iii) compreendeu-se a evolução do processo de desertificação a partir da associação com indicadores socioeconômico-climáticos.

2 Material e métodos

2.1 Sítios experimentais

Nessa pesquisa, dados *in situ* de cinco sítios experimentais com distintos usos do solo foram usados para associação com os resultados do índice de desertificação proposto neste estudo. Os três primeiros sítios ficam localizado dentro do Núcleo de desertificação de Cabrobó, no município de Floresta, na divisa entre as cidades de Serra Talhada, Carnaubeira da Penha, Mirandiba e Floresta pertencentes ao estado de Pernambuco (Figura 2). A temperatura anual do ar é de 26,1°C, precipitação pluviométrica em torno de 489,3 mm ano⁻¹, com chuvas sazonais que se concentram em seu maior volume entre os meses de dezembro e abril. A evapotranspiração potencial média é de 1.646 mm ao ano, com déficit hídrico anual de 1.023 mm (EMBRAPA - Banco de dados climáticos do Brasil). O solo predominante é classificado como um Luvissole Crônico (Embrapa, 2006).

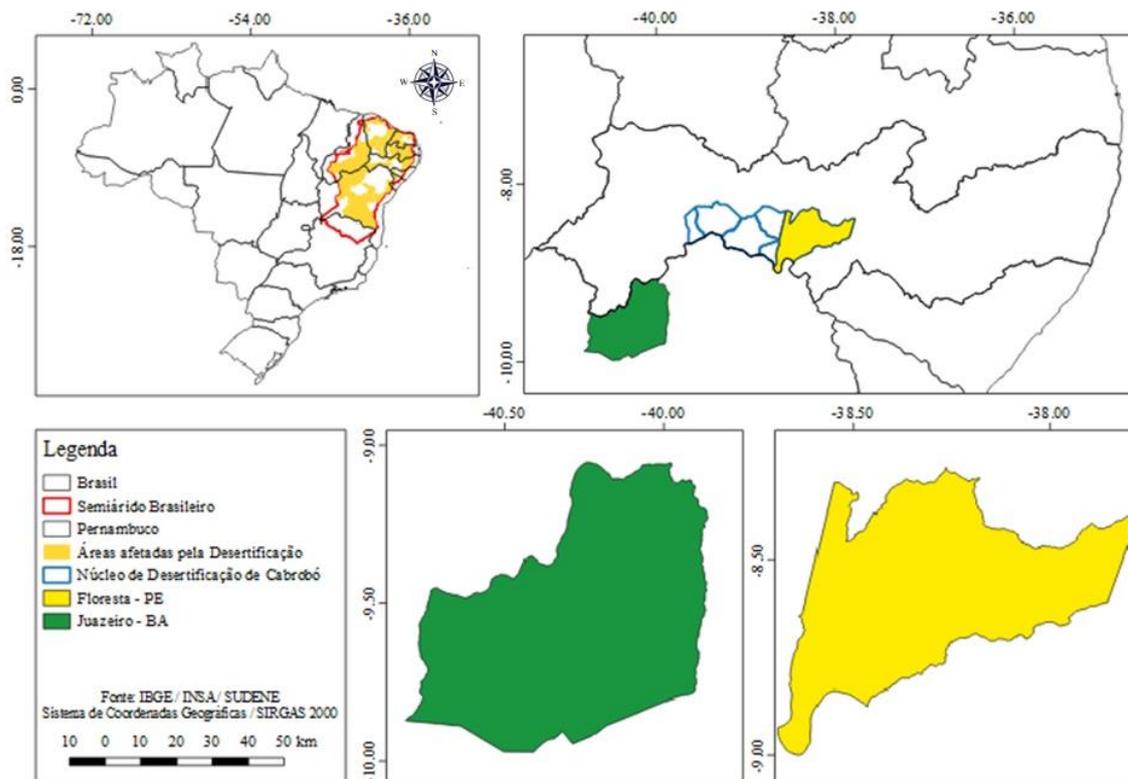


Figura 2. Localização dos municípios de Floresta, estado de Pernambuco, e de Juazeiro, estado da Bahia, Brasil, onde foram coletados os dados *in situ*, o modelo digital de elevação SRTM 30 m para a área de estudo do Núcleo de Desertificação de Cabrobó.

Os três sítios experimentais são compostos por uma área de Caatinga, outra por um cultivo de cactáceas (palma forrageira, *Opuntia stricta* (Haw.) Haw.) e a terceira por uma área desmatada com indícios de processo de desertificação (Fig. 3). Outros dois sítios, com cultivos irrigados de cana-de-açúcar (Fig. 3), estão situados em área comercial de cana-de-açúcar (Empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A.), no município de Juazeiro, BA, Semiárido brasileiro, em um solo do tipo Vertissolo (Embrapa, 2006). O clima da região é semiárido, com chuva de 513 mm ano⁻¹, distribuídos, sobretudo entre as estações do verão e do outono, e demanda atmosférica de 1.887 mm ano⁻¹, conforme série histórica de 1965 a 2015. O sítio Caatinga (CAA) (9°30'36''S; 40°22'15''W; 401 m) possui ampla diversidade de espécies, que compõem o extrato herbáceo, arbustivo e arbóreo, frequentemente com altura inferior a 7 m, sendo a vegetação esparsa e com predominância de espécies endêmicas e decíduas. Vale salientar que no passado essa área passou por alguns ciclos de extração seletiva de madeira para utilização no consumo doméstico e construção de currais e cercas. Para este estudo foi considerada área de 10 ha (Fig. 3B). O segundo sítio experimental (9°30'36''S; 40°22'15''W; 401 m) fica localizado a uma distância de 1,5 km do primeiro e

0,5 km da terceira área. Composto por uma área cultivada de plantas Cactáceas, nesse caso a palma forrageira (CAC), cujo o clone é Orelha de Elefante Mexicana IPA-200016 do gênero *Opuntia* (Fig. 3C). O estabelecimento da cultura foi realizado em agosto de 2014, em espaçamento de 2,0 x 0,50 m (Fig. 3E). O manejo da cultura é feito de forma sistemática sendo praticado capina e adubação sempre que necessário e sua colheita realizada anualmente. A área do sítio CAC compreende 1,1 ha. O terceiro sítio experimental (9°30'36''S; 40°22'15''W; 401 m) de área 5 ha com indícios de desertificação (DES), antigamente era composta por vegetação de Caatinga, a qual foi desmatada para a condução de atividades agrícolas há mais de 80 anos. Atualmente, possui a presença de gramíneas rasteiras e pelo solo exposto (Fig. 3D). Os sítios com cana-de-açúcar são compostos por dois talhões experimentais adjacentes (Fig. 3E), cada um com 5,0 ha, que são colhidos manualmente; o primeiro (9°30'36''S; 40°22'15''W; 401 m) logo após a queima e o segundo com “cana crua” (sem queima) (9°30'43''S; 40°22'20''W; 401 m).

Os cinco sítios experimentais foram utilizados como base de dados para determinação do RisDes_Index. As informações de satélite usadas para desenvolvimento do modelo foram coletadas pixel a pixel nas áreas experimentais entre os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018. O sítio da área desertificada foi usado como referência para identificação dos padrões de dados desse tipo de ambiente. Já os sítios da Caatinga e de plantas CAM representaram a vegetação nativa esparsada e cultivos agrícolas resilientes típicos de ambientes áridos e semiáridos. Os sítios de cana de açúcar irrigada foram empregados para identificação dos ambientes úmidos persistentemente, as quais se diferenciam das áreas desertificadas.

2.2 Dados medidos do balanço de energia à superfície e propriedades físico químicas do solo

Os cinco sítios experimentais foram equipados com torres compostas por sistemas de medidas de baixa frequência para medição da temperatura (T, °C) e umidade relativa do ar (UR, %), fluxo de calor no solo (G, MJ m² dia⁻¹), saldo de radiação (Rn, MJ m² dia⁻¹) e precipitação pluviométrica (P, mm). Para a T e UR foram instalados termohigrômetros (HMP155A, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) em dois níveis acima da superfície vegetada, o primeiro a 0,50 m e o segundo a 2,0 m. Para medição do G, o fluxímetro (HFT3-REBS, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) foi colocado a 0,05 m de profundidade do solo.

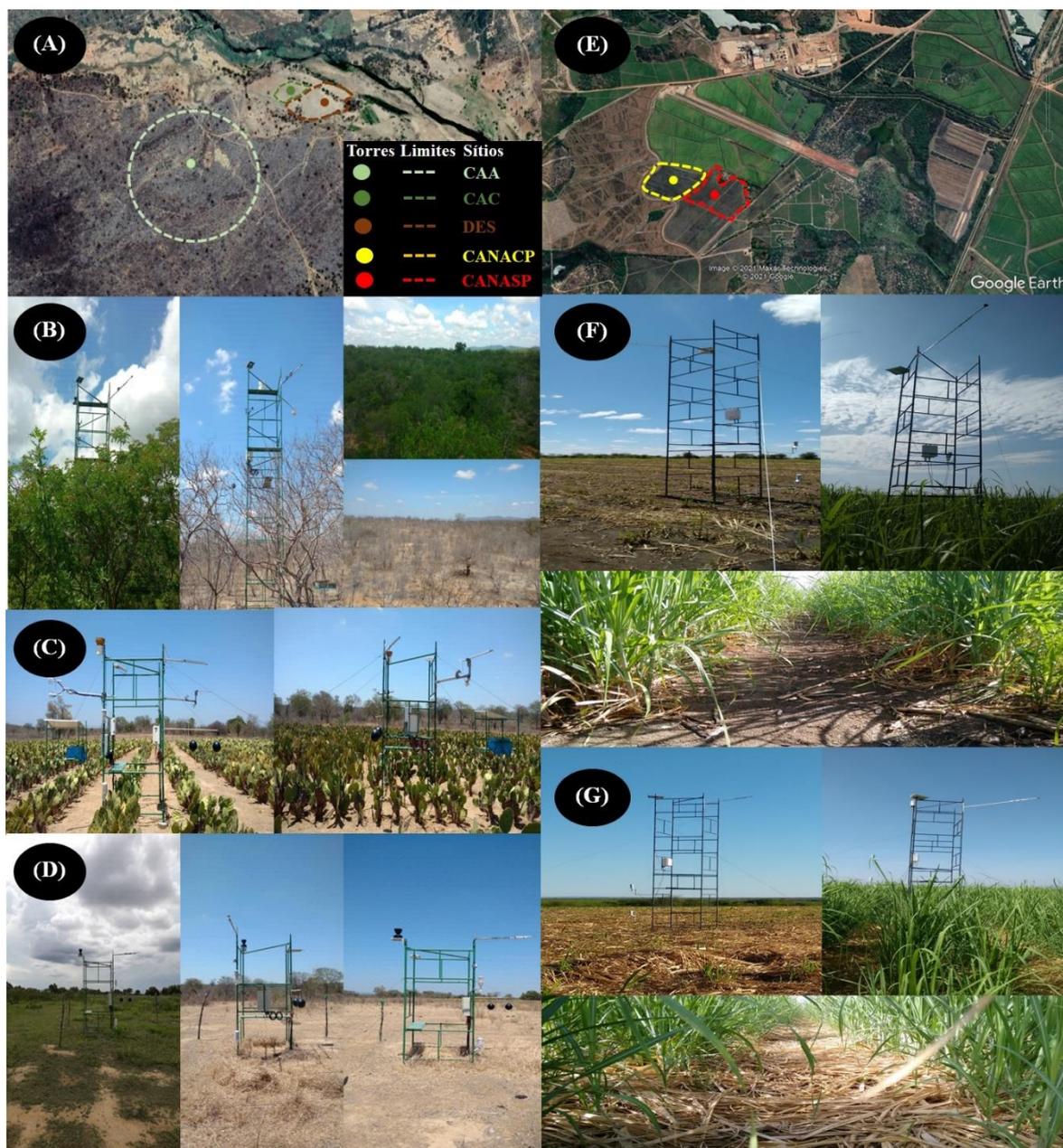


Figura 3. Localização dos sítios experimentais (A e E) da caatinga (CAA, B), cactácea (CAC, C) e área em desertificação (DES, D) no município de Floresta Pernambuco, e dos cultivos de cana de açúcar com manutenção da palhada no campo (CANACP, F) e sem manutenção da palhada no campo (CANASP, G) no município de Juazeiro, Bahia, Brasil.

O saldo radiômetro (RNLITE, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) para medição do R_n e o pluviométrico (TE525-L, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) para a precipitação pluvial foram instalados no topo das torres micrometeorológicas. Os dados foram coletados a cada 60 s e médias foram armazenadas a cada 10 min em um datalogger (CR1000, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA).

