



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.09.04.35-TDI

**SUSCEPTIBILIDADE À
DEGRADAÇÃO/DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO: TENDÊNCIAS ATUAIS E CENÁRIOS
DECORRENTES DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO
USO DA TERRA**

Rita Marcia da Silva Pinto Vieira

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Javier Tomasella, e Regina Célia dos Santos Alvalá, aprovada em 15 de abril de 2015.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J54785>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.09.04.35-TDI

**SUSCEPTIBILIDADE À
DEGRADAÇÃO/DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO: TENDÊNCIAS ATUAIS E CENÁRIOS
DECORRENTES DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO
USO DA TERRA**

Rita Marcia da Silva Pinto Vieira

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Javier Tomasella, e Regina Célia dos Santos Alvalá, aprovada em 15 de abril de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J54785>>

INPE

São José dos Campos

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Vieira, Rita Marcia da Silva Pinto.

V673s Susceptibilidade à degradação/desertificação no semiárido brasileiro: tendências atuais e cenários decorrentes das mudanças climáticas e do uso da terra / Rita Marcia da Silva Pinto Vieira. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxii + 87 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.09.04.35-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Javier Tomasella, e Regina Célia dos Santos Alvalá.

1. Desertificação. 2. MEDALUS. 3. Modelagem de uso da terra. 4. Nordeste brasileiro. 5. Semiárido. I. Título.

CDU 504.123:551.583



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

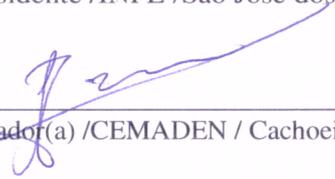
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Ciência do Sistema Terrestre.

Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar


Presidente /INPE /São José dos Campos- SP

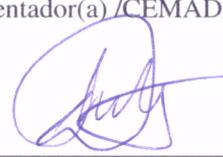
Dr. Javier Tomasella


Orientador(a) /CEMADEN / Cachoeira Paulista- SP

Dra. Regina Célia dos Santos
Alvalá


Orientador(a) /CEMADEN / Cachoeira Paulista- SP

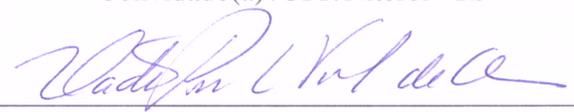
Dr. Daniel Andres Rodriguez


Membro da Banca /INPE/São José dos Campos- SP

Dr. Flavio Rodrigues do
Nascimento


Convidado(a) /UFF/Niterói - RJ

Dra. Vlândia Pinto Vidal de
Oliveira


Convidado(a) /UFC /Fortaleza-CE

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples.

(x) unanimidade.

Título: “SUSCEPTIBILIDADE À DEGRADAÇÃO/DESERTIFICAÇÃO NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO: TENDÊNCIAS ATUAIS E CENÁRIOS
DECORRENTES DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO USO DA TERRA.”

Aluno (a): Rita Marcia da Silva Pinto Vieira

São José dos Campos, 15 de Abril de 2015.

“Permanence, perseverance and persistence in spite of all obstacles, discouragements, and impossibilities: It is this that in all things distinguishes the strong soul from the weak”.

(Thomas Carlyle)

*Ao meu professor e grande amigo Dr. José Simeão de Medeiros e a meus pais
Célio e Neide.*

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e ao Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST), pela oportunidade e suporte para a realização deste doutorado.

Em especial, ao Dr. Javier Tomasella, Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá e Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar pela orientação que tornaram possível o desenvolvimento deste trabalho.

A toda equipe do grupo de modelagem de uso da terra do CCST, em especial à Talita, Raian e Pedro Andrade pela atenção e auxílio em todas as dúvidas referentes ao TerraME e ao LuccME.

Agradecimentos também a toda equipe do projeto SAP do INPE, em especial ao Alexandre Augusto Barbosa e à Ana Paula Martins do Amaral Cunha que me apoiaram na organização do banco de dados para o trabalho de tese.

Ao grupo de Hidrologia e Desastres Naturais do INPE, Daniel Andres Rodriguez, Lucas Garofolo Lopes, Lázaro Siqueira, Henrique Rennó.

Aos meus grandes e melhores amigos Adriana Affonso, Angela Harada, Marcelo Francisco Sestini, Giane de Fátima Valles, Roberta Roseback, Carolina Duque Pinho, Rita Frizzo, Felix Carriello, Lilian Rezende, Wantuir Freitas e Pedrina Terra que sempre acreditaram em mim e no potencial deste trabalho.

A todos os colegas da PG-CST, em particular ao Francisco Gilney Silva Bezerra pelo auxílio na instalação das ferramentas necessárias para rodar o modelo LuccME.

Agradeço também ao Ministério do Meio Ambiente e Fundação Cearense de Meteorologia pelo apoio administrativo/financeiro e científico.

Por fim, não poderia deixar de agradecer a minha filha Lívia Vieira por existir em minha vida e ser a minha grande fonte inspiradora e de força para vencer as maiores barreiras.

RESUMO

Cerca de 57% da superfície da região Nordeste é caracterizada por clima semiárido. A região tem sido submetida ao uso intensivo da terra nos últimos séculos, levando a uma severa degradação dos seus recursos naturais e à desertificação. Assim sendo, o objetivo do presente estudo é desenvolver uma metodologia capaz de identificar áreas com maior potencial a desenvolver o processo de degradação/desertificação. Um dos métodos mais utilizados para a análise de desertificação é a metodologia do MEDALUS, baseada no Índice de Área Ambientalmente Sensível (ESAI), que tem sido aplicado e validado, em várias escalas e resoluções, em vários países da Europa. No Brasil, vários trabalhos foram desenvolvidos para determinar indicadores de desertificação, como, por exemplo, o de Crepani et al. (1996), que desenvolveram uma metodologia baseada no conceito dos princípios da ecodinâmica e na relação morfogênese/pedogênese para identificar áreas de vulnerabilidade à perda de solo. No presente estudo utilizam-se essas duas metodologias para entender melhor o processo de desertificação na região do semiárido do Brasil. O conjunto de fatores utilizados é composto por 11 indicadores de desertificação, disponibilizados para toda a área de estudo: pedologia, geologia, geomorfologia, declividade, dados de uso e cobertura da terra, índice de aridez, densidade de pecuária, densidade da população rural, de focos de queimadas, índice de desenvolvimento humano, unidades de conservação. Os resultados indicam que 94% do semiárido brasileiro está sob moderada a alta susceptibilidade à desertificação. As áreas identificadas com alta susceptibilidade à degradação/desertificação do solo aumentaram aproximadamente 4,6% (83,4 km²) entre 2000 e 2010. As regiões de clima úmido e subúmido-úmido, que do ponto de vista climático são de baixa susceptibilidade, quando analisadas em conjunto com o manejo do solo se tornam áreas de alta susceptibilidade. Foram também gerados cenários, até o ano de 2040, visando avaliar como as mudanças climáticas e os usos da terra poderão afetar o grau de susceptibilidade da área de estudo. Para as mudanças do uso da terra foram avaliados dois cenários: pessimista, quando ocorre desmatamento quase total, restando apenas 3% de remanescente de vegetação; otimista, em cujo desmatamento também ocorre, mas de forma menos intensa, restando 16% de floresta. A diferença encontrada, considerando a classe de alta susceptibilidade, entre o cenário otimista e pessimista foi de apenas 6,374 km² (3%). As áreas em que se observou aumento de susceptibilidade para o ano de 2040 foram nos Estados de Minas Gerais, Piauí, Rio Grande Norte e Sergipe. Também foi constatado o aumento de áreas com alta susceptibilidade à degradação/ desertificação em remanescentes de mata atlântica, o que pode estar ocorrendo devido ao uso intensivo dessas áreas para agricultura. No norte de Minas Gerais o aumento do índice de aridez e a densidade de população projetada podem ser os fatores que explicam o aumento da susceptibilidade. Nos Estados do Rio Grande do Norte e Sergipe, a pedologia é um indicador que pode estar contribuindo para aumento da susceptibilidade. A metodologia proposta mostrou-se útil para

identificar as áreas que são susceptíveis à desertificação, uma vez que combina os principais indicadores de desertificação, na mesma escala e resolução, de forma integrada.

SUSCEPTIBILITY TO DEGRADATION/DESERTIFICATION IN THE BRAZILIAN SEMIARID: CURRENT TRENDS AND SCENARIOS RESULTING FROM CLIMATE CHANGE AND LAND USE

ABSTRACT

Approximately 57% of the Brazilian northeast region is classified as semi-arid climate type. The region has been undergoing intense land use processes in the last decades, which have resulted in severe degradation of its natural assets and desertification. Therefore, the objective of this study is to identify the areas that are susceptible to desertification in this region. One of the most used methods for the analysis of desertification is the MEDALUS methodology based on Environmentally Sensitive Area index (ESAI), which has been applied and validated in various scales and resolutions in several European countries. In Brazil, several studies were developed to determine desertification indicators. For example, Crepani et al. (1996), developed a methodology based on the concept of the eco-dynamic principles, and on the relationship between morphogenesis and pedogenesis to identify areas that are susceptible to soil erosion. The present study combines both methodologies to better understand the process of desertification in semi-arid region of Brazil. Eleven indicators of desertification (pedology, geology, geomorphology, topography data, land use and land cover change, aridity index, livestock density, rural population density, fire hot spot density, human development index, conservation units), widely available in the study area, were used. To each indicator, weights ranging from 1 to 2 (representing the best and the worst conditions), representing classes indicating low, moderate and high susceptibility to desertification, were assigned. The results indicate that 94% of the Brazilian northeast region is under moderate to high susceptibility to desertification. The areas that were susceptible to soil desertification increased by approximately 4.6% (83.4 km²) from 2000 to 2010. From a climatic point of view, the humid and sub-humid areas have low vulnerability. However, when management issues associated with land use are taken into consideration, these areas become potentially susceptible to degradation. In addition, scenarios for the year 2040, to evaluate how climate and land use changes may affect the degree of susceptibility in the region, were generated. Two basic scenarios have been assessed: a pessimistic, when the area is almost completely deforested, remaining only 3% of natural vegetation; and an optimistic, where deforestation is less intense remaining almost 16% of natural vegetation. However, the difference in the high susceptibility class between the optimistic scenario and the pessimist scenario where only 6.374 km² (3%). The areas where the susceptibility increased for the year 2040 were located in the states of Minas Gerais, Piauí, Rio Grande do Norte and Sergipe. It was also noted increase of areas with high susceptibility in