A partir desses dados foram quantificadas as partições do saldo de radiação em fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (LE) nos horários de passagem do satélite Landsat 8 OLI/TIRS. Os efeitos de advecção, o armazenamento de energia no dossel e biomassa, e a energia usada no processo de fotossíntese foram negligenciados (Jamiyansharav et al., 2011; Sun et al., 2010). Logo, baseando-se no princípio da conservação de energia, a sua partição na superfície será estimada por meio da Eq. 1 (Hu et al., 2014):

$$R_n = LE + H + G \quad (1)$$

em que, R_n - saldo de radiação ($W m^{-2}$); LE - fluxo de calor latente ($W m^{-2}$); H - fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$) e G - fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$).

As estimativas de LE e H foram feitas por meio do método do balanço de energia à superfície pelo método da razão de Bowen (BERB). Essas estimativas foram realizadas a partir das Eqs. 2 e 3.

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (2)$$

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (3)$$

em que, β é razão de Bowen.

β foi calculada por meio da Eq. 4 (Silva et al., 2011c).

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \left(\frac{C_p}{\lambda 0,622} \right) \left(\frac{\Delta T}{\Delta e} \right) \quad (4)$$

em que, γ é a constante psicrométrica; ΔT e Δe são as diferenças de temperatura e de pressão de vapor d'água nas duas alturas de medição acima da superfície, nessa ordem; C_p é o calor específico à pressão constante ($1.004,67 J kg^{-1} K^{-1}$), e 0,622 representa a proporção de pesos moleculares da água e do ar seco. λ e o calor latente de vaporização, dado pela Eq. 5:

$$\lambda = 1,9198 \cdot 10^6 \left[\frac{T + 273,16}{(T - 273,16) - 33,91} \right]^2 \quad (5)$$

As propriedades físico químicas do solo foram obtidas para os cinco sítios a partir de amostras deformadas e não deformadas coletadas a cada 0,10 m até a profundidade de 0,60 m, conforme descrito em Silva et al. (2021). As propriedades físicas do solo foram capacidade de campo à tensão de 0,03 MPa (CC, dag kg⁻¹), ponto de murcha permanente a 15 MPa (PMP, dag kg⁻¹), densidade do solo e da partícula (Ds e Dp, kg dm⁻³), total porosidade (Pt,%) e frações totais de areia (ArT, g kg⁻¹), silte (Silt., g kg⁻¹) e argila (Arg., g kg⁻¹) (Embrapa 2009). As propriedades químicas do solo foram condutividade elétrica (CE,

dS m⁻¹), potencial de hidrogênio (pH) na água e orgânico teor de carbono (OC, g kg⁻¹); os conteúdos de fósforo disponível (P, mg dm⁻³), potássio (K⁺, cmolc kg⁻¹) e sódio (Na⁺, cmolc kg⁻¹), cobre (Cu²⁺, mg kg⁻¹), ferro (Fe, mg kg⁻¹), manganês (Mn, mg kg⁻¹) e zinco (Zn²⁺, mg kg⁻¹), cálcio (Ca²⁺, cmolc kg⁻¹) e magnésio (Mg²⁺, cmolc kg⁻¹); e acidez potencial (H⁺⁺ Al³⁺, cmolc kg⁻¹), soma das bases (SB, cmolc kg⁻¹) e a capacidade de troca catiônica (CTC, cmolc kg⁻¹) (Embrapa 2009).

2.3 Coleta e processamento dos dados orbitais

Nesse estudo foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5/TM e 8/OLI. As imagens do satélite Landsat 8 foram usadas inicialmente para a determinação do modelo RisDes_Index e, posteriormente, em conjunto com imagens do Landsat 5 foram aplicadas para análise dos avanços da desertificação no ND de Cabrobó. As características das imagens dos dois satélites podem ser encontradas na Tabela 1.

Para o desenvolvimento do modelo foram utilizadas imagens registradas pelo satélite Landsat 8 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) e obtidas a partir do site da United States Geological Survey (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), entre os anos de 2015 e 2018 (Tab. 2). Vinte e quatro imagens selecionadas, cada uma com 11 bandas multiespectrais entre os comprimentos de onda de 0,43 e 12,51 µm.

A resolução espectral de 16 bits no formato GeoTIFFs (arquivo compactado) e TXT (Metadados). A intensidade de cada pixel está entre 0 a 65.535, o que assegura um maior grau de detalhamento das informações geradas. A projeção é do tipo Datum WGS 1984/UTM/Zona 24. As imagens foram tratadas e processadas utilizando o programa Qgis versão 2.15. A partir das imagens foram geradas informações espectrais para os sítios experimentais. Para isto, conduziu-se análise da qualidade das imagens. Os dados de precipitação pluviométrica são apresentados na Tab. 2.

Em seguida, as imagens foram submetidas à metodologia proposta por Bastiaanssen et al. (1998) e Allen et al. (2002), conforme fluxograma apresentado na Fig. 4. Com base nas variáveis obtidas foram estabelecidos os parâmetros para geração do modelo RisDes_Index.

Tabela 1. Características do Satélites Landsat 5/TM e 8/OLI.

Land sat	Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica	
5	TM (Thematic Mapper)	(Banda 1) Azul	0.45 - 0.52 μm					
		(Banda 2) Verde	0.52 - 0.60 μm					
		(Banda 3) Vermelho	0.63 - 0.69 μm	30 m				
		(Banda 4) Infravermelho Próximo	0.76 - 0.90 μm			16 dias	185 km	8 bits
		(Banda 5) Infravermelho Médio	1.55 - 1.75 μm					
		(Banda 6) Infravermelho Termal	10.4 - 12.5 μm	120 m				
		(Banda 7) Infravermelho Médio	2.08 - 2.35 μm	30 m				
		(Banda 1) Costal	0.433 - 0.453 μm					
		(Banda 2) Azul	0.450 - 0.515 μm					
8	OLI (Operational Land Imager)	(Banda 3) Verde	0.525 - 0.600 μm					
		(Banda 4) Vermelho	0.630 - 0.680 μm	30 m				
		(Banda 5) Infravermelho Próximo	0.845 - 0.885 μm			16 dias	185 km	12 bits
		(Banda 6) Infravermelho Médio	1.560 - 1.660 μm					
		(Banda 7) Infravermelho Médio	2.100 - 2.300 μm					
		(Banda 8) Pancromático	0.500 - 0.680 μm	15 m				
		(Banda 9) Cirrus	1.360 - 1.390 μm	30 m				

Tabela 2. Data das imagens coletadas para os satélites *Landsat 8* e *Landsat 5*.

<i>Landsat 8</i>	Imagem	1	2	3	4
	Data	01/02/2015	15/04/2015	02/09/2015	04/10/2015
	Imagem	5	6	7	8
	Data	20/10/2015	21/11/2015	07/12/2015	02/05/2016
	Imagem	9	10	11	12
	Data	20/09/2016	06/10/2016	23/11/2016	24/12/2016
	Imagem	13	14	15	16
	Data	18/05/2017	03/06/2017	10/11/2017	23/12/2017
	Imagem	17	18	19	20
	Data	22/06/2018	08/07/2018	15/04/2015	24/08/2015
	Imagem	21	22	23	24
	Data	09/09/2015	27/11/2015	14/12/2015	18/05/2017
<i>Landsat 5</i>	Imagem	1	2	3	4
	Data	20/11/2009	04/11/2001	12/12/1991	29/10/2016

Tabela 3. Precipitação pluviométrica dos sítios referente ao período de análise das imagens.

Mês		Ano			
		1991	2001	2009	2016
Cabrobó	Set.	0	0	0	0
	Out.	0	31,8	27,4	2,4
	Nov.	0	0	8	0
Carnaubeira da Penha	Set.	0	0	0	0
	Out.	0	26,75	0	0
	Nov.	0	18	47	0
Belém do São Francisco	Set.	0	0	0	0
	Out.	0	0	23,5	0
	Nov.	69	0	0	0
Floresta	Set.	0	0	0	0
	Out.	0	26,75	7	0
	Nov.	31	18	1,9	0
Itacuruba	Set.	0	0	0	0
	Out.	0	10	8,9	0
	Nov.	0	10	0	0
Orocó	Set.	0	0	0	0
	Out.	0	0	27,4	2,4
	Nov.	0	0	8	0
Total		100	141,3	159,1	2,4

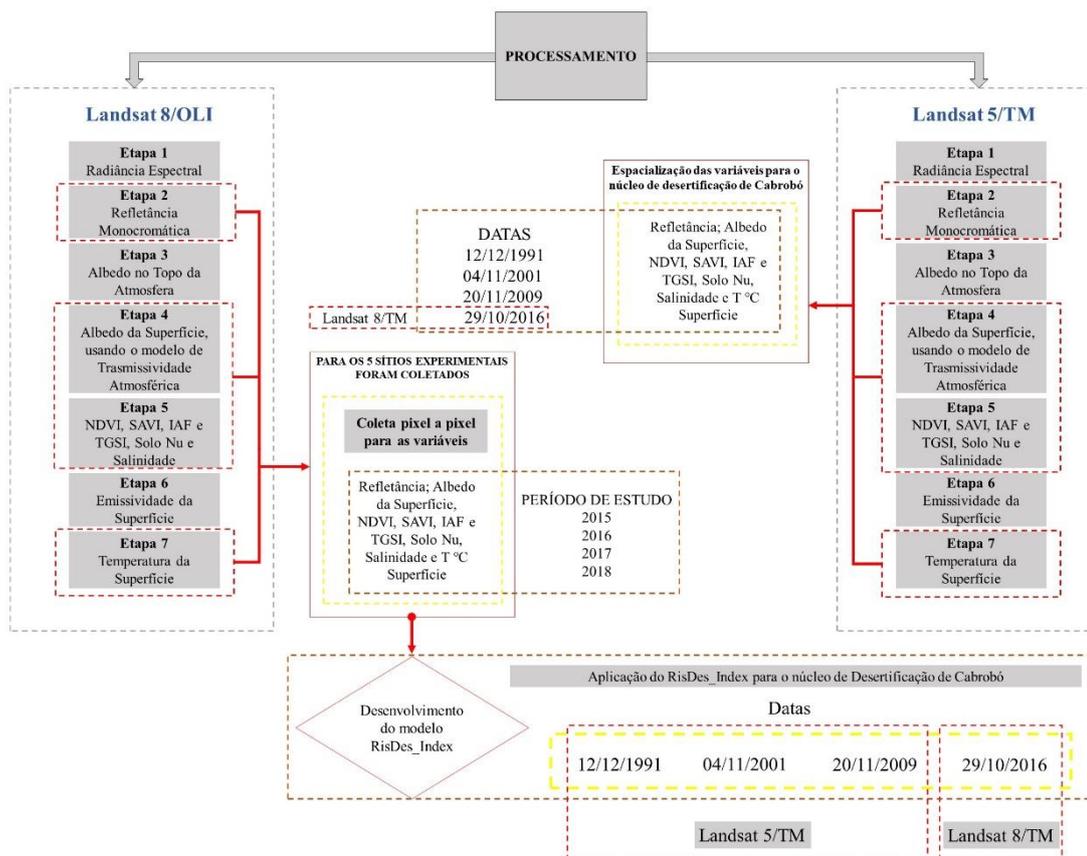


Figura 4. Fluxograma do processamento das imagens e geração de produtos por meio de imagens Landsat 5/8 OLI/TIRS (Níveis de cinza - ND; Índice de área foliar - IAF; Índice de Vegetação Ajustado ao Solo - SAVI; Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI; e, Albedo da superfície).

2.4 Produtos e índices de satélite

Todas as etapas de processamento das imagens e geração de produtos, foram gerados com base nas informações dos satélites Landsat 5/8 OLI/TIRS e são exibidos na Figura 4. Com os dados das imagens foram quantificados radiâncias no nível de cada banda do sistema sensor OLI e TM dos *Landsat's* 5/8, usando os coeficientes radiométricos referentes à radiância, disponibilizados nos arquivos de metadados para cada uma das imagens. Para a radiância espectral em cada banda foi utilizada a Eq. 6 (Chander; Markham, 2003; Silva et al., 2016):

$$L_{b \text{ Land } 8} = \text{Add}_{\text{rad } b} + \text{Mult}_{\text{rad } b} \cdot \text{ND}_b \quad (6)$$

em que, $\text{Add}_{\text{rad } b}$ - termo aditivo e $\text{Mult}_{\text{rad } b}$ o multiplicativo, relativos à radiância, extraídos dos arquivos de metadados de cada imagem do OLI e ND_b - intensidade de cada pixel e banda (valor entre 0 e 65365). A refletância (OLI e TM) foi determinada pela com a Eq. 7.

$$r_{b \text{ Land } 8} = \frac{(\text{Add}_{\text{ref } b} + \text{Mult}_{\text{ref } b} \cdot \text{ND}_b)}{\cos \theta \cdot d_r} \quad (7)$$

em que, $r_{b \text{ Land } 8}$ ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) - refletância monocromática para cada pixel em cada banda; $\text{Add}_{\text{ref } b}$ e $\text{Mult}_{\text{ref } b}$ - termos aditivo e multiplicativo. Estes valores são extraídos dos arquivos de metadados de cada imagem e d_r conforme a Eq. 8 (Iqbal, 1983):

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{\text{DSA} \cdot 2 \cdot \pi}{365}\right) \quad (8)$$

em que, DSA - dia juliano. O valor médio anual de d_r é igual a 1, variando entre 0,97 e 1,03. O cosseno do ângulo zenital solar (θ , adimensional) foi obtido a partir do ângulo de elevação do Sol (E, graus), disponibilizado nos arquivos de metadados das imagens, conforme Eq. 9.

$$\cos \theta = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) = \text{sen}(E) \quad (9)$$

Em seguida, os coeficientes de pesos para cada banda das imagens foram obtidos de acordo com a metodologia proposta por Chander & Markham (2003) e Silva et al. (2016). Para isto é necessário a constante solar ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) associada a cada uma das respectivas bandas refletivas do OLI e TM, que é calculada a partir da Eq. 10.

$$k_{b \text{ Land}} = \frac{\pi \cdot L_{b \text{ Land}}}{r_{b \text{ Land}} \cdot \cos \theta \cdot d_r} \quad (10)$$

em que, $k_{b \text{ Land}}$ ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) corresponde a irradiância solar espectral de cada uma das respectivas bandas refletivas do *Landsat 5* e 8 TM e OLI no Topo da Atmosfera (TOA).

O peso ($p_{b \text{ Land}}$, adimensional) para cada banda do OLI foi calculado, por meio da razão entre o $k_{b \text{ Land}}$ daquela banda e o somatório de todos os $k_{b \text{ Land}}$ do *Landsat 5* e 8 TM e OLI (STARKS et al., 1991; CHANDER & MARKHAM, 2003; SILVA et al., 2005b; SILVA et al., 2016), como é observado na Equação 11. Este peso é usado no cálculo do albedo planetário.

$$p_{b \text{ Land}} = \frac{k_{b \text{ Land}}}{\sum k_{b \text{ Land}}} \quad (11)$$

Os pesos calculados foram empregados na determinação do albedo planetário, que se refere a etapa do processamento das imagens. Destaca-se que, esse processo se assemelha ao que repentinamente tem sido feito no algoritmo SEBAL e METRIC por diversos autores (Bastiaanssen et al., 1998a; Allen et al., 2007; Chander et al., 2009; Oliveira et al., 2012; Oliveira et al., 2015; Silva et al., 2016; Souza et al., 2016) com imagens TM do *Landsat 5*.

O albedo no topo da atmosfera (α_{toa}) representa a quantidade de radiação refletida de cada pixel sem correção atmosférica, que versa na combinação linear da refletância espectral das bandas ($r_{b \text{ Land } 5}$ e $r_{b \text{ Land } 8}$) de 1 a 5 e 7 do TM e da combinação das bandas de 2 a 7 do

OLI, com os respectivos pesos do OLI ($p_{b \text{ Land } 8}$) como foi calculado pela equação anterior. Logo, o albedo planetário é obtido pela estimativa semelhante a realizada por Silva et al. (2005b) diante do *Landsat 5 TM*, conforme o estudo de Silva et al. (2016) Eq.12 e 13.

$$\alpha_{\text{toa}} = p_2 \cdot r_2 + p_3 \cdot r_3 + p_4 \cdot r_4 + p_5 \cdot r_5 + p_6 \cdot r_6 + p_7 \cdot r_7 \quad (12)$$

$$\alpha_{\text{toa}} = 0,293p_1 + 0,274p_3 + 0,233p_4 + 0,157p_5 + 0,033p_6 + 0,011p_7 \quad (13)$$

em que, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6 e p_7 Land 8 - pesos para cada uma das bandas e r_2, r_3, r_4, r_5, r_6 e r_7 Land 8 - refletâncias de cada uma das bandas utilizadas, respectivamente.

Para melhor estimativa dos valores de albedo, realizou-se a correção (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2002; SILVA et al., 2005a; Oliveira et al., 2012; Silva et al., 2016), conforme a Eq. 14.

$$\alpha_{\text{sup}} = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha_{\text{atm}}}{\tau_{\text{sw}}^2} \quad (14)$$

em que, α_{sup} - albedo da superfície corrigido para os efeitos atmosféricos; α_{atm} - refletância da própria atmosfera, que é obtida a partir de um modelo de transferência radiativa, que varia entre 0,025 e 0,04 (ALLEN et al., 2002). No modelo SEBAL, o valor de 0,03 tem sido recomendado, e foi adotado neste estudo (Bastiaanssen, 2000). τ_{sw} é a transmissividade atmosférica da radiação solar para dias de céu claro (ASCE-ERWI, 2005; Allen et al., 2002), calculada por meio da Eq. 15.

$$\tau_{\text{sw}} = 0,35 + 0,627 \cdot \exp \left[\frac{-0,00146 \cdot P_0}{K_t \cdot \cos \theta} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos \theta} \right)^{0,4} \right] \quad (15)$$

em que, P_0 (kPa) é a pressão atmosférica instantânea; K_t é o coeficiente de turbidez da atmosfera ($K_t = 1,0$ para céu claro e limpo e $K_t = 0,5$ para ar extremamente turbido ou poluído, segundo (Allen et al., 2002; 2007a). Para este trabalho foi usado o $K_t = 1,0$, valor proposto em alguns estudos (OLIVEIRA et al., 2012; SILVA et al., 2016); W (mm) é a água precipitável obtida em função da umidade relativa do ar instantânea Eq. 16.

$$W = 0,14e_a P_{\text{air}} + 2,1 \quad (16)$$

2.5 Índices de vegetação e de solo

Três índices de vegetação: NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo) e IAF (Índice de Área Foliar) foram calculados. O NDVI e o SAVI por meio da classificação proposta por (Wang et al., 2002; Wang et al., 2004) indica valores que caracterizam o grau da desertificação (>0,6 nenhuma; 0,45-0,6 pouco; 0,25-0,45 moderado; 0,15-0,25 sério e 0-0,15 muito sério). Segundo a classificação proposta por esse mesmo autor o IAF apresenta faixas que caracterizam a

desertificação entre (>0,45 nenhuma; 0,35-0,45 pouca; 0,25-0,35 moderado; 0,10-0,25 sério; <0,10 muito sério).

O NDVI foi obtido através da razão entre a diferença das refletâncias do infravermelho próximo (ρ_{IV}) e do vermelho (ρ_V), pela soma das mesmas de acordo com Allen et al. (2002) (Eq. 17):

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (17)$$

em que, ρ_{IV} e ρ_V correspondem, nessa ordem, as refletâncias das bandas 5 e 4 do Landsat 8 OLI e bandas 3 e 4 do Landsat 5 TM.

O SAVI, que busca amenizar os efeitos do “background” do solo, foi estimado por meio da Eq. 18 (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (18)$$

em que, ρ_{IV} e ρ_V correspondem, respectivamente, as bandas refletivas 5 e 4 do Landsat 8 e 5 OLI e TM; L é a constante de ajuste ao solo, que depende do tipo de solo, o valor mais utilizado é 0,5 (HUETE e WARRICK, 1990; ACCIOLY et al., 2002; BOEGH et al., 2002; SILVA et al., 2005a). Allen et al. (2007) e Silva et al. (2011) tem usado o valor igual a 0,1, sendo utilizado o valor $L = 0,5$.

Por meio do SAVI foi estimado o IAF, que tem relação com a biomassa na superfície. O IAF foi calculado com o método proposto por Allen et al. (2007), e descrito pela Eq. 19:

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (19)$$

O Índice de tamanho de grão do solo superficial (TGSI) foi desenvolvido por Xiao et al., (2006), e está associado às propriedades físicas do solo superficial e, baseia-se no diâmetro médio ou efetivo de grãos ou partículas minerais individuais. O TGSI reflete o aumento do tamanho do grão do solo superficial, que tem uma correlação positiva com o teor de areia fina do solo superficial. Quanto mais severa a desertificação mais grossa é o tamanho dos grãos do solo. Valores altos de TGSI são encontrados em áreas com alto teor de areia fina no solo superficial ou baixa proporção de grãos de argila-silte, sendo obtido pela Eq. 20.

$$TGSI = \frac{(R - B)}{(R + B + G)} \quad (20)$$

onde, R corresponde a refletância das bandas vermelha do sensor; B a banda azul e G a banda verde.

O índice de salinidade representa as características superficiais do solo que leva em consideração as bandas do infravermelho IV_{termal} e $IV_{\text{médio}}$. Valores negativos ou próximo de zero apresentam supostamente uma susceptibilidade a salinização do solo, que é um dos processos que ocorrem em ambientes desertificados Eq. 21.

$$NDSI = \left[\frac{(IV_{\text{termal}} - IV_{\text{médio}})}{(IV_{\text{médio}} + IV_{\text{termal}})} \right] \quad (21)$$

Índice de solo descoberto (BI) substitui o índice de vegetação, que não é confiável em situações onde a vegetação cobre menos da metade da área (RIKIMARU et al., 2002) Eq. 22.

$$BI = \left[\frac{(IV_{\text{termal}} + IV_{\text{próximo}}) - (IV_{\text{próximo}} + R)}{(IV_{\text{termal}} + IV_{\text{próximo}}) + (IV_{\text{médio}} + G)} \right] \quad (0 < BI < 200) \quad (22)$$

Para todos os resultados obtidos por meio de imagens de satélite valores foram coletados pixel a pixel para uma análise temporal das variáveis. O valor do pixel foi coletado na mesma coordenada geográfica a qual se encontravam as torres micrometeorológicas de monitoramento. Uma análise exploratória dos dados foi conduzida por meio de Boxplot e, em seguida, os dados dos índices foram confrontados com os dados *in situ* para análise das suas associações, por meio de uma análise de componentes principais (ACP) e, subsequente, identificação dos produtos de satélite que mais explicam as diferenças entre as áreas.

2.6 Análise exploratória dos dados

A análise exploratória do conjunto de dados *in situ* e de índices de satélite foi feita por meio de BoxPlot, seguindo a rotina sugerida por Ferreira et al. (2016). No BoxPlot foram calculados os valores mínimos ou 1º quartil “Q1”; medianas ou 2º quartil “Q2” e máximos ou 3º quartil “Q3”. Dessa forma, tem-se que o Q1 indica que 25% dos dados são iguais ou menores do que ele e o Q3 indica que 25% dos dados são iguais ou maiores do que ele. A diferença entre Q1 e Q3 é a amplitude do Boxplot, denominado Interquartile Range (IQR). Q2 concebe uma tendência central dos dados, indicando o ponto médio de distribuição. Fora da faixa dos limites inferior ($L_i = Q1 - 1,5AP$) e superior ($L_s = Q3 - 1,5AP$) do Boxplot ocorrem os *outliers*.

2.7 Associação entre os produtos de satélite e dados *in situ*

Para análise da associação entre os dados *in situ* e índices de satélite foi conduzida uma ACP. Os dados *in situ* foram compostos por dados micrometeorológicos: Rn_{In} e β . Os dados de solo foram: CE; pH; MO; Ca; P; K; Na; C; Mg; Fe; Cu; V e CTC (químicos); e,

CC; PM; Ds; ArT, Silt. e Arg. Já os dados dos índices de satélite foram: NDVI, α ; TGSI; IAF; NDSI e BI (físicos). A ACP foi utilizada para identificar as variáveis que mais explicam o RisDes_Index, logo, a ocorrência da desertificação. Na ACP é calculada a matriz de covariância (C) e os dados são auto escalonados. Os autovetores exibem os pesos para uma componente principal (CP) e os autovalores fornecem a quantidade de variância explicada pela sua respectiva PC, de modo que a $PC1 > PC2 > PC3$ e, assim, sucessivamente.