the Atlantic forest remnants due to the intensive use of these areas for agriculture. The aridity index and population density may be the factors that mostly contributed to the increase susceptibility in the north of Minas Gerais. In the states of Rio Grande do Norte and Sergipe, pedology was an indicator that contributed to the increase of susceptibility. The proposed methodology proved to be a useful, timely and cost-effective tool to identify areas that are susceptible to degradation/desertification, on the same scale and resolution, in an integrated framework.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Distribuição das terras secas na superfície terrestre.....	3
Figura 2.1 – Atlas mundial de desertificação.....	14
Figura 2.2 – Arcabouço para entender as mudanças de uso e cobertura da terra.....	19
Figura 2.3 – Estrutura básica de um modelo de uso e cobertura da terra.....	22
Figura 3.1 – Localização da área de estudo.....	23
Figura 4.1 - Combinação de indicadores para determinação do ESAI.....	34
Figura 4.2 – Exemplo do método de resolução múltipla para uma cena 10 x 10 com quatro classes.	44 44
Figura 5.1 – (a) Índice de qualidade física do terreno; (b) índice de qualidade de manejo; (c) índice de qualidade climática; (d) índice de qualidade social.....	56
Figura 5.2 – Distribuição da taxa de analfabetismos das pessoas acima de 10 anos.	60
Figura 5.3 – Áreas ambientalmente susceptíveis a desertificação (A) 2000 e (B) 2010 e (C) mudança entre 2000 e 2010.....	62
Figura 5.4 – Mapas de uso e cobertura da terra referente aos cenários pessimista e otimista.	64
Figura 5.5 – Projeção do índice de aridez para 2040.....	65
Figura 5.6 – Projeção da densidade de população para 2040.....	66
Figura 5.7 - Cenários de áreas ambientalmente susceptíveis à degradação / desertificação.	67
Figura 5.8 – Porcentagem das classes de susceptibilidade para os 11 Estados presentes na área de estudo.....	69
Figura 5.9 – Porcentagem das variáveis referentes ao índice de aridez, pedologia e declividade para os 11 Estados contidos na área de estudo... ..	70
Figura 5.10 – (A) Diferenças entre os mapas de susceptibilidade de 2010 e 2000, (B) cenário pessimista e 2010, (C) cenário otimista e 2010.	70

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Indicadores e fatores de desertificação.....	8
Tabela 3.1 - Classificação das zonas climáticas	24
Tabela 3.2 - Cobertura e grau de erosão (%) dos tipos de solos presentes na região semiárida do Brasil.....	26
Tabela 4.1 – Indicadores de desertificação.....	27
Tabela 4.2 - Classes de uso e cobertura da terra	30
Tabela 4.3 Agrupamentos das classes de uso e cobertura da terra	38
Tabela 4.4 - Subconjunto de variáveis explanatórias potenciais.....	42
Tabela 4.5 - Descrição dos contextos socioeconômicos e ambientais considerados nos cenários.....	46
Tabela 5.1 - Classes e pesos de susceptibilidade dos indicadores utilizados para obtenção do índice de qualidade IQFT.	51
Tabela 5.2 - Classes e pesos de susceptibilidade dos indicadores utilizados para gerar o índice de qualidade - IQM.	53
Tabela 5.3 - Classes e pesos de susceptibilidade dos indicadores utilizados para gerar o índice de qualidade climática - IQC.	54
Tabela 5.4 - Classes e pesos dos indicadores utilizados para gerar o índice de susceptibilidade IQS.....	55
Tabela 5.5 - Porcentagens das classes de susceptibilidade para cada um dos índice de qualidade avaliados.	61
Tabela 5.6 - Cálculo de área (km ²) para as classes de susceptibilidade mapeadas para os anos de 2000 e de 2010.....	63
Tabela 5.7 – Cálculo de área (km ²) das classes de susceptibilidade mapeadas	68
nos cenários pessimista e otimista.....	68

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BD	Banco de dados
GLP	Global Land Project
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IA	índice de aridez
IQFT	Índice de Qualidade Físico do Terreno
IQM	Índice de Qualidade de Manejo
IQC	Índice de Qualidade Climático
IQS	Índice de Qualidade Social
LUCC	Land Use Cover Change
LuccME	Modeling Framework
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MEDALUS	Mediterranean Desertification and Land Use
MIN	Ministério da Integração Nacional
MS	Mapas de susceptibilidade.
NEB	Nordeste brasileiro
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
ONU	Organização das Nações Unidas
PAN	Ação Nacional de Combate a Desertificação
ProBio	Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica.
SAP	Sistema de Alerta Precoce Contra a Desertificação
UNEP	United Nations Environment Programme
UC	Unidade de conservação
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1. Histórico	7
2.2. Indicadores de desertificação.....	8
2.3. Causas da desertificação	13
2.4. Impacto dos usos da terra	17
2.5. Mudanças de uso e cobertura da terra: causas e modelos	19
3 ÁREA DE ESTUDO	23
4 MÉTODOS - Parte I	27
4.1. Seleção de indicadores	27
4.2. Indicadores físicos.....	28
4.2.1. Mapas de geologia, geomorfologia, pedologia e declividade.	28
4.2.2. Índice de aridez	28
4.3. Indicadores socioeconômicos	29
4.3.1. Mapas de uso e cobertura da terra	29
4.3.2. Densidade de populacional rural	32
4.3.3. Densidade de pecuária.....	32
4.3.4. Densidade de focos de queimada	32
4.3.5. Índice de desenvolvimento humano (IDH).....	32
4.3.6. Unidades de conservação	33
4.4. Índice de área ambientalmente sensível (do inglês ESAI)	33
4.5. Validação.....	36
4.6. Modelo de simulação de mudança de uso da terra.....	37
4.6.1 Dados de uso e cobertura da terra.....	37
Tabela 4.3 Agrupamentos das classes de uso e cobertura da terra	38
4.6.2. Componente de demanda	39
4.6.3. Componente de alocação.....	39
4.6.4. Parametrização do Componente de Potencial	40

4.6.5 Processo de análise exploratória e análises estatísticas	41
4.6.6 Calibração e validação do modelo de mudança do uso da terra	43
4.6.7 Cenários de mudança de uso e cobertura da terra	44
4.6.7.1 Projeção de crescimento de população.....	44
4.6.7.2 Projeção do índice de aridez.....	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1. Índice de qualidade físico do terreno (IQFT)	56
5.1.1. Índice de qualidade climática (IQC).....	57
5.1.2. Índice de qualidade de manejo (IQM)	57
5.1.3. Índice de qualidade social (IQS).....	59
5.2. Áreas susceptíveis à desertificação	61
5.3 Cenários de mudança de uso da terra	63
5.4. Cenários de áreas ambientalmente susceptíveis a desertificação	66
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXO 1 – MAPAS DE SUSCEPTIBILIDADE (MS)	87

1 INTRODUÇÃO

O termo desertificação deriva etimologicamente de deserto; no entanto, ambos os termos expressam conceitos diferentes. Os desertos são formações naturais provenientes de fatores como: evaporação potencial maior que a precipitação média anual; precipitação escassa com alta variabilidade anual; solos rasos; drenagem intermitente e mal organizada; cobertura vegetal esparsa, com o predomínio de espécies xerófilas; baixo índice de ocupação humana, com a decorrência de áreas anecúmenas (CONTI, 1998). Já o processo de desertificação inclui o componente humano como primordial em seu desencadeamento, responsável pela degradação ambiental e a criação de condições similares às desérticas (SUERTEGARAY, 1996). A Organização das Nações Unidas definiu a desertificação como sendo a degradação da terra em zonas áridas, semiáridas e subúmida-seca, resultantes de vários fatores, incluindo as variações climáticas e as atividades humanas. Fatores socioeconômicos, tipo de solos, geologia, geomorfologia, relevo, vegetação, e gestão dos solos também são aspectos importantes deste processo (IBGE, 2004).

Segundo Ab'Saber (1977), os processos parciais de desertificação ocorrem de forma pontual ou areolar, ocasionando degradações irreversíveis da paisagem. O processo atua direcionando o ambiente à condição de paisagem tipo desértica, determinando perda dos solos, escassez dos recursos hídricos, redução ou perda da produtividade biológica, improdutividade agrícola e abandono das terras devido ao fato da diminuição da capacidade da terra de fornecer subsídios que são essenciais às atividades humanas como, por exemplo, produção de culturas, pasto, combustível (IPCC, 2007), ocasionando redução na qualidade de vida das populações afetadas. As regiões localizadas entre as faixas de transição de áreas úmidas e secas sofrem mais com a degradação do que as áreas de caatingas que já estão adaptadas às condições de semiaridez.

Apesar de ser um problema das terras secas, o seu efeito é sentido em vários outros ambientes e sociedades. As pessoas sem ter como sobreviver acabam abandonando suas terras e migram para os grandes centros urbanos à procura de melhores condições de vida. O êxodo das áreas afetadas para centros urbanos desencadeia outros problemas sociais, associados à falta de emprego, moradia e estruturas educacionais e de saúde.

A Conferência das Nações Unidas para o Combate à Desertificação (UNCCD) reconhece a desertificação como um problema ambiental com enormes custos em termos humanos, sociais e econômicos (SUERTEGARAY, 1996; HULME; KELLY, 1993). De acordo com o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA), as perdas econômicas anuais devido ao processo de desertificação somam 4 bilhões de dólares no mundo todo, sendo 100 milhões de dólares só no Brasil, com um custo de recuperação de 10 bilhões de dólares por ano, em todo o mundo.

Aproximadamente 41% da superfície da Terra é coberta por terras secas, (Figura 1.1), sendo que 10 a 20% dessas regiões estão sofrendo processos de degradação/desertificação (DEICHMANN; EKLUNDH, 1991; REYNOLDS, 2007). Atualmente, 44% das áreas agrícolas do mundo e cerca de 2 bilhões de pessoas estão localizadas sobre essas terras, e a maioria (90%) corresponde a países em desenvolvimento (D'ODORICO et al., 2013).