2.8 Proposição do modelo

Com base na análise exploratória dos dados e nos resultados de ACP, identificou-se as variáveis que exibiram maior peso. Posteriormente foram conduzidos procedimentos de trial-and-error para identificação das variáveis que, quando combinadas, mais caracterizavam as superfícies, em especial, a área desertificada. Essa verificação foi realizada com base nos dados dos pixels das torres para as datas das imagens nos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018. As variáveis identificadas foram dispostas em um modelo multiplicativo para geração do índice RisDes_Index. A estrutura do modelo que produziu melhores resultados foi do tipo:

$$\text{RisDes_Index} = \left[\frac{\frac{(R - B) + (R + B)}{(R + B + G)} X_1}{X_2} \right] \quad (23)$$

em que, X_1 e X_2 são as variáveis de satélite que combinadas mais explicam a dinâmica de áreas com risco de desertificação. Além de R (refletância da banda vermelha); B (refletância da banda azul) e G (refletância da banda verde)

2.9 Aplicação do RisDes_Index para um Núcleo de Desertificação (ND)

O RisDes_Index foi aplicado para o ND de Cabrobó, que está localizado no Sertão do São Francisco no estado de Pernambuco. Esse ND inclui seis municípios: Belém do São Francisco, Cabrobó, Carnaubeira da Penha, Itacuruba, Floresta e Orocó (Fig. 1). A região possui uma área de aproximadamente 9.123,047 km². Segundo Alvares et al. (2013), o clima do local é classificado como semiárido. O relevo do núcleo de desertificação de Cabrobó obtido por meio do modelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) possui altitudes de 301 a 907 m. No município de Carnaubeira da Penha apresenta as maiores altitudes e as regiões mais ao Sul do núcleo os menores valores.

2.10 Intercomparação entre métodos de avaliação do risco de desertificação

Os resultados do índice proposto RisDes_Index foi confrontado com o método DDI (Índice de Determinação da Desertificação) sugerido por Wei et al. (2018). Este método indica cinco níveis de desertificação: severa, alta, média, baixa e não desertificada. E pode ser descrito pela Eq. 24:

$$DDI = K \times NDVI \times \text{Albedo} \quad (24)$$

onde, K é determinado pela inclinação da linha reta ajustada no espaço de feições. As classes de classificação do risco de desertificação por Wei et al. (2018) são exibidas na Tab. 4.

Tabela 4. Critérios para avaliação da degradação, utilizando imagens Landsat-8 e os métodos de Wei et al. (2018), Pan e Li (2013) e Xu et al. (2009).

Wei et al. (2018)		DDI	
Desertificação severa		< -0,51	
Desertificação alta		-0,51 - 0,41	
Desertificação média		-0,41 a -0,30	
Desertificação baixa		-0,30 a -0,14	
Não desertificado		> - 0,14	
Pan e li. (2013)		I	
Não desertificado		15,64	
Desertificação leve		11,07	
Desertificação moderada		4,66	
Desertificação severa		-1,75	
Desertificação extremamente severa		-4,18	
Xu et al. (2009).		Índices	
	NDVI	MSDI	Albedo
Inexistente	< 0,25	-	< 0
	< 0,50	-	-
	< 0		
Baixo	< 0,25	-	> 0
Médio	0,32 < e < 0,40	> 3	0,175 < e < 0,19
	0,32 < e < 0,40	> 3	0,175 < e < 0,19
Alto	0,25 < e < 0,32	> 3	0,175 < e < 0,19
	0,25 < e < 0,32	> 3	0,175 < e < 0,19
Severo	< 0,25	-	> 0,22

Outro modelo confrontado com o *RisDes_Index* foi o método proposto por Pan e Li (2013), que caracteriza cinco diferentes níveis de desertificação: sem desertificação, desertificação leve, moderada, severa e extremamente severa. E pode ser descrito pela Eq. 25:

$$I = a \times IAF - \text{Albedo} \quad (25)$$

onde, $a = (0,225)$ é uma constante da equação determinada por meio de regressão linear entre albedo e vegetação presente na superfície Pan e Li (2013). Os critérios utilizados para avaliação do risco de desertificação são apresentados na Tab. 3.

O terceiro modelo confrontado com o *RisDes_Index* foi o método proposto por Xu et al. (2009), denominado Índice de Desvio Padrão Móvel (MDSI), que detecta as mudanças e a classificação por árvore de decisão baseadas em regras predefinidas no NDVI, albedo e MDSI. A classificação do risco de desertificação são apresentados na Tab. 3.

2.11. Avaliação da evolução do processo de desertificação no ND de Cabrobó

Para avaliar a evolução do processo de desertificação do ND de Cabrobó composto por seis municípios: Belém do São Francisco, Cabrobó, Carnaubeira da Penha, Floresta, Itacuruba e Orocó, aplicou-se o modelo o *RisDes_Index* e demais métodos testados nas imagens das datas 12/12/1991; 04/11/2001; 20/11/2009 e 29/10/2016 para observação da variação % dos avanços da desertificação no Núcleo de Desertificação de Cabrobó. Para estas datas foram calculados também as variáveis NDVI, IAF, SAVI, albedo, TGSI, Solo Nu e Salinidade. A partir de uma Análise de Componentes Principais (ACP) foram verificados a agrupamento dos resultados do modelo com os dados climáticos e dados socioeconômicos para o ND de Cabrobó. Os dados climáticos referentes a série 1981-1991, 1992-2001, 2002-2009 e 2010-2016 foram coletados nas plataformas digitais da Agência Pernambucana de Água e Clima e os dados econômicos para os censos de (1990, 2000, 2010 e dados apenas para o ano de 2016) foram extraídos da homepage do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (Tabela 3). Os dados climáticos foram compostos pela média anual da precipitação pluviométrica (P), evapotranspiração de referência (ET_o) (Allen et al., 1998) e balanço hídrico W ($W = P - ET_o$). Os dados socioeconômicos usados foram: efetivo animal (caprinos, ovinos mais bovinos), áreas plantadas e PIB (Produto interno bruto).

3 Resultados

3.1 Análise exploratória dos dados

Na Figura 5 são demonstrados os Boxplot das variáveis obtidas por meio de imagens de satélite e dados *in situ*. Observa-se que, os dados no *Interquartile Range* (IQR), ou seja, a altura da caixa, encontram-se 50% dos dados e corresponde ao 2º quartil (Q2). Acima (Q3) e abaixo (Q1) até o final da linha preta contínua, para cima (máximo) e para baixo (mínimo), equivalem a 25% cada. Fora dessa faixa ocorrem os *outliers* (“valores extremos”), para o limite de $1,5 \times \text{IQR}$.

Quando observado a Figura 10A, verifica-se os valores encontrados para a área DES encontra-se no (Q1), o limite (Q3) foi de 0,5771 e (Q1) 0,1176 a mediana para essa variável foi de 0,2491. Os valores observados nas Figuras 5D; 5E e 5F estão relacionados aos índices de vegetação e caracterizam a superfície DES, que apresenta os menores valores em relação as demais áreas, tendo seus valores concentrando-se no Q1 nos três índices calculados NDVI, IAF e SAVI, com mediana iguais a 0,27; 0,32 e 0,25, respectivamente. Os maiores valores para os três índices foram encontrados exclusivamente para as superfícies CANACP e CANASP onde tivemos (0,74; 3,77 e 0,32) e os menores foram verificados na superfície DES em que observou-se (0,11; 0,04 e 0,13).

Para os dados *in situ*, baixos valores de saldo de radiação foram verificados para a área em desertificação (Figura 5J). Observa-se que os valores para esse sítio atingiram valores entre 6,0 a 11,0 MJ m² dia⁻¹. Na área de CAA, os valores estão na faixa de 12,5 e 17,5 MJ m² dia⁻¹. Enquanto, nas superfícies CAC, CANACP e CANASP, distribuíram-se entre (9,0 e 15,0 MJ m² dia⁻¹). Na Figura 5L, observa-se uma distribuição mais homogênea dos dados referentes a LE, estando entre o IQR, exceto para as superfícies CAA, CANASP e CANACP, que possuem maiores variações. A distribuição dos dados da superfície DES assemelhou-se aos da CAC, tendo seus valores distribuídos abaixo de 5,0 MJ m² dia⁻¹. A mediana foi de 1,55 MJ m² dia⁻¹ e os valores máximo e mínimo de 16,30 e 0,0 MJ m² dia⁻¹, respectivamente.

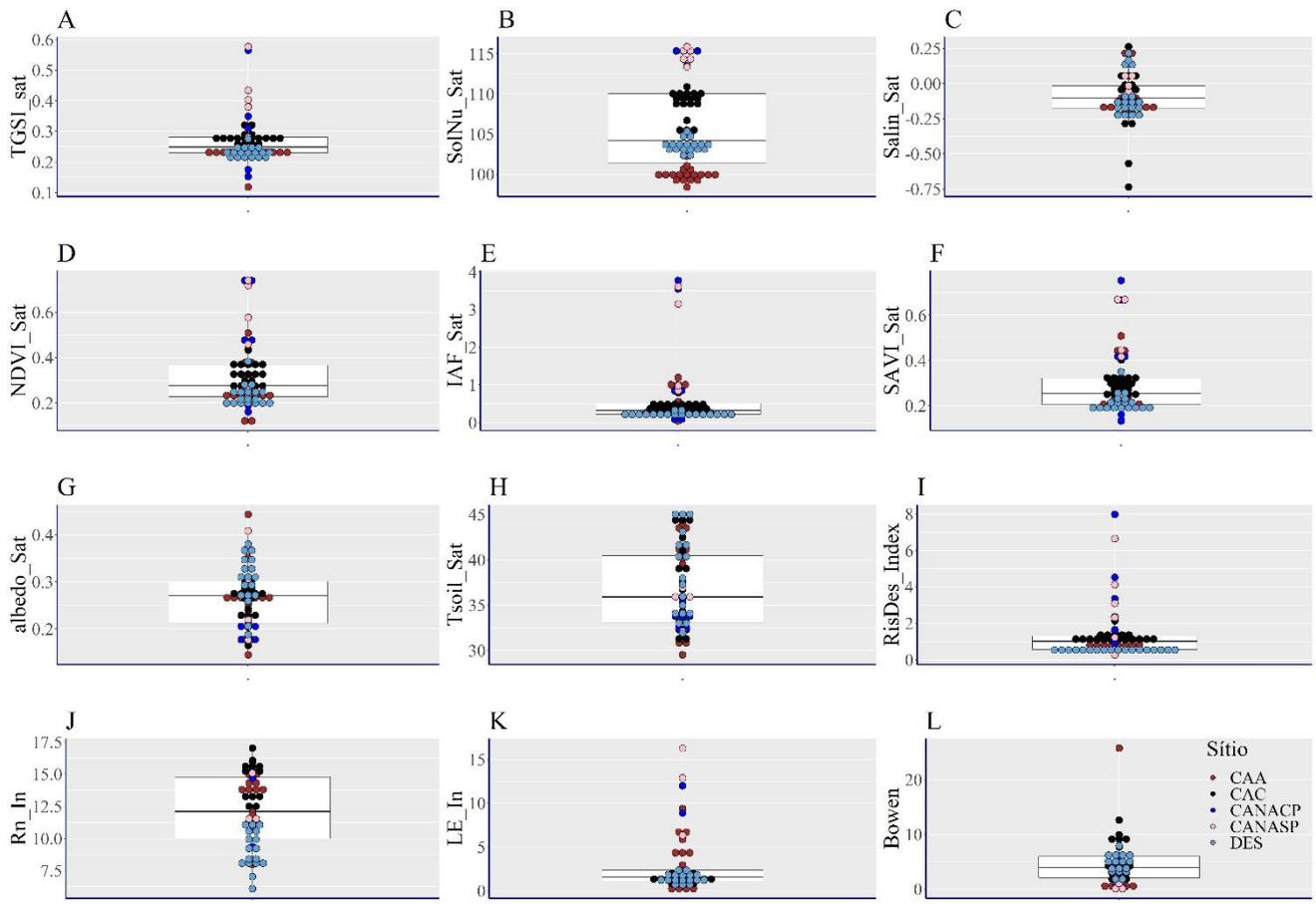


Figura 5. Boxplot das variáveis oriundas de imagens de satélite e dados *in situ* (SolNu_Sat - solo nu; Salin_Sat - salinidade do solo; NDVI_Sat - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; IAF_Sat - Índice de área foliar; SAVI_Sat - Índice de Vegetação Ajustado ao Solo; albedo_Sat - albedo da superfície; Tsoil_Sat - temperatura do solo; RisDes_Index – modelo proposto; Rn_In - saldo de radiação; LE_In - fluxo de calor latente do solo e Bowen – razão de Bowen) para as áreas de estudo (área desertificada - DES, área de plantas CAM - CAC, Caatinga - CAA, cana de açúcar irrigada e com palhada - CANACP e irrigada sem palhada - CANASP).