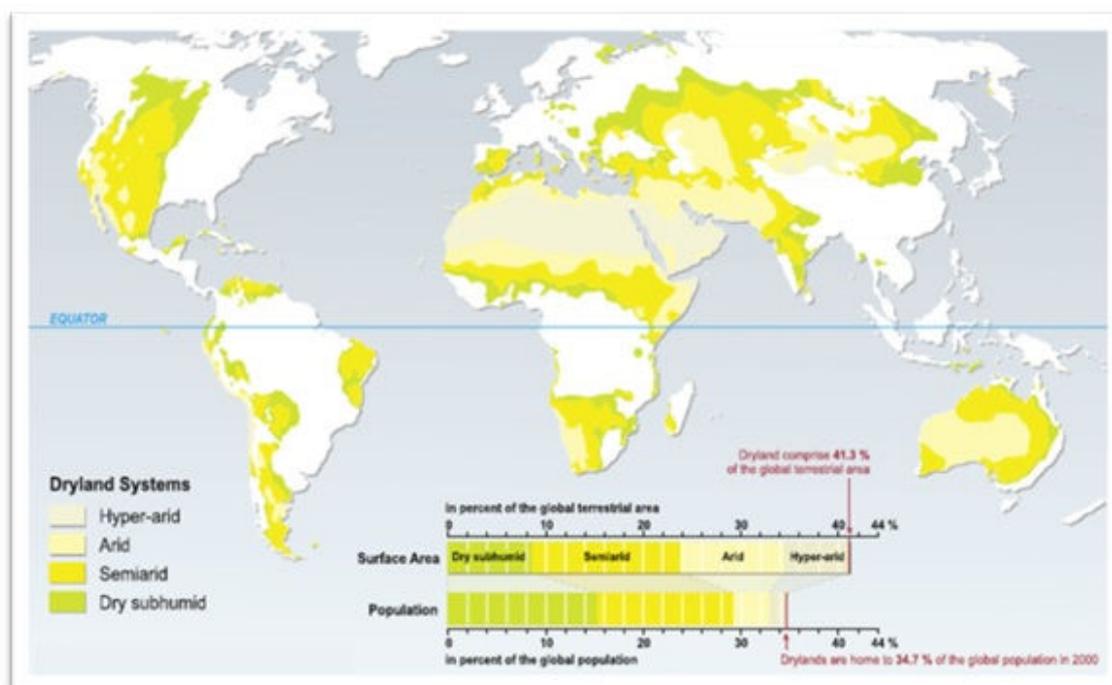


Figura 1.1 – Distribuição das terras secas na superfície terrestre

Fonte: Millennium Ecosystem Assesment (2005).

A ONU estima que, até 2025, um quinto das terras produtivas da América do Sul pode ser afetado pelo processo de desertificação (ONU, 1997). As áreas mais susceptíveis estão localizadas na Argentina, Bolívia, Chile, México, Peru e Brasil (ARELLANO-SOTA et al., 1996). No que diz respeito às áreas do Brasil, a região mais crítica (*hot spot*) localiza-se no semiárido do Brasil que é o mais populoso do mundo (MARENGO, 2008), com mais de 53 milhões de habitantes e uma densidade demográfica de aproximadamente 34 habitantes por km² (IBGE, 2010). Além disso, a região é apontada como uma das mais vulneráveis às alterações climáticas globais no próximo século, no Brasil (IPCC, 2007).

A exploração excessiva dos recursos naturais em regiões extremamente vulneráveis acelera o processo de degradação/desertificação, afetando o funcionamento do ecossistema, reduzindo a produtividade e a biodiversidade, e causando perda de heterogeneidade da paisagem (MAINGUET, 1994; REYNOLDS; STAFFORD S., 2002; MONTANARELLA, 2007; SALVATI; ZITTI,

2008; SANTINI, et al., 2010; BISARO et al., 2014). Assim, o desenvolvimento sem planejamento sustentável acarreta pressão sobre os recursos naturais, principalmente sobre os recursos hídricos e biológicos, que são utilizados na maioria das vezes de forma inadequada (NASCIMENTO, 2013).

Devido às complexas interações sociais e processos biofísicos que envolvem a desertificação, a identificação e avaliação dessas áreas têm sido tratada de forma multidisciplinar e em diferentes escalas espaciais e temporais (ex. PRINCE et al., 1998; DIOUF; LAMBIN, 2001; THORNES, 2004; SANTINI et al., 2010).

Vários métodos têm sido aplicados com sucesso para análise da desertificação, baseada em indicadores e índices (KEPNER et al., 2006; SOMMER et al., 2011). Um dos mais utilizados no Mediterrâneo é baseado no índice de área ambientalmente sensível (ESAI) (KOSMAS et al., 1999). Esta metodologia analisa as quatro variáveis consideradas principais para avaliar o processo de desertificação, sendo elas: clima, solo, vegetação e manejo (KOSMAS et al., 1999, 2006; LAVADO CONTADOR et al., 2009).

Como esse processo está correlacionado com a excessiva exploração humana da terra (SANTINI et al., 2010), estudos como os realizados em modelagem de mudanças de uso e cobertura da terra (do inglês LUCC) também devem ser levados em consideração para um melhor entendimento dos fatores que podem estar contribuindo para desencadear o processo (LAMBIN et al., 2000). A compreensão das causas, os mecanismos de *feedback* e usos da terra são cruciais para intervenções políticas adequadas (AGUIAR, 2006), e devem ser aperfeiçoadas com os padrões específicos da dinâmica da região associada (GEIST; LAMBIN, 2004).

Assim sendo, a hipótese dessa tese baseia-se na perspectiva de elaborar um índice capaz de identificar as áreas com maior potencial para desenvolver a degradação/desertificação. Além disso, pretende-se, por meio da modelagem

de mudanças de uso e cobertura da terra, gerar cenários futuros de susceptibilidade à degradação/desertificação.

O objetivo é desenvolver uma metodologia capaz de identificar áreas com maior potencial ao processo de degradação/desertificação na região semiárida do Brasil e nas porções norte dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, avaliando seus indicadores, a sua intensidade, a sua evolução recente e projeções futuras.

Para atender esse objetivo, o trabalho foi dividido em duas etapas:

1. Elaboração de um modelo capaz de identificar áreas ambientalmente suscetíveis à degradação/desertificação do solo e analisar a dinâmica dessas áreas durante a última década.
2. Construção de um modelo de mudança de uso e cobertura da terra para analisar os impactos de diferentes variáveis sobre as mudanças do uso da terra no semiárido brasileiro e, desenvolver prognósticos para a região frente a diferentes cenários futuros de usos da terra e mudanças climáticas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Histórico

O termo “desertificação” foi utilizado pela primeira vez na publicação “Climats, Forêts et Desertification de l’Afrique Tropicale”, no ano de 1949, por André Aubreville, para caracterizar a substituição de florestas tropicais e subtropicais por savanas.

Alguns anos depois, devido à grande seca que ocorreu na África matando mais de 200 mil pessoas e milhões de animais, a degradação/desertificação passou a ser tratada como um problema ambiental.

Desde então, a comunidade científica internacional passou a reconhecer os impactos socioeconômicos e biofísicos e a necessidade de se criar um programa mundial de ação para combatê-los.

No Brasil, o tema se tornou mais evidente a partir da Conferência Rio-1992. Em 17 de junho de 1994, foi estabelecida pela ONU a Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD), com mais de 179 países fazendo parte, entre os quais o qual o Brasil é signatário. O principal propósito da convenção é o de amenizar a pobreza nas terras áridas, manter e restaurar a produtividade e mitigar os efeitos da seca. Em 2004, o Brasil aprovou o seu programa de ação de combate à desertificação – PAN BRASIL. O PAN Brasil tem como eixos temáticos: (1) a redução da pobreza e da desigualdade; (2) a ampliação sustentável da capacidade produtiva; (3) a preservação, conservação e manejo sustentável dos recursos naturais; e (4) a gestão democrática e fortalecimento institucional. O Ministério do Meio Ambiente (MMA), juntamente com o Instituto Internacional para a Cooperação na Agricultura (IICA), vem apoiando os Estados que fazem parte da região semiárida do Brasil, na elaboração dos planos estaduais de combate à desertificação.

2.2. Indicadores de desertificação

Os indicadores podem ser considerados como os fatores físicos e socioeconômicos que de alguma forma causam desequilíbrio ambiental e diminuição da qualidade de vida.

No Brasil, os primeiros trabalhos publicados focaram em determinar os principais indicadores e fatores responsáveis pelo processo de degradação da terra, conforme ilustrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Indicadores e fatores de desertificação

Literatura brasileira	Indicadores
Vasconcelos Sobrinho (1978)	<p>Indicadores Físicos: grau de salinização e alcalinização do solo, profundidade e qualidade das águas subterrâneas, profundidade efetiva do solo, número de tormentas de pó e areia, presença de crosta no solo, quantidade de matéria orgânica no solo, volume de sedimentos na água, área coberta de vegetação e turbidez das águas superficiais.</p> <p>Indicadores biológicos-agrícolas: cobertura vegetal, biomassa acima da superfície, distribuição e frequência de espécies, espécies animais, população de animais domésticos, composição dos rebanhos, produção e rendimento (colheita).</p> <p>Indicadores sociais: agricultura por irrigação, agricultura de sequeiro, pastoreio, corte e eliminação da cobertura vegetal (prática extrativista), mineração, instalação de turismo e de recreio, assentamento recente, expansão do assentamento, diversificação do assentamento, abandono do assentamento, estrutura da população e taxas demográficas, medições da situação em matéria e nutrição, índice de saúde pública, conflito, migração, esquema de redistribuição e marginalização.</p>

Continuação da Tabela 2.1

Ferreira et al., (1994)	Presença de erosão, perda de fertilidade do solo, pecuarização, presença de bovinos, presença de caprinos, presença de ovinos, área com agricultura, tratores por área, defensivos agrícolas.
Viana e Rodrigues (1999) – Índice de propensão a desertificação dos municípios cearenses	Sobrepastoreio, cultivos excessivos, desenvolvimento de culturas de exportação impróprias para o clima e o solo da região, irrigação inadequada, desmatamento ou queimada generalizada da cobertura vegetal, mineração, demanda de energia (lenha, carvão vegetal, etc.), crescimento populacional, urbanização.
Lemos (2001) – índice de degradação para todo o Nordeste	Cobertura vegetal, mão de obra por unidade de área de lavoura, mão de obra por unidade de área de pecuária, produtividade agrícola, produtividade pecuária.
Matallo Júnior (2001)	Erosão, salinização, perda de fertilidade, cobertura vegetal, índice de vegetação, produtividade agrícola, produtividade pecuária, disponibilidade de água na superfície, qualidade de água, coeficiente de uso, coeficiente de saturação, demanda atual de mão de obra, demanda potencial de mão de obra, renda per capita, estrutura etária, migrações, densidade demográfica, nível de educação, dinâmica demográfica.

continua

Tabela 2.1 - Conclusão

PAN-BRASIL (2004)	Cobertura vegetal, biomassa da caatinga, biodiversidade vegetal, desmatamento, presença de espécies indicadoras, lenha, fauna, uso do solo, erosão, salinização, sobrepastoreio, albedo, uso das águas superficiais e subterrâneas, stress hídrico, assoreamento, vazão, densidade demográfica, saneamento, mortalidade infantil, escolaridade, estrutura fundiária, controle estatal, plano diretor, capacitação, associação municípios, Ongs, conselhos, recursos orçamentários, marcos legais, integração programas, institucionalização, índice de aridez, índice de precipitação padronizado.
-------------------	--

Vasconcelos Sobrinho (1978) afirmou que a variação de um indicador por si só não indica desertificação; mais, se um conjunto de indicadores combinados entre si e/ou apresentarem modificações é um indicativo de que pode haver uma tendência à degradação/desertificação.