Na Figura 5I, verifica-se a dispersão dos valores do RisDes_Index, onde os valores na área DES exibiram mediana de 1,02, e os valores mínimos e máximos de 0,26 e 7,98, nessa ordem. Esses resultados são reflexo do maior percentual de solo exposto e o albedo da superfície mais elevado, como verificado nas Figuras 5C e 5G. O conjunto dessas informações fortalece a teoria de que o RisDes_Index exibe consistência para identificação de áreas com risco de desertificação. Na área CAC, os seus valores encontram-se em 100% dentro do Q2, já os sítios CANACP e CANASP mostraram as maiores magnitudes com relação as demais superfícies.

3.2 Associação entre dados orbitais e dados in situ

Por meio da ACP, duas componentes explicaram 84% da variabilidade dos dados, com a CP1 e CP2 respondendo por 63% e 21%, nessa ordem (Figuras 6A e 6B). Os círculos vermelhos, azuis e verdes, referem-se as variáveis com maior contribuição nos eixos das CP1, CP2 e CP3 (eixo não mostrado), respectivamente. Variáveis com mesma cor indicam alta correlação entre si, seja positiva ou negativa. As variáveis mais distantes do centro possuem maior contribuição no seu respectivo eixo.

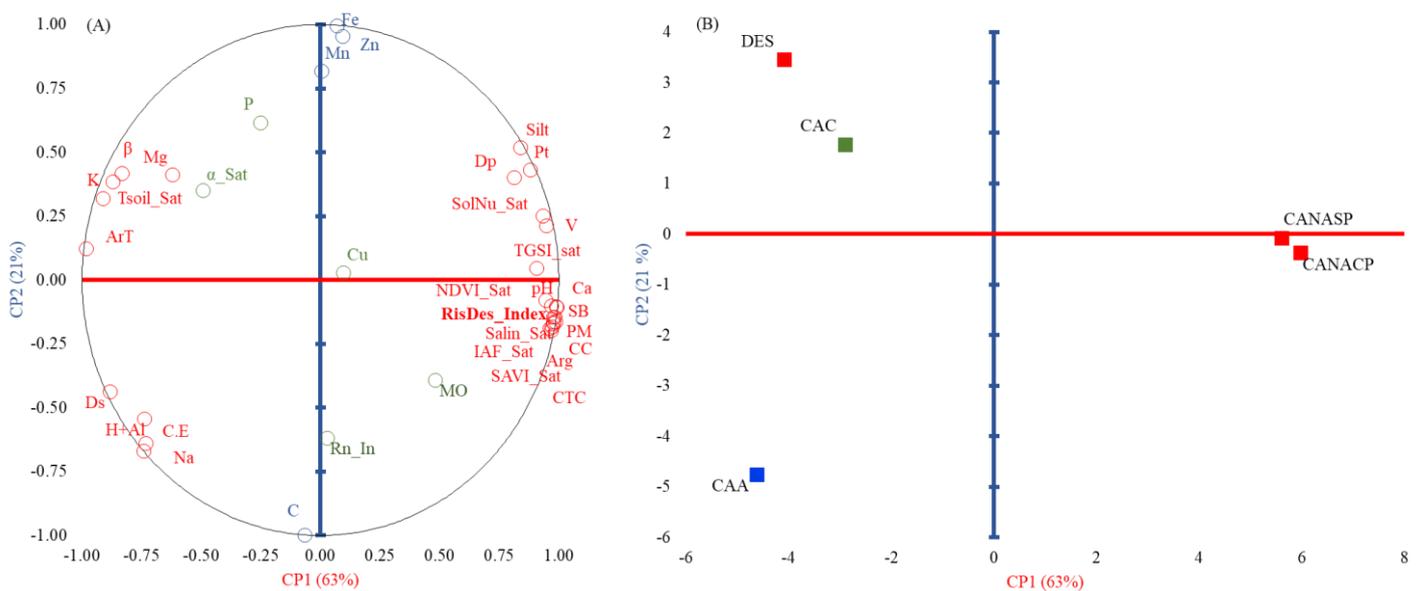


Figura 6. Análise multivariada de componentes principais para os dados *in situ* (Condutividade Elétrica - CE; pH; Cálcio - Ca; Matéria orgânica - MO; Fosforo - P; Potássio - K; Sódio - NA; Carbono - C; Magnésio - Mg; Saturação por Bases - SB; Capacidade de Troca de Cátions - CTC; Capacidade de Campo - CC; Cobre - Cu; Ferro - Fe; Ponto de Murcha - PM; Densidade do Solo - Ds; Silte e Areai; Tsoil - temperatura do solo; RisDes_Index - modelo proposto; Rn - saldo de radiação; LE - fluxo de calor latente do solo; β - razão de Bowen e ArT - temperatura do ar) e produtos orbitais (Índice de área foliar - IAF; Índice de Vegetação Ajustado ao Solo - SAVI; Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI; Albedo da superfície; Solo Nu - BI; O Índice de tamanho de grão do solo superficial - TGSI e Índice de Salinidade - NDSI)

Na Figura 6A, percebe-se que o RisDes_Index teve associação positiva com os índices de satélite NDVI, IAF, SAVI, TGSi e SolNu e negativo com a Tsoil, bem como com várias propriedades físicas (e.g. positivo - Arg., Silt.; negativo - ArT e Ds) e químicas do solo (e.g., positivo - pH, Ca, SB; negativo - K, Mg, Na). Na Figura 6B, observa-se que há correlação positiva entre as áreas CANASP e CANACP (áreas úmidas), mas negativa destas com a área DES. Combinando os resultados das Figuras 6A e 6B, percebe-se que a área DES teve correlação negativa com RisDes_Index e positiva com as variáveis β , Tsoil, K, Mg e ArT, ou seja, ambientes com maiores magnitudes dessas variáveis e menores de RisDes_Index exibem maiores risco de desertificação. A área de CAA teve associação positiva com C e negativa com Fe, Mn e Zn, e a área de palma com α , P, Cu, MO e Rn_In.

3.3 Modelo proposto para identificação de áreas em desertificação

Combinado as variáveis oriundas de imagens de satélite de 18 datas entre 2015 e 2018 aquelas que melhor representaram os sítios estudados a partir do RisDes_Index foram IAF e Albedo. Logo, o modelo proposto e suas respectivas variáveis são descritos na Eq. 26:

$$\text{RisDes_Index} = \left[\frac{\frac{(R - B) + (R + B)}{(R + B + G)} * \text{IAF}}{\alpha} \right] \quad (26)$$

onde: R - refletância da banda vermelha; B - refletância da banda azul; G - refletância da banda verde; IAF - índice de área foliar e α - albedo da superfície.

A variável refletância foi selecionada, pois representa bem as características do solo com relação a sua estrutura nas bandas vermelha, verde e azul (Xiao et al. 2006), a qual é um dado primário usado em vários índices (e.g. NDVI, SolNu). O IAF representa o nível de cobertura do solo e o albedo a capacidade de reflexão da superfície (PAN e LI, 2013).

Na Fig. 7, nota-se a magnitude dos valores do RisDes_Index para os cinco sítios. O RisDes_Index pouco varia em um ambiente com o avanço da desertificação. Verifica-se que para a área desertificada, os valores de RisDes_Index não ultrapassam 1,0, mesmo no período chuvoso (janeiro a maio). Entretanto, nos meses mais seco, os valores de RisDes_Index foram levemente menores quando comparado aos meses chuvosos. Logo, a faixa de 0,0 a 1,0 foi utilizada para caracterização de áreas com avanço do processo de desertificação, sendo que quanto menores o valor de RisDes_Index, maior a intensificação do processo, já que se há indicativo de redução acentuada de IAF e aumento do albedo. Então se definiu classes de avanço da desertificação como alto (até 0,33), médio (até 0,66) e baixo (até 1,0).

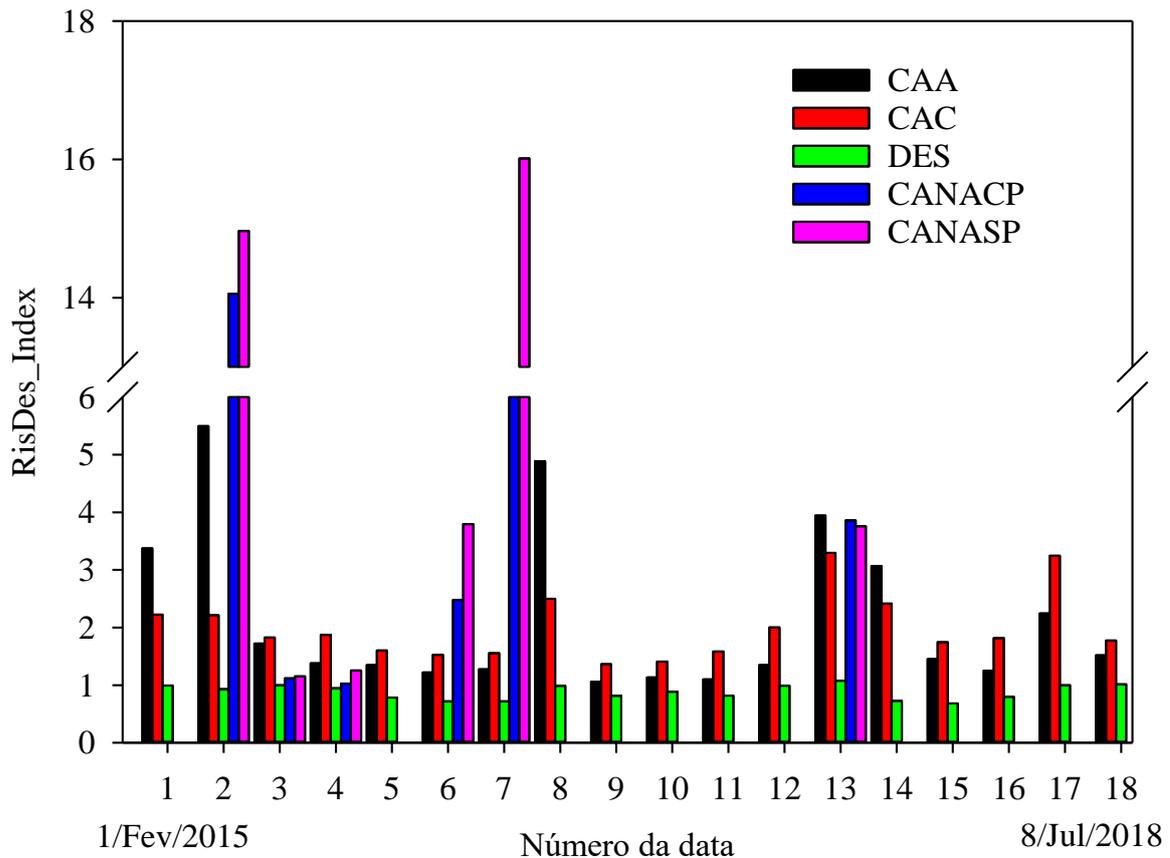


Figura 7. Variação dos valores do modelo RisDes_Index para a área desertificada - DES, de plantas CAM - CAC, áreas de caatinga - CAA, cana de açúcar irrigada e com palhada – CANACP, e cana de açúcar irrigada e sem palhada - CANASP) ao longo dos anos de 2015; 2016; 2017 e 2018.

Os valores encontrados para as áreas de Cactácea e Caatinga foram superiores a 1,0 em sua maioria ultrapassando 5,0 na área de Caatinga, em 15/04/2015 (Fig. 7). Para a área de Caatinga, os valores encontraram-se na faixa de 1,23 a 5,49, o que a depender da época do ano pode caracterizar uma área de Caatinga com maior ou menor cobertura vegetal. Logo, valores entre 1,0 a 3,0, aproximadamente, pode ser indicativo de Caatinga Rala e de 3,0 a 6,0 de Caatinga Densa. Na Caatinga rala, em função do baixo IAF, o risco de desertificação é mais eminente quando combinado aos fatores climáticos e sócio econômicos. Na área de cactácea, os valores foram superiores a 1,0 e inferior a 3,0 em sua maioria, com o maior encontrado em 03/06/2017. Percebe-se que os valores para a cactácea se confundem aos valores da Caatinga rala, assim, a mesma faixa pode ser usada para a identificação desse tipo de superfície.

Para as áreas irrigadas de cana de açúcar com e sem palhada acima do solo, os valores de RisDes_Index ultrapassam a magnitude de 6,0. Dessa forma foi criada a classe de áreas úmidas que enquadraram-se em valores acima de 6,0. É importante salientar devido a colheita da cana de açúcar entre as datas 24/08/2015 e 09/09/2015, os valores se aproximaram dos notados para a superfície em desertificação, uma vez que, o solo se encontra totalmente descoberto. Este resultado indica que, para julgamento do nível de desertificação em uma região é recomendado o uso de diferentes datas para análise da estabilidade dos dados. Uma avaliação exploratória dos dados garante a plena identificação das superfícies de interesse.

Na Tab. 4 são apresentadas as faixas dos valores de RisDes_Index para identificação do risco de desertificação.

Tabela 5. Classes dos valores de RisDes_Index para áreas Desertificadas, Vegetação Seca Caatinga rala / Cactáceas e densa, e Áreas Úmidas.

Intervalos	Classes	Desertificação
$0,0 < \text{RisDes_Index} \leq 0,33$	Nível alto de desertificação	
$0,33 < \text{RisDes_Index} \leq 0,66$	Nível médio de desertificação	
$0,66 < \text{RisDes_Index} \leq 1,0$	Nível baixo de desertificação	
$1,0 < \text{RisDes_Index} \leq 3,0$	Caatinga Rala / Cactáceas (com risco de desertificação)	
$3,0 < \text{RisDes_Index} \leq 6,0$	Caatinga Densa (Sem risco)	
$\text{RisDes_Index} > 6,0$	Área Úmidas (Sem risco)	

3.4 Intercomparação entre RisDes_Index e os outros métodos com produtos satélite

Quando se comparou os resultados do RisDes_Index com o modelo de Wei et al. (2018), verificou-se que ao longo das datas (12/12/1991, 04/11/2001, 20/11/2009 e 29/10/2016) ocorreu incremento de áreas desertificadas, sendo de 6% a partir do RisDes_Index e de 8% a partir do método de Wei et al. (2018) (Tab. 5). As maiores diferenças entre os dois métodos foram verificadas para as classes de Caatinga Rala. Para as áreas úmidas, os valores se mantiveram estáveis ao longo do período de estudo. Com os dois modelos, as maiores magnitudes dos índices foram verificados para a imagem da data 29/10/2016.

Tabela 6. Intercomparação entre os modelos RisDes_Index; Wei et al. (2018); Xu et al. (2009) e Pan e Li. (2013) expressa em % de áreas desertificadas (AD), caatinga rala (CR), caatinga densa (CD) e áreas úmidas (AU).

Ano	RisDes_Index				Wei et al. (2018)			
	AD	CR	CD	AU	AD	CR	CD	AU
1990	37	40	22	01	32	38	28	02
2001	35	39	24	02	33	39	26	02
2009	37	32	29	02	35	34	29	02
2016	43	28	28	01	40	39	20	01
Ano	Xu et al. (2009)				Pan e Li. (2013)			
	AD	CR	CD	AU	AD	CR	CD	AU
1990	34	36	30	00	28	40	32	00
2001	33	37	28	02	31	39	28	02
2009	39	32	27	02	30	39	29	02
2016	40	35	25	00	36	39	25	00

O modelo proposto por Xu et al. (2009) apresentou resultados bem semelhantes ao RisDes_Index e ao método de Wei et al. (2018), mas com maior % de área com risco de desertificação obtido com o RisDes_Index. O modelo Pan e Li. (2013) foi o que mostrou maior disparidade em relação ao RisDes_Index.

3.5 Avaliação da evolução do processo de desertificação no ND de Cabrobó

3.5.1 Análise espaço-temporal de indicadores de vegetação

Com a análise espaço-temporal realizada para as datas de 12/12/1991, 04/11/2001, 20/11/2009 e 29/10/2016, buscou-se verificar a variação dos índices de vegetação e albedo no ND de Cabrobó. O conhecimento dessa informação permite julgar a intensidade do processo de desertificação nessa área. Quando se observa os mapas de albedo (Fig. 8A), nota-se um aumento nos valores entre as datas 12/12/1991 e 29/10/2016. Valores de albedo que se encontravam na faixa de 0,2 a 0,3 aumentaram 40%. Na faixa entre 0,1 e 0,2 reduziram 5% ao longo do período de estudo, indicando acréscimo das áreas de solo com pouca ou nenhuma vegetação, como pode ser verificado em alguns trabalhos realizados para a região semiárida do Brasil (GOMES et al., 2013; SILVA et al., 2010), o que pode contribuir para o avanço do processo de desertificação.

Quando se analisou os mapas de IAF (Fig. 8), observou-se uma variação entre 0,0e 0,9 m² m⁻², mas uma diminuição considerável na cobertura vegetal da região, principalmente para os municípios de Floresta, Itacuruba e Belém do São Francisco. Para as datas observadas cerca de 70% da área o IAF, encontra-se na faixa entre 0,5 e 0,1, mostrando pouca cobertura vegetal para o núcleo de desertificação de Cabrobó.

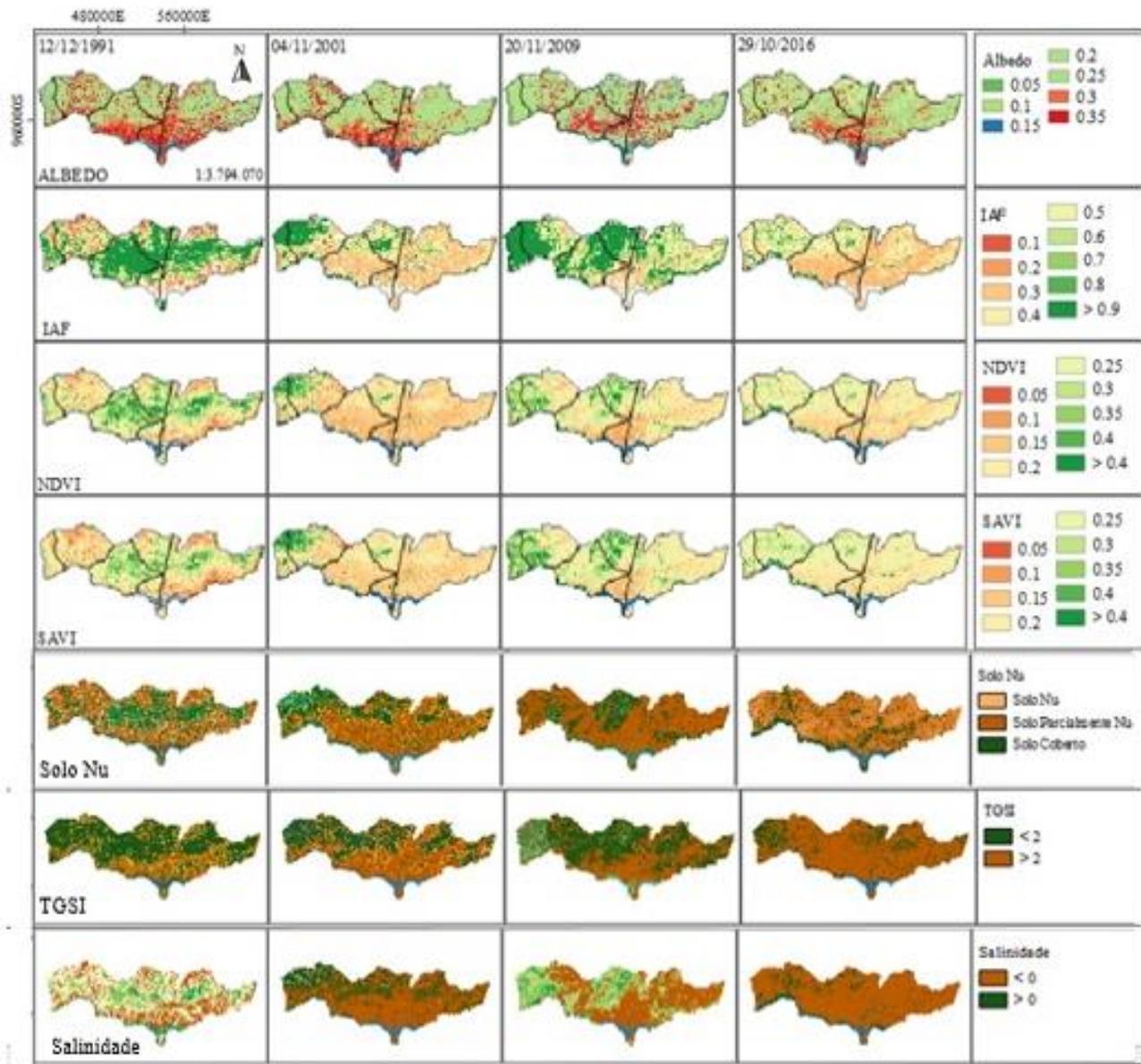


Figura 8. Análise espaço temporal dos índices de vegetação para o núcleo de desertificação de Cabrobó, estado de Pernambuco Brasil (Índice de área foliar - IAF; Índice de Vegetação Ajustado ao Solo - SAVI; Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI e Albedo da superfície) para as datas (12/12/1991, 04/11/2001, 20/11/2009 e 29/10/2016).

Os maiores valores são encontrados nas áreas de cultivo agrícola e de caatinga mais densa, que correspondem a 9% da área de estudo. Para os valores de SAVI foram encontradas magnitudes entre 0,05 e 0,9.

Pelos mapas da Fig. 8, nota-se uma redução nos valores com o passar dos anos, exceto para o ano de 2009, que teve para essa data valores que chegaram a 0,6 em cerca de 80% da área. Esses resultados podem estar associados ao volume precipitado que foi superior aos demais. A precipitação é um dos fatores que mais interfere nesse tipo de análise no bioma caatinga (LEITE et al., 2019). Na Tab. 3, verifica-se os valores de precipitação para o período de estudo. Os anos de 2001 e 2009 foram os que mais choveram na região, entre os anos das datas avaliadas (1991, 2001, 2009 e 2016). Em 2009, os municípios de Cabrobó, Orocó e Belém do São Francisco foram os mais chuvosos. Para a região foi verificado um volume precipitado de 159,1 mm (Tab. 2). Esses volumes influenciam nas variáveis IAF, NDVI, SAVI e albedo. Levar em consideração o volume precipitado é muito importante quando a intenção é verificar a variabilidade da vegetação caatinga, uma vez que a resposta dessa vegetação a presença de água é muito dinâmica.

Os valores de NDVI, assim como IAF e SAVI, exibiram decréscimo para a região de estudo e, conseqüentemente aumento do albedo. Os maiores valores encontrados foram vistos na data 12/12/1991 com cerca de 70% da área apresentando valores entre 0,3 e 0,9. Por outro lado, para a data 29/10/2016, 67% da área apresentou valores de NDVI nas faixas 0,1 e 0,2. Já os índices Solo Nu, TGSI e Salinidade apresentaram tendências de crescimento, sendo o índice de solo nu o que apresentou os maiores valores, com incrementos atingindo 15%, entre os anos de 1991 e 2016. O TGSI, que identifica a quantidade de areia fina na superfície do solo, mostrou evolução de 13%, com as suas maiores magnitudes no ano de 2016.

3.5.2 Análise espaço-temporal da desertificação a partir do RisDes_Index

Com base na aplicação do modelo nas datas (12/12/1991, 04/11/2001, 20/11/2009 e 29/10/2016), identificou-se mudanças no padrão da superfície para o NF de Cabrobó (Fig. 9). Os resultados mostram que as áreas desertificadas de 38%, em 12/12/1991, evoluindo para 51% em 2016, o que corresponde a uma área de 1.185,99 km². Uma diminuição das áreas de caatinga foi identificada na ordem de 20% ao longo desse período.

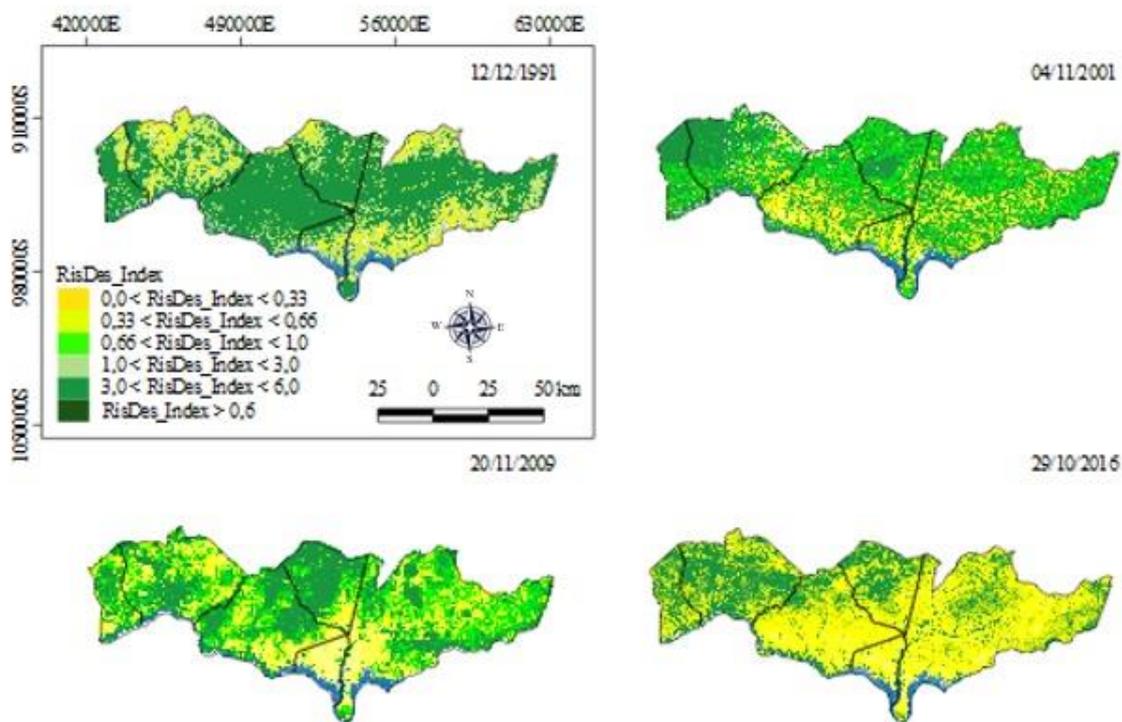


Figura 9. Análise espaço temporal do modelo RisDes_Index e para índices de satélite para o núcleo de desertificação de Cabrobó, estado de Pernambuco, Brasil (Solo Nu - BI; O Índice de tamanho de grão do solo superficial - TGSI e Índice de Salinidade - NDSI) nas respectivas datas (12/12/1991, 04/11/2001, 20/11/2009 e 29/10/2016).