Assim, alguns trabalhos têm focado em desenvolver modelos capazes de analisar a desertificação com base na análise integrada de seus indicadores (KEPNER et al., 2006; SOMMER et al., 2011). Crepani et al. (1996) desenvolveram uma metodologia baseada no conceito dos princípios da ecodinâmica, proposta por Tricart (1977), e sobre a relação entre morfogênese e pedogênese para identificar áreas susceptíveis à erosão do solo. Os autores forneceram uma visão integrada do ambiente físico e a base conceitual para o desenvolvimento humano *versus* relações de natureza.

Oliveira (2011) também elaborou um diagnóstico geoambiental para a Ilha de Santiago de Cabo Verde (África), baseada no conceito da ecodinâmica. O objetivo do trabalho foi conhecer a dinâmica e o grau de degradação em que se encontrava os sistemas ambientais da região. Segundo a autora, com o enquadramento em uma determinada categoria de meio ecodinâmico, é

possível detectar o grau de vulnerabilidade do ambiente e sua sustentabilidade futura, tendencial e desejada.

Em ambos os trabalhos mencionados acima, foram consideradas as seguintes categorias geoambientais:

- Ambientes estáveis - apresentam estabilidade morfogenética antiga em função da fraca atividade do potencial erosivo. Os processos morfogenéticos e pedogenéticos possuem um balanço favorável à pedogênese ou em equilíbrio entre os fatores do potencial ecológico e os de exploração biológica. O recobrimento vegetal é pouco alterado pelas ações antrópicas, ou existe forte regeneração da cobertura secundária, a qual evolui para as condições próximas as originais;
- Ambientes de transição – se relacionam à dinâmica atual do ambiente, que é marcada pelo rompimento incipiente do equilíbrio ecológico. Há preponderância dos processos morfogênicos sobre os pedogenéticos, embora de forma tênue, o que pode favorecer uma ou outra condição: predominância dos processos pedogenéticos indica tendência à estabilidade; predominância dos processos morfogênicos demonstra tendência à instabilidade;
- Ambientes instáveis - apresentam uma intensa atividade do potencial erosivo com nítidas evidências de deterioração ambiental e da capacidade produtiva dos recursos naturais. O balanço entre a morfogênese e a pedogênese é favorável à morfogênese. Esses ambientes poderão ser subdivididos em duas categorias: ambientes de baixa instabilidade e ambientes de forte instabilidade. No primeiro caso, há ainda certa frequência das comunidades vegetais primárias. No segundo, há evidente primazia da perda do material pedogenético e da cobertura vegetal que foram quase suprimidas.

Os estudos físico-ambientais, como os desenvolvidos por Crepani et al. (2006) e por Oliveira (2011), são úteis para incorporar variáveis ambientais ao processo de organização territorial e de uso sustentável do solo; no entanto, eles não levam em consideração variáveis socioeconômicas e demográficas.

Como uma das principais causas da desertificação é o manejo inadequado do solo e alta densidade populacional, optou-se por utilizar, no presente trabalho, além de modelos sistêmicos, como o descrito acima, modelos que utilizam também variáveis socioeconômicas e de manejo. Um dos métodos mais utilizados atualmente em países da Europa é baseado na metodologia do MEDALUS, denominada Índice de Área Ambientalmente Sensível (do inglês ESAI), e que tem por objetivo identificar áreas susceptíveis ao processo de desertificação. A vantagem em se usar esse modelo é que ele pode ser adaptado para diferentes condições climáticas, ambientais e sociais, e em diferentes escalas.

A metodologia vem sendo testada com sucesso em vários países (Itália, Espanha, Portugal, Grécia entre outros) por diversos autores (SANTINI, et al., 2010; SALVATI et al., 2011, BASSO et al., 2000; BRANDT; GEESON, 2003). Por exemplo, Symeonakis et al. (2014) identificaram áreas ambientalmente sensíveis à desertificação na ilha de Lesbos (Grécia) por meio do ESAI. Os autores incluíram 10 parâmetros relacionados com a erosão do solo, a qualidade das águas subterrâneas, a pressão demográfica e pastoreio, para duas datas (1990 e 2000). Neste estudo, identificaram áreas que não eram consideradas criticamente sensíveis à desertificação no lado oriental da ilha, ocasionado por fatores relacionados a atividades antrópicas.

Benabderrahmane e Chenchouni (2010), também utilizaram o MEDALUS para identificar áreas com sensibilidade à desertificação na parte ocidental da Argélia. Os autores constataram que o clima é o fator que mais contribui com o processo de desertificação na região. Segundo os autores, a irregularidade de chuvas, secas constantes, deficiência de umidade do solo e nas mudanças de

qualidade da água causam diminuição na cobertura vegetal e, conseqüentemente, expõe o solo a erosão.

Sepehr et al. (2007), por meio da utilização da metodologia do MEDALUS, constataram que a cobertura vegetal e a qualidade das águas subterrâneas são os principais fatores para desencadear o processo de desertificação na região sul do Iran. Segundo os autores, esses recursos naturais estão sendo afetados, principalmente, pelo sobrepastoreio e contaminação das águas subterrâneas.

Como pode ser observado, os fatores que originam a desertificação são múltiplos e complexos e apresentam inúmeros mecanismos de retroalimentação. Esses fatores podem estar presentes em todas as áreas sujeitas à desertificação, sendo necessário definir a influência de cada um deles (Sampaio, 2006). Além disso, diversas alterações estão ocorrendo no ambiente terrestre e entender como a população faz uso da terra e como diversas causas influenciam a dinâmica da mudança da terra em escalas locais, regionais e globais é fundamental (GLP, 2005).

2.3. Causas da desertificação

A desertificação é um fenômeno que resulta da combinação de fatores naturais, principalmente as episódicas secas; e de fatores antrópicos, como sobrepastoreio, desmatamento e remoção da cobertura vegetal, juntamente com as atividades agrícolas que ocorrem acima da capacidade de suporte do ambiente. A Figura 2.1 ilustra a porcentagem dos principais fatores que influenciam no processo de desertificação nas diversas regiões do planeta. Particularmente na América do Sul, pode-se observar que o desmatamento seguido do sobrepastoreio são as atividades que mais contribuem para o processo de desertificação.

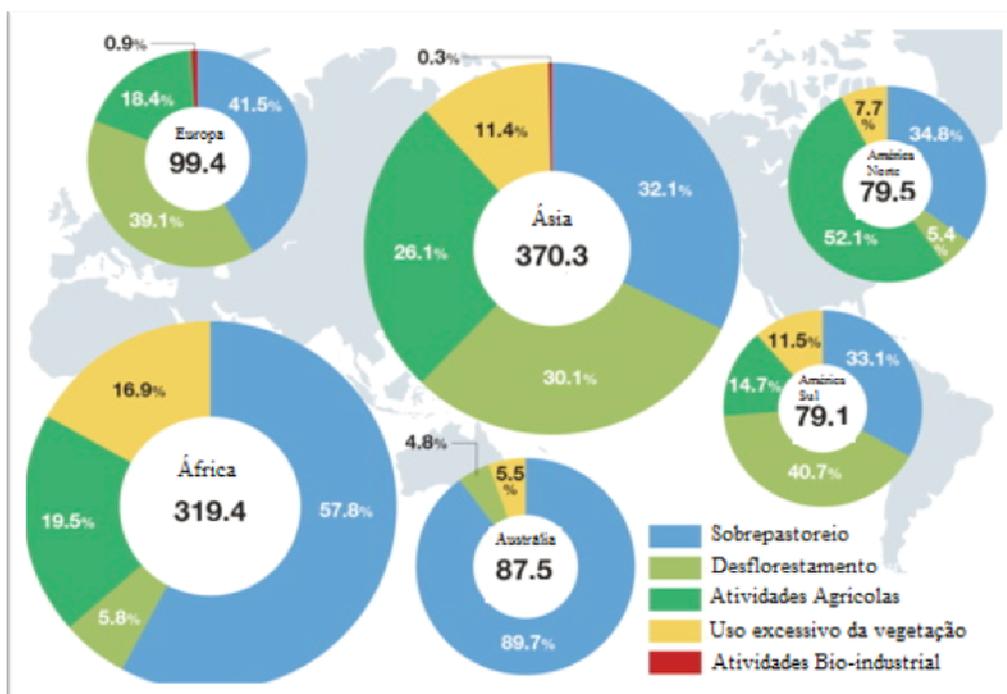


Figura 2.1 – Atlas mundial de desertificação

Fonte: UNEP (1995).

Em 1500, Pedro Álvares Cabral chegou ao Brasil pelo litoral do Nordeste, dando início ao processo de povoamento da região. No final do século XVI, os Estados de Sergipe, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Paraíba já estavam totalmente dominado pelos portugueses. Por Sergipe os portugueses ainda abriram caminho para o sertão e chegaram até o Parnaíba. Em expedição contra os franceses no Estado do Maranhão os colonizadores também desbravaram o litoral e parte do sertão, chegando em 1610 ao Estado do Ceará. Em luta contra os holandeses, que dominavam o litoral entre o rio São Francisco, Pernambuco, Ceará e Maranhão, os colonos portugueses recuaram para o sertão deixando núcleos pastoris por todo o vale do São Francisco (GASPAR, 2009). Logo, na região Nordeste do Brasil (NEB), a economia vinculou-se basicamente pelos cultivos da cana-de-açúcar no século XVI, a

partir da Zona da Mata, que se estende do Rio Grande Norte a Bahia (Machado, 2008, Gonçalves, 2007). As outras atividades agrícolas foram interiorizadas, como a pecuária extensiva a partir do século XVII, que atingiu seu ápice a partir da primeira metade do século XVIII, a agricultura básica de subsistência, e a cotonicultura que surgiu no século XIX após a seca que perdurou por quatro anos na região e que ficou conhecida como “Seca Grande”. O algodão foi cultivado principalmente no Ceará e Pernambuco devido às condições favoráveis do clima (NASCIMENTO, 2006). A pecuária era, e ainda é, a principal atividade econômica sertaneja com a produção de bovinos para a produção de carne, caprinos que são utilizados para a produção do leite e asininos para a montaria. Em grande parte da região do Piauí e Maranhão, conhecida como meio norte, a agricultura é pobre, sendo o extrativismo vegetal a principal atividade econômica por meio da coleta do babaçu e da carnaúba (GASPAR, 2009).