3.6 Associação entre avanço da desertificação, clima e dados socioeconômicos

Com base na ACP, observou-se que duas componentes foram suficientes para explicar 83% da variabilidade dos dados. A CP1 e CP2 responderam por 60% e 23%, nessa ordem (Fig. 10). Os círculos vermelhos, azuis e verdes, referem-se as variáveis com maior contribuição nos eixos das CP1, CP2 e CP3. Variáveis com mesma cor indicam alta correlação entre si, seja positiva ou negativa. As variáveis mais distantes do centro possuem maior contribuição no seu respectivo eixo. No ano de 1990, percebe-se correlação positiva entre as variáveis Prec. e W, indicando que na época as magnitudes de precipitação pluviométrica e disponibilidade hídrica foram maiores, que as áreas de Caatinga eram maiores. Por outro lado, em 2016, verificou-se correlação positiva entre PIB, ÁreasDesert e Efet.Animal, e negativa com ÁreasCAA, Prec. e W, revelando que o aumento das áreas em desertificação, entre 1991 e 2016, foi provocado de fato por fatores climáticos, socio econômicos e pela diminuição da área com Caatinga.

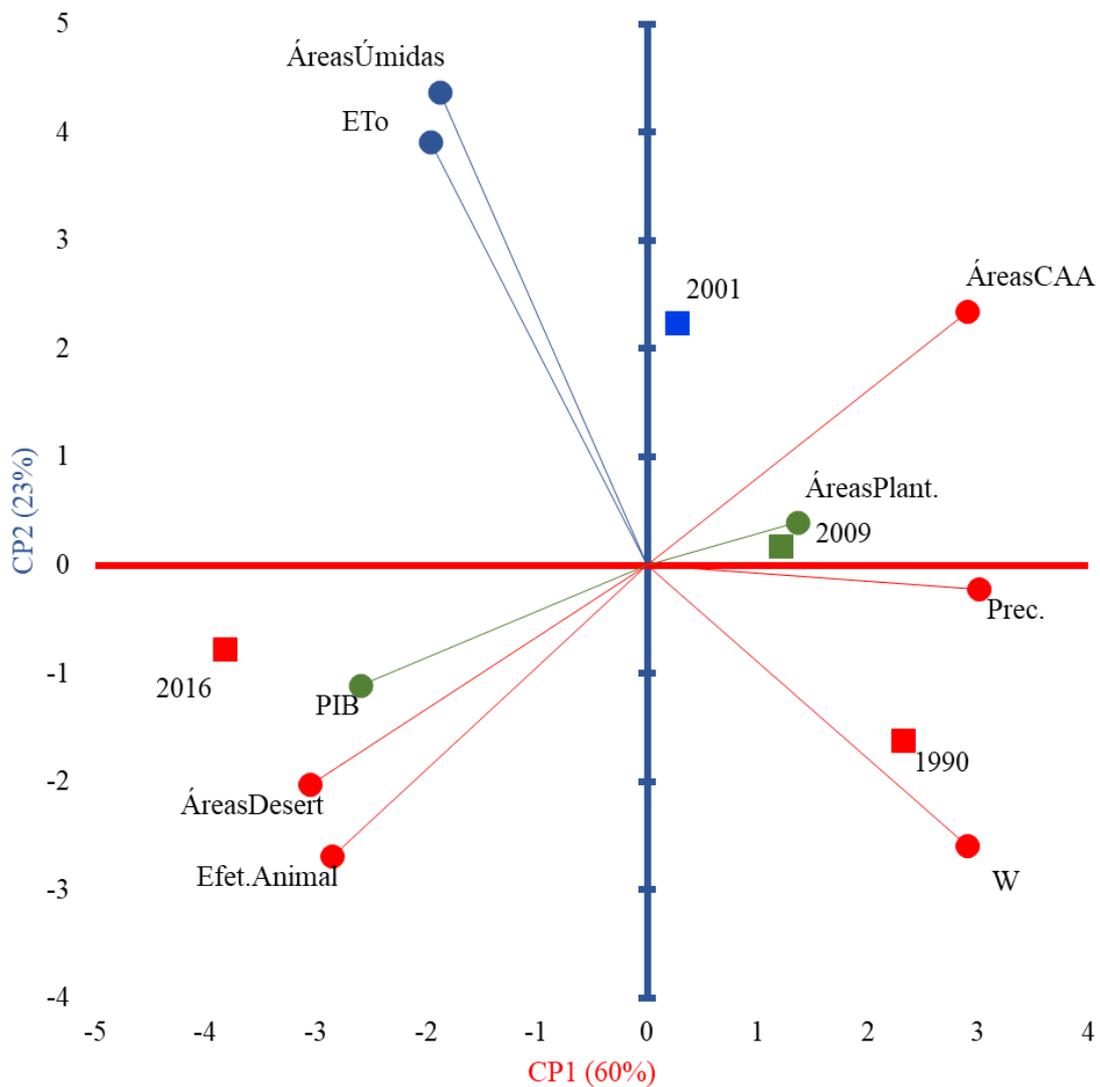


Figura 10. Análise multivariada de componentes principais das variáveis ambientais (P - precipitação) e socioeconômicas (ÁreaDesert - área desertificada; Efet. Animal - efetivo animal; PIB - produto interno bruto; ÁreasCAA - áreas de caatinga; ÁreasÚmidas - áreas úmidas; ÁreasPlant. - áreas plantadas e W - balanço hídrico) do Núcleo de Desertificação de Cabrobó, estado de Pernambuco, Brasil.

Todavia, com base nas contribuições desses fatores na CP1, a ordem de importância, pode ser escalonada de forma decrescente da seguinte maneira: redução da Prec., das ÁreasCAA, da disponibilidade hídrica (W) e, aumento do Efet.Animal.

4 Discussão

Na nossa pesquisa, verificou-se que na área em desertificação estudada houve uma forte associação de variáveis micrometeorológicas (e.g. razão de Bowen – β) e temperatura da superfície do solo (Tsoil_Sat) com propriedades físicas (e.g. areia total) e químicas (e.g.

pH) e cobertura vegetal, indicando que ambientes com solos arenosos, ácidos, mais descobertos e com altos valores de β e de temperatura do solo possuem maior predisposição à desertificação. No ND de Cabrobó, a redução das áreas de Caatinga (Silva; Silva et al., 2017) e o aumento do albedo da superfície são dois indicativos do aumento da degradação, que estão estritamente associadas ao processo de desertificação (Jiang et al., 2019; Joseph et al., 2018).

A proposição do *RisDes_Index* foi realizada com base nas variáveis refletâncias das bandas (R, B e G), albedo e IAF do satélite *Landsat 5* e *8*. As refletâncias das bandas fornecem informação relativa à radiação solar incidente sobre a superfície (Xu et al., 2009). Já o albedo corresponde a capacidade de reflexão de energia incidente, onde aquelas que apresentam pouca ou quase nenhuma vegetação o seu valor tende a ser elevado. O IAF responde a presença de vegetação na superfície, distinguindo a cobertura vegetal com a variação ao longo do tempo. O albedo é muito utilizado para identificação de áreas desertificadas (Leite et al., 2019). Segundo Ma et al. (2011), valores altos de albedo caracterizam um grau de severidade maior no processo de desertificação. Essa mesma tendência também foi verificada por outros autores (Leite et al., 2019; Briassoulis, 2019; Wang et al., 2020).

A proposição do *RisDes_Index* amplia a sua aplicação para diferentes regiões de estudo, pois considera variáveis biofísicas que tem associação com dados de superfície independentes (e.g. micrometeorológicos, vegetação e, física e química do solo). Por causa da concepção do *RisDes_Index*, o mesmo surge como ótima opção para julgamento das áreas em processo de desertificação. Estudos dessa natureza vem sendo elaborados em várias regiões do mundo com metodologias que por vezes se limitam às avaliações locais (Wei et al., 2018; Xu et al., 2009; Lamchin et al., 2017; Xiao et al., 2006), necessitando de calibrações.

A aplicação do *RisDes_Index* no ND de Cabrobó confirmou o avanço do processo de desertificação nessa região. A correlação inversa entre os anos de 1991 e 2016 mostrou que o processo tem sido sempre ascendente. Além disso, as mudanças climáticas por meio da redução dos níveis pluviométricos e, logo, aumento do déficit hídrico, e o desmatamento para o aumento das áreas com criação de rebanhos foram os fatores que promoveram ao acréscimo das áreas desertificadas (VASCONCELOS SOBRINHO, 1978; PRĂVĂLIE et al., 2020; KARAVITIS et al., 2020; OIKONOMOU et al., 2019). Porém, esses autores relatam que o mau uso dos recursos naturais também desencadeiam esse processo em vários

locais do mundo, sobretudo, em ambientes mais secos. Leite et al. (2019), em estudo realizado em outro ND do Semiárido brasileiro, também verificaram aumento no tamanho das áreas degradadas, quando utilizando o albedo e o NDVI como critérios de classificação.

A variação dos valores de RisDes_Index foi concomitante ao verificado nos índices de solo (TGSI, Solo Nu e Salinidade). O índice TGSI que está relacionado a áreas desertificadas, segundo Xiao et al. (2006), reflete as características das partículas da superfície do solo, de tal modo quanto menores seus valores mais finos é o grão de areia da superfície, logo, mais severa é a degradação ou desertificação. O aumento da desertificação demonstrado pelo RisDes_Index também foi em consonância com redução dos valores dos índices de vegetação nas datas estudadas (12/12/1991, 04/11/2001, 20/11/2009 e 29/10/2016) e com a cobertura vegetal (IAF) reduzida. Segundo Wei et al. (2018), em estudo realizado na Mongólia, verificaram que 81% da sua área de estudo, que possuía indícios de desertificação, era coberta por baixos índices de vegetação. Essa característica contribui diretamente na exposição dos solos e, por conseguinte, na ação dos intemperes climáticos que favorecem a ocorrência do processo de desertificação.

5 Conclusões

Neste estudo, tinha-se a indagação de que a proposição de um método de identificação da ocorrência de desertificação, que possuía associação com dados *in situ*, trazia resultados mais assertivos para o julgamento da contribuição dos fatores climáticos, sociais e econômicos no avanço desse processo. Para concepção de nossos resultados, utilizou-se como base um núcleo de desertificação (ND), ND de Cabrobó, bastante conhecido do Sertão Central do Brasil, uma das regiões secas mais importantes do mundo devido ao quantitativo populacional, a presença de uma vegetação endêmica, a Caatinga, e que possui cultivos irrigados. O RisDes_Index proposto foi capaz de identificar áreas com processos de desertificação, que ocorrem, sobretudo, em áreas com solos arenosos, ácidos, mais descobertos e com altos valores de β (razão de Bowen) e de temperatura do solo. A proposição do RisDes_Index foi realizada com base nas variáveis refletâncias das bandas (R, B e G), albedo e IAF do satélite *Landsat 5* e *8*; com a tendência de seus resultados sendo similar a dos métodos de Wei et al. (2018), Pan e Li (2013) e Xu et al. (2009), mas com as vantagens de identificar as áreas com desertificação, avaliar o risco, estratificar para outros tipos de superfície, e possuir a sua base fundamentada em associações com dados micrometeorológicos, de propriedades físico químicas do solo e de cobertura vegetal. A

aplicação do RisDes_Index confirmou o avanço do processo de desertificação no ND de Cabrobó, como consequência da redução dos níveis pluviométricos e, logo, aumento do déficit hídrico, e o desmatamento para o aumento das áreas com criação de rebanhos. Sugere-se a aplicação do RisDes_Index em várias regiões do mundo com o propósito de direcionar ações de políticas públicas de enfrentamento ao avanço do processo de desertificação.