Atualmente o Nordeste brasileiro apresenta um grande desenvolvimento industrial onde se destacam as seguintes matérias-primas: cana-de-açúcar (açúcar e álcool); algodão (indústria têxtil); frutas nativas (como o cajú, a mangaba, a pitanga, o araçá, o cajá); frutas não nativas, como o coco (árvore símbolo da região); manga, graviola, jaca (indústria do suco e doces); cacau (indústria alimentícia); tabaco (indústria de charuto, hoje em decadência); cera de carnaúba; óleos de babaçu e de oiticica; fibras vegetais (como o caroá, a piaçava e o sisal); cobre e chumbo (na Bahia); tungstênio (no Rio Grande do Norte); sal (no Rio Grande do Norte e Ceará). É importante mencionar que 80% do sal produzido no país é proveniente da produção nordestina (GASPAR, 2009). Por fim, outro fator de desenvolvimento na região é o petróleo e o gás natural, que são explorados sobretudo nos litorais do Rio Grande do Norte, Sergipe Alagoas e Recôncavo Baiano. O potencial hidrelétrico do rio São Francisco também é de grande importância para o desenvolvimento regional. As suas principais usinas são Sobradinho, Itaparica, Complexo de Paulo

Afonso e Xingó. No tocante ao rio Parnaíba, destaca-se a usina Castello Branco (GASPAR, 2009).

Nas últimas décadas, a região sofre com o uso indiscriminado da terra, com a ocorrência de desmatamento em grande escala para uso da madeira principalmente como lenha e carvão, uso agrícola, indústria em geral, incluindo a mineração. A vegetação nativa, por exemplo, na região do Araripe em Pernambuco, está sendo utilizada como principal insumo na sua matriz energética. O polo industrial da região utiliza a base florestal para o beneficiamento e transformação da gipsita (SÁ et al., 2009).

De acordo com o Relatório sobre Monitoramento do Bioma Caatinga apresentado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em parceria com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), a vegetação remanescente na região, que em 2002 era de 55,67%, diminuiu em 2008 para 53,62%, sendo as estatísticas baseadas na área total do bioma que é igual a 826.411 km² (MMA, 2010). Vieira et al. (2013) também constataram que a região perdeu uma grande área de Cerrado, a qual em 1993 era de 311.780 km², diminuindo em 2001 para 235.660 km². O mesmo se pode dizer com relação à *Caatinga*, que em 1993 apresentava uma área de remanescente correspondente a 350.360 km², passando para 274.560 km² em 2001.

O sobrepastoreio na região também é uma atividade que ocorre de forma extensiva, não levando em consideração a capacidade de suporte das terras. O uso do pasto nativo e do plantado é feito sem planejamento e a atividade leva a uma compactação dos solos da região.

Por fim, pode-se mencionar a mineração, que em muitos casos é feita de forma predatória e altera a fisiologia e estrutura da paisagem, além de poluir mananciais de água.

2.4. Impacto dos usos da terra

A retirada da cobertura vegetal torna a região mais susceptível ao processo de desertificação, uma vez que a mesma protege a paisagem de diversas maneiras, evitando, por exemplo, o impacto direto das gotas de chuva contra o terreno; impedindo a compactação do solo; aumentando a capacidade de infiltração do solo pela difusão do fluxo de água da chuva. Além disso, a vegetação suporta a vida silvestre que, pela presença de estruturas biológicas como raízes de plantas, perfurações de vermes e buracos de animais, aumentam a porosidade e permeabilidade do solo (CREPANI, 2001; GUERRA e CUNHA, 2003).

Sendo assim, compete à cobertura vegetal um papel importante de retardar o ingresso das águas provenientes das precipitações pluviais nas correntes de drenagem, pelo aumento da capacidade de infiltração, pois o ingresso imediato provoca incremento do escoamento superficial (*runoff*), com o consequente aumento na capacidade de erosão.

Toda água da chuva que cai sobre o solo só pode seguir três caminhos: voltar à atmosfera como vapor, se infiltrar no solo ou escorrer na superfície em direção aos rios e oceanos. É fácil compreender que o adensamento e a compactação do solo aumentam a proporção de água escoando superficialmente, responsável pela erosão hídrica. Essa erosão, seja ela laminar, em sulcos ou ravinas, é capaz de destruir em um único ano o que a natureza levou centenas ou milhares de anos para construir. Dessa maneira, a participação da cobertura vegetal na caracterização morfodinâmica das unidades de paisagem natural está diretamente ligada à sua capacidade de proteção (CREPANI, 2001; GUERRA; CUNHA, 2003).

As plantas também conseguem extrair água do solo, mesmo em camadas mais profundas, mantendo assim a sua transpiração, sendo desprezível a evaporação pela superfície do solo. Com os acelerados processos de

desmatamento, ocorre diminuição da evapotranspiração, resultando em uma troposfera mais seca (SUD et al., 1993).

A degradação das áreas naturais quase sempre se inicia com o desmatamento e com a substituição da vegetação nativa por outra cultura e/ou ciclo de vida diferente. A vegetação da caatinga, por exemplo, é substituída por pastos herbáceos ou culturas de ciclo curto. Áreas em constante processo produtivo, sem reposição de seus nutrientes, apresentam perda de fertilidade. Em áreas irrigadas, o uso de água com elevados teores de sais, associado ao manejo inapropriado da irrigação, pode ocasionar salinização. Além disso, o uso de equipamentos pesados em solos com teores de água inadequados pode levar à compactação do mesmo (SAMPAIO et al., 2005).

Esses processos de degradação produzem consequências sobre os diferentes componentes ambientais, tais como:

1. Eliminação da cobertura vegetal original e presença de uma cobertura invasora, com conseqüente redução na biodiversidade;
2. Perda parcial ou total do solo devido a fenômenos físicos (erosão) ou químicos (salinização e alcalinização);
3. Diminuição na quantidade e qualidade dos recursos hídricos, afetando principalmente o escoamento superficial;
4. Diminuição da fertilidade e da produtividade do solo.

Segundo Nimer (1988), o uso inadequado do solo, através de técnicas de cultivos impróprias, em áreas sobre forte rigor climático e desequilíbrio dinâmico podem desencadear o empobrecimento de biomassa, levando a um processo irreversível de regeneração. O pastoreio extensivo pode levar a compactação do solo, tornando-o mais vulnerável a ação de agentes como água, vento, entre outros, ocasionando várias formas de erosão como voçorocas e ravinamentos, além de extinguir algumas espécies vegetais. Por

fim, o desmatamento deixa o solo desprotegido, o que expõe os nutrientes a ação das intempéries, levando à infertilidade e regressão de suas potencialidades.

2.5. Mudanças de uso e cobertura da terra: causas e modelos

Não existe uma maneira simples para explicar todas as mudanças que ocorrem nos usos da terra. Assim sendo, diversos modelos matemáticos estão sendo elaborados para tentar descrever a dinâmica deste sistema.

Devido à complexidade das causas, dos processos e dos impactos das mudanças da terra foi necessário desenvolver uma teoria integrada de ciência da mudança da terra (Figura 2.2).

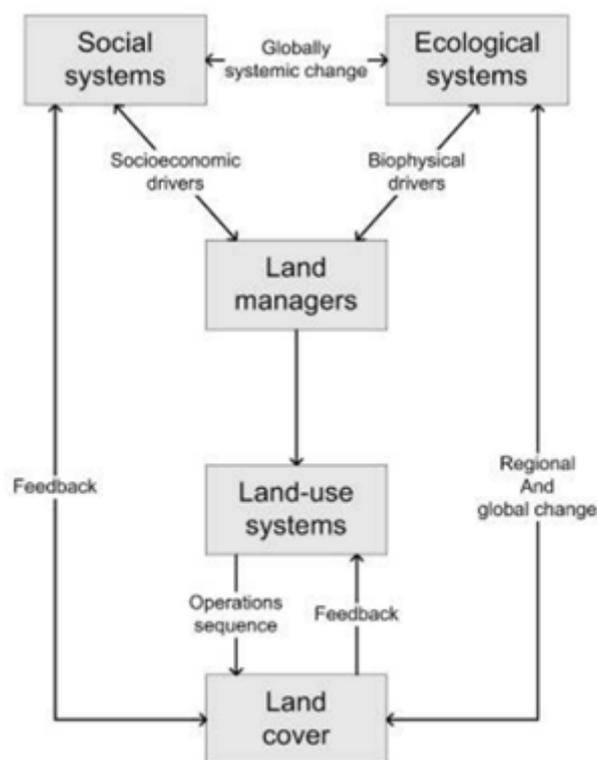


Figura 2.2 – Arcabouço para entender as mudanças de uso e cobertura da terra.

Fonte: Lambin et al. (2006).

Analisando a Figura 2.2 é possível constatar que as mudanças de uso e cobertura da terra estão relacionadas com fatores socioeconômicos e biofísicos, que interagem no tempo e espaço em diferentes espaços geográficos criando diferentes trajetórias de mudança (LAMBIN; GEIST, 2001).

Os modelos LUCC, por serem espaciais e dinâmicos, nos permitem descrever as mudanças geográficas resultantes da interação sociedade *versus* ambiente e quais são os fatores responsáveis pelas alterações (CARNEIRO, 2006). Esses modelos permitem quantificar as relações existentes entre os fatores determinantes e analisar as causas e consequências destas mudanças. Segundo Verbrug et al. (2004), a compreensão dessas vias é crucial para intervenções políticas adequadas, que devem ser aperfeiçoadas com os padrões específicos da dinâmica da região associada com a desertificação.

Geist e Lambin (2004), por exemplo, demonstram que a degradação do solo na região do semiárido é impulsionada por um conjunto limitado de variáveis, sendo as mais importantes os fatores climáticos, econômicos e crescimento populacional. Tais fatores estimulam a expansão de terras agrícolas e o sobrepastoreio.

Sietz et al. (2006) desenvolveram um estudo cujo objetivo foi compreender e classificar os padrões típicos de interação sociedade-natureza no Nordeste do Brasil. Para isso, desenvolveram modelos qualitativos, levando em consideração variáveis como rendimento e orçamento, entre outras e, duas regras de alocação (trabalho e investimento) em recursos agrícolas. Também foi considerado as influências externas ao modelo, como a relação da seca e a queda dos preços dos produtos que apresentaram grande contribuição para o processo de entendimento dos padrões analisados.

Existem diferentes modelos de mudanças de usos da terra que podem ser classificados de acordo com seus objetivos, escalas, abordagens técnicas e teorias. Apesar da diversidade de modelos de mudanças de usos da terra na literatura (LAURENCE et al., 2001; AGUIAR, 2006; SOARES-FILHO et al.,

2006; WASSENAAR et al., 2007; LAPOLA et al., 2011), é possível identificar uma estrutura funcional comum em muitos modelos espacialmente explícitos (VERBURG et al., 2006; EASTMAN et al., 2005). Esta estrutura está relacionada com a partição entre o cálculo de demanda de terra (a magnitude ou quantidade de mudança) e a atribuição de terra (a distribuição espacial da mudança, incluindo o cálculo de potencial) (DALLA-NORA et al., 2014).

De maneira geral, estes modelos são organizados de forma que cada demanda por mudança é espacialmente alocada de acordo com o potencial da célula, como ilustra a Figura 2.3. Nestes modelos, três componentes principais podem ser identificados: o cálculo da quantidade de mudança (demanda), o potencial de transição de cada célula (geralmente baseado em análises estatísticas) e o procedimento de alocação, que aloca a demanda de acordo com o potencial de transição. Muitos modelos conhecidos da literatura seguem esta estrutura, incluindo os modelos da família CLUE (VELDKAMP; FRESCO, 1996; VERBURG et al., 1999, VERBURG et al. 2002), Dinâmica (SOARES-FILHO et al., 2002) e GEOMOD (PONTIUS, 2001), e utilizam diferentes técnicas e abordagens na construção destes três componentes (EASTMAN et al., 2009; LESSCHEN et al., 2007).

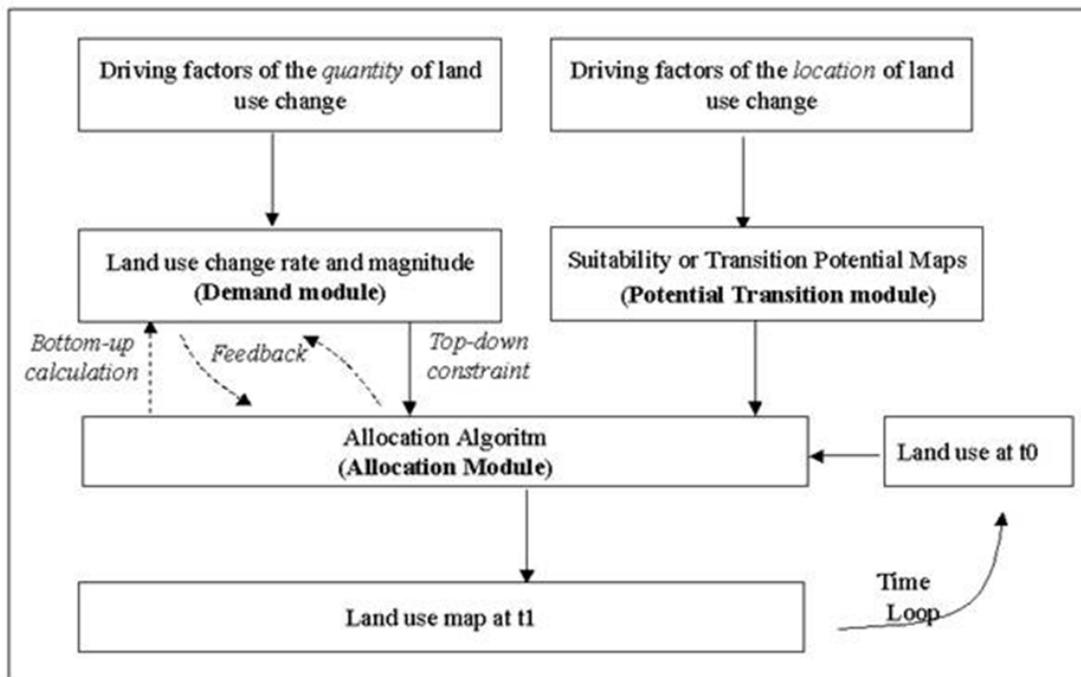


Figura 2.3 – Estrutura básica de um modelo de uso e cobertura da terra
 Fonte: Verburg et al. (2006)

3 ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo está situada na zona equatorial (1-21°S, 32-49°W) e engloba os 9 Estados do Nordeste brasileiro mais a região norte dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, totalizando uma área de 1.797.123 km², o que corresponde a 20% do território brasileiro (Figura 3.1).

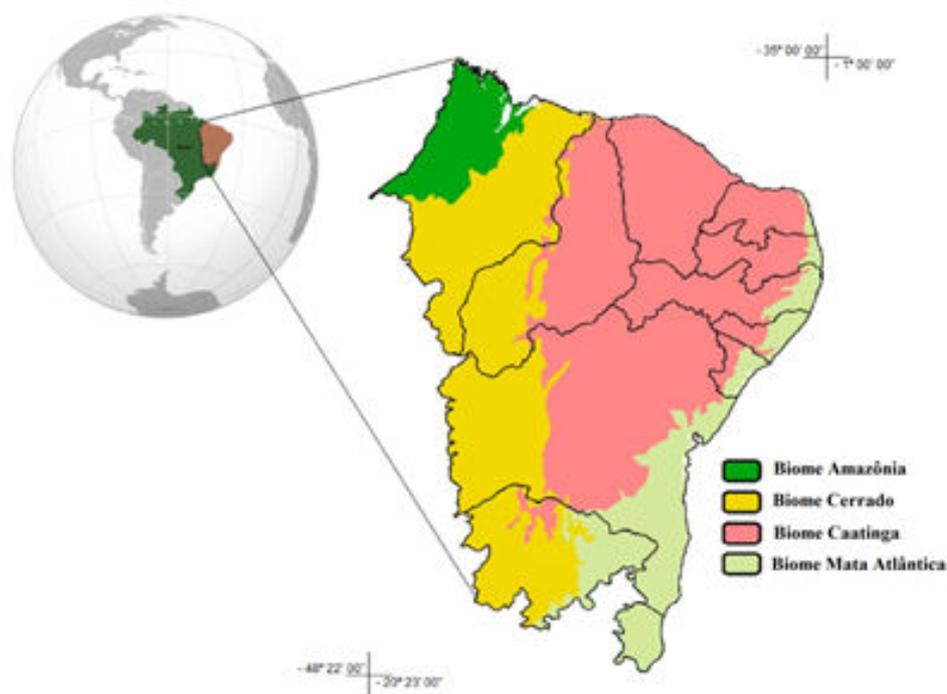


Figura 3.1 – Localização da área de estudo

A delimitação da área foi determinada pelo Ministério da Integração Nacional (MIN, 2005) baseada em três critérios:

- Na isoieta de 800 mm – delimitada a partir da média anual de precipitação do período de 1961-1990;
- No índice de aridez (THORNTHWAITE, 1941) - esta classificação introduz o conceito de balanço hídrico, comparando a evapotranspiração potencial com a precipitação, a fim de obter um índice de umidade. A

Tabela 3.1 apresenta as zonas climáticas consideradas a partir do índice de aridez.

Tabela 3.1 - Classificação das zonas climáticas

Hiper-árido	< 0,03
Árido	0,05 - 0,20
Semiárido	0,21 - 0,50
Subúmido-seco	0,51 - 0,65
Subúmido-úmido	0,66 – 1,00
Úmido	>1,00

- No risco de seca - percentagem do número de dias com déficit hídrico igual ou superior a 60%, avaliado no período de 1970-1990. Por esse critério, as áreas do entorno das regiões semiáridas e subúmidas-secas também foram consideradas. Estas regiões, apesar de não apresentarem as mesmas características climáticas, apresentam elevada ocorrência de secas e enclaves de vegetação típica do semiárido brasileiro.

A climatologia da região inclui três diferentes regimes climáticos: i) Na área sul-sudoeste, a estação chuvosa ocorre de outubro a fevereiro, e está associada com o deslocamento de frentes frias vindas do sul; ii) No norte da região, a precipitação ocorre de fevereiro a maio, e está associada com o movimento em direção ao sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). iii) Na área estreita que fica perto da costa leste, a estação chuvosa ocorre de abril a agosto, provocado por diferenças de temperatura entre os oceanos e o continente (KOUSKY, 1979; MARENGO, 2008). A taxa de evaporação na

região é muito alta e pode chegar a 1000 mm ano⁻¹ na região do litoral e até 2000 mm ano⁻¹ no interior (IICA, 2001).

Devido às altas taxas de evaporação, à curta duração da estação chuvosa, e à pouca espessura do solo, a maioria dos rios são temporários (MMA, 2010).

A vegetação dominante é a *Caatinga*, que ocupa 62% da área (MMA, 2007). Neste bioma encontra-se inserido os núcleos de desertificação de Irauçuba, Seridó e Cabrobó. Já o núcleo de Gilbués, este está situado sobre uma área de cerrado, sendo observado áreas de transição entre o cerrado e a *caatinga* ao leste da área de estudo. A vegetação é xerófita, o que significa que está adaptada a seca devido à redução da superfície foliar, transformação das folhas em espinhos, cutículas cerosas nas folhas, etc. As espécies vegetacionais suportam grande período de estiagem devido as suas reservas nutritivas e híbridas nas raízes tuberosas e xilopódias, tanto nas plantas herbáceas, como também nos arbustos e árvores (FOURY, 1972).

A região é formada por solos do tipo latossolos vermelho-amarelos, latossolos vermelho-escuro, neossolos litólicos, argissolos, luvisolos crônicos órticos, neossolos quartzarênicos, planossolos háplicos, chernossolos, planossolos nátricos, solonchaks, cambissolos, vertissolos, neossolo regolítico, solos aluviais e rendzinas. No entanto, a maior parte da área (86%) apresenta solos do tipo planossolos háplicos, neossolos quartzarênicos, luvisolos crônicos órticos, argissolos, latossolos e neossolos litólicos (ARAÚJO-FILHO, 2013). Segundo Jacomine (1996), a maioria desses solos apresentam acelerado processo de erosão, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Cobertura e grau de erosão (%) dos tipos de solos presentes na região semiárida do Brasil.