Referências

- ACCIOLY, L. J. et al. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/Landsat. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 6, n. 3, p. 492-498, 2002.
- ALLEN, R. G., TREZZA, R.; TASUMI M. Surface energy balance algorithms for land. Advance training and Users Manual, **Idaho Implementation**, v. 1.0, p. 98, 2002.
- ARAÚJO, J. A.; DE SOUZA, R. F. Abordagens sobre o processo de desertificação: uma revisão das evidências no Rio Grande do Norte. **Geosul**, v. 32, n. 65, p. 122-143, 2017.
- AKBARI, M.; OWNEGH, M.; ASGARI, H. R.; SADODDIN, A.; KHOSRAV, H. Desertification risk assessment and management program. **Global Journal of Environmental Science and Management**, v. 2, n. 4, p. 365–380, 2016.
- AKBARI, M.; SHALAMZARI, M. J.; MEMARIAN, H.; GHOLAMI, A. Monitoring desertification processes using ecological indicators and providing management programs in arid regions of Iran. **Ecological Indicators**, v. 111, n. October 2019, p. 106011, 2020.
- ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation: **ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Report**, ASCE, 2005.
- BASTIAANSEN, W. G. M. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998.
- BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEN, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. *Remote Sensing of Environment*, v.79, n.2, p.329-343, 2002.
- BRIASSOULIS, H. Combating land degradation and desertification: The land-use planning quandary. **Land**, v. 8, n. 2, p. 1–26, 2019.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATEGICOS. Desertificação, degradação da terra e seca no Brasil, Brasília - DF, o. 252, 2016.

- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, v.113, n.5, p.893-903, 2009.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat 5 - TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, v.41, n.11, p.2674-2677, 2003.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Banco de dados climáticos do Brasil Disponível em: (<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/resultados/balanco.php?UF=&COD=141>)
- FERREIRA, T. R.; DI PACE, T. F.; SILVA, B. B.; DELGADO, J. R. Identification of desertification-sensitive areas in the Brazilian northeast through vegetation indices. ***Engenharia Agrícola***, v. 37, n. 6, p. 1190–1202, 2017.
- GARCIA, A. D. M.; DE ARAUJO FILHO, J. C.; da SILVA, H. P.; CARVALHO, R. D. O. Estudo espaço temporal de áreas susceptíveis à desertificação do Semiárido brasileiro. ***Embrapa Solos-Artigo em periódico indexado (ALICE)***, 2019.
- HUETE, A. R. A. Soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v.25, n.3, p.295-309, 1988.
- IQBAL, M. An introduction to solar radiation. London: Academic Press., 1983, 390p.
- JAYALAKSHMY, M. S.; PHILIP, J. Thermophysical properties of plant leaves and their influence on the environment temperature. ***International journal of Thermophysics***, v. 31, n. 11, p. 2295-2304, 2010.
- JIANG, M.; LIN, Y. Desertification in the south Junggar Basin, 2000–2009: Part II. Model development and trend analysis. ***Advances in Space Research***, v. 62, n. 1, p. 16–29, 2018.
- JOSEPH, O.; GBENGA, A. E.; LANGYIT, D. G. Desertification risk analysis and assessment in Northern Nigeria. ***Remote Sensing Applications: Society and Environment***, v. 11, n. April, p. 70–82, 2018.
- KARAVITISA, C. A.; TSESMELISA, D. E.; OIKONOMOUB, P. D.; KAIRISA, O.; CONSTANTINOS KOSMASA, C.; FASSOULIA, R. C.; HESSELD, R.; JETTENE, V.; MOUSTAKASA, N.; TODOROVICA, B.; SKONDRASA, N. A.; VASILAKOUA, C. G.; ALEXANDRISA, S.; KOLOKYTHAF, E.; STAMATAKOSA, D. V.; STRICEVICG, R.; CHATZIGEORGIADISH, E.; BRANDTI, J.; NICKY GEESONI, N.; GIOVANNI QUARANTA, G. A desertification risk assessment decision support tool (DRAST). ***Catena***, v. 187, n. June 2019, p. 104413, 2020.

KOSMAS, C.; FERRARA, A.; BRIASOULI, H.; IMESON, A. **The MEDALUS project:** Mediterranean desertification and land use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification European commission. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1999. 94p. Project ENV4 CT 95 0119 (EUR 18882).

LAMCHIN, M., LEE, W. K., JEON, S. W., LEE, J. Y., SONG, C., PIAO, D., ... & NAVAANDORJ, I. Correlation between desertification and environmental variables using remote sensing techniques in Hognu Khaan, Mongolia. **Sustainability**, v. 9, n. 4, p. 581, 2017.

LOPES, L. S. O.; SANTOS, R. W. P.; MIGUEL FILHO, M. A. M. Núcleo De Desertificação De Gilbués (Pi): Causas E Intervenções. **Geografia**, v. 20, p. 53–66, 2011.

NOLÊTO, T. M. S. D. J. Suscetibilidade Geoambiental Das Terras Secas Da Microrregião De Sobral Ce a Desertificação. p. 144, 2005.

OIKONOMOU, P. D.; TSESMELIS, E. D.; WASKOM, M. R.; GRIGG, N. S.; KARAVÍTIS, C. A. Enhancing the standardized drought vulnerability index by integrating spatiotemporal information from satellite and in situ data. **Journal of Hydrology**, v. 569, n. November 2018, p. 265–277, 2019.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; MOURA, A. E. S. S. Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.30, n.1, p.16-28, 2015.

PAN, J; LI, T. Extracting desertification from Landsat TM imagery based on spectral mixture analysis and Albedo-Vegetation feature space. **Natural hazards**, v. 68, n. 2, p. 915-927, 2013.

PEREZ-MARIN, A. M.; CAVALCANTE, A. M. B.; MEDEIROS, S. S.; TINÔCO, L. B. M.; SALCEDO, I. H. Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro : ocorrência natural ou antrópica ? **Parcerias Estratégicas**, v. 17, n. 34, p. 87–106, 2012.

RIKIMARU, A.; ROY, P. S.; MIYATAKE, S. Tropical forest cover density mapping. **Tropical ecology**, v. 43, n. 1, p. 39-47, 2002.

PRĂVĂLIE, R.; PATRICHE, C.; SĂVULESCUA, I.; SÎRODOEVC, I.; BANDOCA, G.; SFÎCĂ, L. Spatial assessment of land sensitivity to degradation across Romania. A quantitative approach based on the modified MEDALUS methodology. **Catena**, v. 187, n. December 2019, p. 104407, 2020.

- RIKIMARU, A.; ROY, P. S.; MIYATAKE, S. Tropical forest cover density mapping. **Tropical ecology**, v. 43, n. 1, p. 39-47, 2002.
- SALVATI, L.; ZITTI, M.; PERINI, L. Fifty Years on: Long-term Patterns of Land Sensitivity to Desertification in Italy. **Land Degradation and Development**, v. 27, n. 2, p. 97–107, 2016.
- SALVATI, L. BAJOCCHO, S.; CECCARELLI, T.; ZITTI, M.; PERINI, L. Towards a process-based evaluation of land vulnerability to soil degradation in Italy. **Ecological Indicators**, v. 11, n. 5, p. 1216–1227, 2011.
- SILVA, J. N. B.; SILVA, J. L. B.; SANTOS, A. M.; SILVA, A. C.; GALVÍNCIO, J. D. Índice de Vegetação Como Subsídio Na Identificação de Áreas Com Potenciais a Desertificação. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 2, n. 4, p. 358, 15 ago. 2017. ISSN 2525-815X. DOI: 10.24221/jeap.2.4.2017.1469.358-367.
- SILVA, A. K. DE O.; SILVA, H. P. DE B. 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.
- SILVA, H. P. DA; RIBEIRO, M. R.; MELO, I. C. DE L. G. H. D. BEZERRA DA S. A. L. DE. Utilização de técnicas de sensoriamento remoto na identificação de áreas sob risco de desertificação no estado de Pernambuco. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, n. 1, p. 9144–9151, 2011a.
- SILVA, I. A. S.; SILVA, J. C. B.; SILVA, K. A.; BARROS, J. R. Estudo da Desertificação em Gilbués-Piauí: Caracterização Física, Variabilidade Climática e Impactos Ambientais. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 28, n. 3, p. 172–187, 2011b.
- DA SILVA, T. G.; DE MOURA, M. S.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; DE SOUZA, L. S.; BRANDÃO, E. O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 139-147, 2011c.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.
- SOARES, D. B.; NÓBREGA, R. S.; MOTA FILHO, F. D. O. Sobre o Processo de Desertificação (About the Desertification Process). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 4, n. 1, p. 174, 5 set. 2011. ISSN 1984-2295. DOI: 10.26848/rbgf.v4i1.232699.

SOUSA LEITE, A. C., BEZERRA, U. A., & DE OLIVEIRA, L. M. M. Comportamento do Albedo e NDVI no Núcleo de Desertificação de Gilbués–Piauí (Brasil), usando imagens do satélite Landsat. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 7, n. 2, 2019.

SOUZA, J. A. DE A. R. F. DE S. ABORDAGENS SOBRE O PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO: UMA REVISÃO DAS EVIDÊNCIAS NO RIO GRANDE DO NORTE. **Geosul**, v. 32, n. 65, p. 122–143, 2016.

STARKS, P. J. et al. Estimation of shortwave hemispherical reflectance albedo from bi-directionally reflected radiance data. **Remote Sensing of Environment**, v. 38, n. 2, p. 123–134, 1991.

SUN, G.; NOORMETS, A.; GAVAZZI, M.J.; MCNULTY, S. G.; CHEN, J.; DOMEK, J. C.; KING, J. S.; AMATYA, D.M.; SKAGGS, R.W. Energy and water balance of two contrasting loblolly pine plantations on the lower coastal plain of North Carolina, USA. *For. Ecol. Manage.* 259, 1299–1310. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.09.016>. 2010.

TSESMELIS, D. E., KARAVITIS, C. A., OIKONOMOU, P. D., ALEXANDRIS, S., & KOSMAS, C. Assessment of the vulnerability to drought and desertification characteristics using the standardized drought vulnerability index (SDVI) and the environmentally sensitive areas index (ESAI). **Resources**, v. 8, n. 1, p. 6, 2019.

UNEP - United Nations Environment Programme. **Status of desertification and implementation of the United Nations Plan of Action to Combat Desertification**. Nairóbi: UNEP, 1991.

VALLES, G. F.; CREPANI, E.; OLIVEIRA, S. B. P.; SOUZA, M. S. B.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, n. 1, p. 347–360, 18 mar. 2015.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Processos de desertificação no Nordeste do Brasil: sua gênese e sua contenção**. Recife: Sudene, 1982.

VERÓN, S. R. BLANCO, L. J.; TEXEIRA, M. A.; IRISSARI, G. N.; PARUELO, J. M. Desertification and ecosystem services supply: The case of the Arid Chaco of South America. **Journal of Arid Environments**, v. 159, n. October 2017, p. 66–74, 2018.

VERSTRAETE, M. M. Defining desertification: A review. **Climatic Change**, v. 9, n. 1–2, p. 5–18, 1986.

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSON, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P. M. A.; VALLES, G. F.; CREPANI, E.; OLIVEIRA, S. B. P.; SOUZA, M. S. B.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA,

M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, n. 1, p. 347–360, 18 mar. 2015.

XIAO, J.; TATEISHI, R.; BAYAER, W. Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 12, p. 2411–2422, 2006.

XUE, J.; GUI, D.; LEI, J.; SUM, H.; ZENG, F.; MAO, D.; JIM, Q.; LIU, Y. Oasisification: An unable evasive process in fighting against desertification for the sustainable development of arid and semiarid regions of China. **Catena**, v. 179, n. February 2018, p. 197–209, 2019.

XU, D.; KANG, X.; QIU, D.; ZHUANG, D. Quantitative assessment of desertification using Landsat data on a regional scale – a case study in the Ordos Plateau, China. **Sensors**, n.9, p.1738-1753, 2009.

WANG, J., DING, J., YU, D., TENG, D., HE, B., CHEN, X., ... E SU, F. Detecção de salinidade do solo baseada em aprendizado de máquina em uma região árida do deserto, Noroeste da China: uma comparação entre Landsat-8 OLI e Sentinel-2 MSI. **Ciência do Meio Ambiente Total** , v. 707, p. 136092, 2020.