Classes de solo	Cobertura (%)	Erosão (%)
Latossolos	21,0	9,0
Neossolos litólicos	19,2	65,0
Argissolos	14,7	29,0
Luvissolos órticos crônicos	13,3	65,0
Neossolos quartzarênicos	9,3	0,0
Planossolos háplicos	9,1	10,0
Totais/média	86,6	29,7

4 MÉTODOS - Parte I

4.1. Seleção de indicadores

Para identificar áreas susceptíveis à desertificação, foram avaliados 11 indicadores de susceptibilidade (Tabela 4.1), com base em estudos anteriores (Vasconcelos Sobrinho, 1978; Ferreira et al., 1994; Matallo Júnior, 2001; Lemos, 2001). Toda a base de dados está na projeção LatLong, datum WGS 84 e foi elaborada pelo Projeto Sistema de Alerta Precoce Contra a Desertificação – SAP, este desenvolvido pelo INPE e o MMA.

Tabela 4.1 – Indicadores de desertificação.

Indicadores	Escala/Resolução Espacial	Período	Fonte
Geologia	1:500.000/90 m	2010	INPE/MMA
Geomorfologia	1:500.000/90 m	2010	INPE/MMA
Pedologia	1:500.000/90 m	2010	INPE/MMA
Uso e Cobertura da Terra	1:500.000/90 m	2000 e 2010	INPE/MMA
Índice de Aridez	1:500.000/5 km	1970-2000	INPE/MMA
Declividade	1:500.000/90 m	2010	INPE
Densidade de população rural	Por município	2000 e 2010	IBGE
Densidade de pecuária	Por município	2000 e 2010	IBGE
Densidade de focos de queimadas	1:500.000/1km	1999-2003 e 2008-2012	INPE/MMA
Índice de desenvolvimento humano	Por município	2000 e 2010	FJP
Unidades de Conservação	1:500.000/90 m	2010	MMA

Cada indicador foi subdividido em várias classes uniformes, e cada classe recebeu um peso de susceptibilidade, relacionado com a sua influência sobre o processo de desertificação. Os pesos variaram entre 1 (baixa susceptibilidade) a 2 (alta susceptibilidade), sendo produzidos 11 mapas de susceptibilidade

(SM). Assim como a seleção dos indicadores, os pesos também foram atribuídos com base em análises anteriores obtidas da literatura (Crepani, 1996, Torres et.al, 2003, Alves, 2006, Santini, 2010, Symeonakis, 2013). Estes indicadores foram agrupados em 2 grupos, conforme descrito a seguir.

4.2. Indicadores físicos

4.2.1. Mapas de geologia, geomorfologia, pedologia e declividade.

Os mapas de geologia e geomorfologia foram extraídos do Projeto RADAMBRASIL (Projeto RADAMBRASIL 1973-1987) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Estes mapas foram digitalizados e, em seguida, reinterpretados utilizando como base o Modelo Digital de Elevação (do inglês DEM), seguindo o procedimento sugerido por Valeriano & Rossetti (2012).

Os mapas de solos foram cedidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (JACOMIN et al, 2005) e também tiveram de ser reinterpretados, uma vez que estavam em diferentes escalas, utilizando-se, como base, o DEM e imagens de satélites.

4.2.2. Índice de aridez

O índice de aridez (IA) é considerado um dos mais importantes indicadores para a identificação de áreas susceptíveis à desertificação (UNESCO, 1979; SAMPAIO et al. 2003). No presente estudo, o IA foi obtido pela seguinte equação:

$$IA = P/ETP \quad (4.1)$$

em que P é a precipitação e ETP é a evapotranspiração potencial calculada usando a equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965).

Para calcular a evapotranspiração, a equação considera aspectos aerodinâmicos e termodinâmicos, que englobam a resistência ao calor sensível e ao vapor de água no ar, e a resistência da superfície para descrever a transferência de vapor de água entre a superfície e a atmosfera, sendo está descrita da seguinte forma:

$$\lambda \tilde{E}T_0 = \frac{\delta(\check{R}_n - \check{G}) + \rho c_p (e_a - e_d) 1/r_a}{\delta + y(1 + r_c/r_a)} \quad (4.2)$$

onde: $\lambda \tilde{E}T_0$ é o fluxo de calor latente da evaporação ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), \check{R}_n é o fluxo de radiação líquida da superfície ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), \check{G} o fluxo de calor do solo ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), ρ a densidade atmosférica (kg m^{-3}), c_p o calor específico do ar ($\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$), $e_a - e_d$ é o déficit de pressão de saturação de vapor (kPa), r_c a resistência do dossel de vegetação (s m^{-1}), r_a a resistência dinâmica do ar (s m^{-1}), δ a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{kPa} \text{°C}^{-1}$), y a constante psicrométrica ($\text{kPa} \text{°C}^{-1}$), e λ é o calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}).

4.3. Indicadores socioeconômicos

4.3.1. Mapas de uso e cobertura da terra

Para a confecção dos mapas de uso e cobertura da terra foram utilizadas 90 imagens TM-Landsat, resolução espacial de 30 m, referentes aos meses de junho, julho e agosto de 2010 e de 2011.

Também foi utilizado como base de interpretação os mapas de uso e cobertura da terra do Projeto ProBio (Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica) (MMA, 2007), escala 1:500.000 e as imagens de alta resolução do Google Earth.

Por meio de interpretação visual de imagem foi gerado o mapa de uso e cobertura da terra, cujas classes são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Classes de uso e cobertura da terra

Classes	Descrição
Floresta perene	Incluem as áreas de floresta ombrófila densa e aberta
Floresta decídua	Incluem as áreas de floresta estacional Semidecidual e floresta estacional e Decidual
Cerrado	Vegetação xeromórfica. Nesta categoria, está incluída o cerradão, campo-cerrado, savana parque, savana gramíneo lenhosa
<i>Caatinga</i>	Incluem todas as formações de savana estépica: florestada, arborizada, parque e gramíneo lenhosa
Pioneira aluvial	A vegetação se desenvolve sobre terraços Alagáveis temporariamente. Ex. Carnaúbas
Pioneira fluviomarinha	Esta classe refere-se ao manguezal onde cresce uma vegetação especializada adaptada à salinidade da água
Restinga	Comunidade vegetal que recebe influência direta da água do mar apresentando como gênero característico das praias. Ex. Remirea e Salicornia que atingem as dunas contribuindo para fixa-las
Baixada Maranhense	Áreas de planícies baixas que alagam na estação das chuvas criando enormes lagoas
Complexo Campo Maior	Vegetação herbácea predominante. Presença de carnaubais em planícies inundáveis. Nas partes mais altas que não são inundáveis há vegetação arbustivo arbórea com elementos de cerrado

Tabela 4.2 - Conclusão

Agropecuária	Incluem áreas de pastagem e agricultura em diversos estágios de desenvolvimento
Agricultura	Áreas de cultivos agrícolas. Inclui todas as terras cultivadas, caracterizadas pelo delineamento de áreas cultivadas. Encontra-se inseridos nesta categoria lavouras temporárias, permanente
Afloramento rochoso	Superfícies cobertas por rochas
Duna	Incluem dunas de área contidas na faixa Litorânea
Carcinicultura	Áreas de criação de camarões em Cativeiro
Salinas	Área de produção de sal marinho
Praia	Área coberta ou descoberta periodicamente pela água acrescida da faixa subsequente de material detrítico, tal como areais, cascalhos, seixos e pedregulhos até o limite onde a vegetação natural, ou, em sua ausência, onde comece um outro ecossistema
Área urbana	Estão incluídas nesta categoria as metrópoles, cidades, vilas, áreas ocupadas por indústrias e comércio e instituições que podem em alguns casos encontrar-se isolados das áreas urbanas
Corpos d'água	Incluem todas as classes de águas interiores e costeiras, lagos e reservatórios artificiais além das lagoas costeiras ou lagoas, estuários e baías

4.3.2. Densidade de populacional rural

Os dados de densidade de população rural foram extraídos a partir dos censos dos anos 2000 e 2010 do IBGE, disponíveis no endereço <http://censo2010.ibge.gov.br/apps/atlas/>. A área considerada para o cálculo da densidade foi a da malha municipal do ano de 2010. Neste caso, optou-se por utilizar somente a população rural devido ao fato dessa ser a que faz mais uso da terra para agricultura e pastoreio, entre outras atividades.

4.3.3. Densidade de pecuária

Os dados de densidade de pecuária foram obtidos com base no número total de bovinos e de caprinos por município, em 2000 e em 2010, e foram extraídos dos censos agropecuários do IBGE.

4.3.4. Densidade de focos de queimada

Os dados de focos de queimada foram extraídos do projeto de monitoramento de incêndios do INPE (<http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/>) para dois períodos: 2000, que corresponde à média anual do número de focos de queimada ocorridos entre 1999 a 2003, e para o ano de 2010, que é o resultado da média para o período de 2008 a 2012. Para converter os dados pontuais para superfícies contínuas, foi aplicada a densidade de Kernel usando um raio de 50 km (KOUTSIAS et al. de 2004; DE LA RIVA et al., 2004). Este estimador melhora a visualização e permite a comparação com outras variáveis ambientais (SILVERMAN, 1986).

4.3.5. Índice de desenvolvimento humano (IDH)

Os indicadores de IDH para os anos de 2000 e 2010 foram obtidos da Fundação João Pinheiro (<http://fjp.mg.gov.br/index.php/produtos-e-servicos1/2610-indice-de-desenvolvimento-humano-idh-2>).

Dados sobre a população, bem como IDH, são essenciais para o entendimento das dinâmicas territoriais. O cálculo do IDH inclui três tipos de informações:

longevidade, educação e renda. A escala de IDH varia de 0 a 1, em que os valores de 0 a 0,49 representam IDH muito baixo, 0,5 - 0,59 baixo, 0,60 - 0,69 médio, 0,70 - 0,79 alto e 0,8 a 1,0 muito alto.

4.3.6. Unidades de conservação

Os dados de unidades de conservação foram obtidos do MMA. Ressalta-se que para o presente estudo, o número de unidades de conservação (UC) em 2000 e 2010 não se alterou.

Existem duas categorias básicas de UC's: UC integral e de uso sustentável. No primeiro tipo a utilização dos recursos naturais é proibida. Este grupo inclui os parques nacionais, estações ecológicas, reservas biológicas e santuários da vida selvagem. O segundo tipo de UC inclui florestas nacionais, reservas extrativistas e reservas de desenvolvimento sustentável. Neste tipo de unidade, o uso sustentável e a gestão dos recursos naturais são permitidos de forma controlada (ROCCO, 2002).

4.4. Índice de área ambientalmente sensível (do inglês ESAI)

O mapeamento das áreas susceptíveis à degradação/desertificação é adaptado da metodologia do MEDALUS (KOSMAS et al., 1999) e também da metodologia do trabalho de Crepani et al. (1996), de onde foram retirados a maioria dos pesos de vulnerabilidade à perda do solo. Os índices são resultantes da combinação de indicadores de desertificação, que dependem da geologia, pedologia, manejo, ocupação humana, políticas de conservação e dados sociais (Figura 4.1).

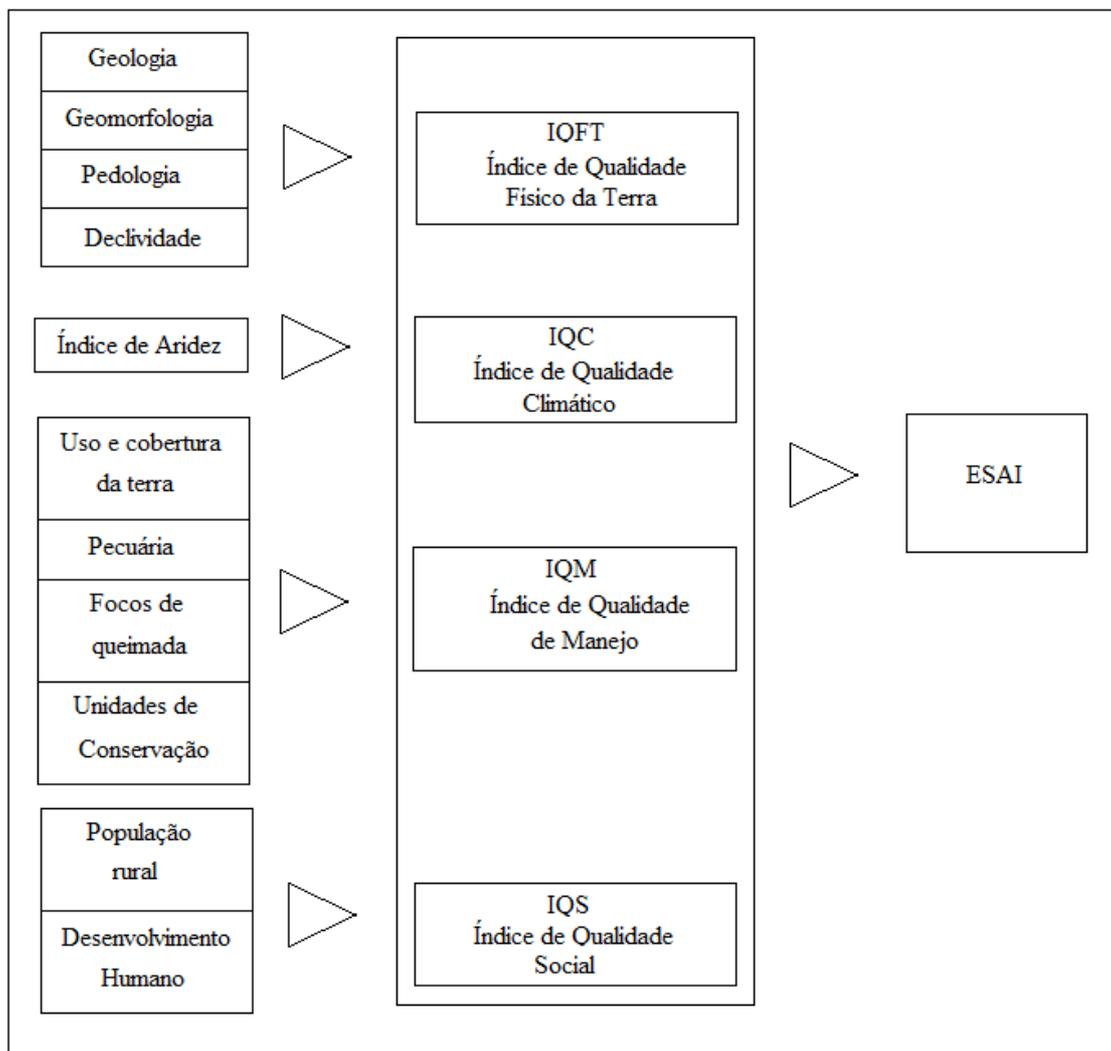


Figura 4.1 - Combinação de indicadores para determinação do ESAI.

Fonte: Adaptado de Benabderrahmane e Chenchouni (2010).

Os mapas são agrupados em quatro índices de qualidade (KOSMAS et al., 1999), que posteriormente são cruzados para gerar os mapas de susceptibilidade (MS).

- Índice de Qualidade Física do Terreno (*IQFT*):

$$IQFT = [I_s I_g I_{gm} I_d]^{1/4} \quad (4.3)$$

em que I_s é o MS do solo, I_g é o MS da geologia, I_{gm} é o MS da geomorfologia e I_d é o MS referente a declividade.

- Índice de Qualidade Climática (*IQC*):

$$IQC = I_A \quad (4.4)$$

em que I_A é o MS do índice de aridez

- Índice de Qualidade de Manejo (*IQM*):

$$IQM = [I_{uc} I_p I_{fq} I_{ucob}]^{1/4} \quad (4.5)$$

sendo I_{uc} o MS das unidades de conservação, I_p o MS da densidade pecuária, I_{fq} o MS da densidade de fogo e I_{ucob} o MS do uso e cobertura da terra.

- Índice de Qualidade Social (*IQS*):

$$IQS = [IDH I_{Pop}]^{1/2} \quad (4.6)$$

em que IDH é o MS do índice de desenvolvimento humano e I_{Pop} é o MS de densidade da população rural.

Todo o banco de dados foi desenvolvido usando o software SPRING (CÂMARA, et al., 1996).

Os mapas referentes à susceptibilidade, de cada um dos indicadores, podem ser visualizados no Anexo 1.

Finalmente, para determinar as ESA's, é calculada a média geométrica entre os quatro índices, por meio da seguinte equação:

$$ESAI = [IQFT \ IQM \ IQC \ IQS]^{1/4} \quad (4.6)$$

Com base neste cálculo, três tipos de ESA's são determinados: (a) áreas de baixa susceptibilidade (ESA entre 1,00 \geq 1,25), áreas de susceptibilidade moderada (ESA entre 1,25 \geq 1,50) e áreas de alta susceptibilidade (ESA > 1,50).

4.5. Validação

Tão importante quanto gerar o mapa de susceptibilidade, é preciso garantir a qualidade do produto. Assim, foram realizados testes estatísticos para avaliar a classificação do MS.

No presente estudo, o MS de 2010 foi validado utilizando-se o método proposto por VAN GENDEREN et al. (1978). O método tem como finalidade aplicar testes de exatidão, em mapeamentos temáticos oriundos de imagens de sensoriamento remoto. Para isso, assume-se que a probabilidade de fazer f erros de interpretação quando se extraem x amostras, obedece a uma função de distribuição binomial de probabilidade.

A partir dessa metodologia é possível determinar o tamanho da amostra mínima necessária para validar um mapa, evitando o risco de aceitar um mapa com exatidão menor que a mínima desejada (risco do consumidor), e à probabilidade de rejeitar um mapa de exatidão (risco do produtor).

Ressalta-se que no presente trabalho foi definido um número de amostra contendo 110 pontos, distribuídos aleatoriamente sobre a classe de alta susceptibilidade. Esses pontos posteriormente foram conferidos individualmente nas imagens de alta resolução do *Google Earth* (GINEVAN, 1979; CONGALTON GREEN, 1999), observando-se se os mesmos estavam

sobre áreas degradadas de solo exposto, afloramento rochoso, área com pouca vegetação ou vegetação herbácea, etc.

Método - Parte II

A etapa II do trabalho refere-se à modelagem de mudanças de uso da terra inserida no escopo do trabalho com a finalidade de gerar cenários de mudanças de uso da terra que, posteriormente, serão inseridos no modelo descrito na parte I para gerar cenários de susceptibilidade à degradação/desertificação até o ano de 2040.

4.6. Modelo de simulação de mudança de uso da terra

Para o desenvolvimento de um modelo de mudanças de uso da terra para o semiárido brasileiro no contexto do presente trabalho, optou-se por utilizar o arcabouço de modelagem de mudanças de uso da terra espacialmente explícita LuccME (AGUIAR et al., 2012). O LuccME é uma plataforma genérica que disponibiliza diferentes componentes de demanda, potencial e alocação, de acordo com a generalização de modelos LUCC proposta por Verburg et al. (2006), como discutido na Seção 2.5.

Visando subsidiar a modelagem, foi construído um banco de dados celular, com espaço celular de 5 x 5 Km², em ambiente Terralib, com dados de usos e cobertura da terra referentes aos anos de 2000 e 2010. Essas variáveis foram selecionadas de acordo com o seu potencial para acelerar o processo de degradação/desertificação e com base nas que já haviam sido inseridas na etapa I.

4.6.1 Dados de uso e cobertura da terra

Os dados de uso e cobertura da terra, considerados como variáveis dependentes, foram: vegetação, agricultura e pastagem.

No caso da vegetação, optou-se por agregar as classes de cobertura vegetal com vistas a facilitar e agilizar o processamento dos dados e análises

estatísticas. Considerando que o mapa ainda continha algumas classes que não foram consideradas no modelo, estas foram agrupadas em uma classe denominada outros. A Tabela 4.3 ilustra o agrupamento das classes.

Tabela 4.3 Agrupamentos das classes de uso e cobertura da terra

Uso e Cobertura da Terra (SAP)	Uso e Cobertura da Terra LuccME
Floresta Perene Floresta Decídua Caatinga Cerrado Pioneira Aluvial Pioneira Fluvial Complexo Campo Maior Baixada Maranhense	VEGETAÇÃO (VEGN)
Agropecuária	PASTAGEM (P)
Agricultura	AGRICULTURA (AG)
Area Urbana Duna Água Solo Exposto Carcinicultura Salina Praia	OUTROS (O)

Após organizar e confeccionar o banco de dados iniciou-se uma nova etapa no processo de refinamento dos dados, com o objetivo de calcular variáveis relativas referentes a cada um dos fatores. Para isso, foi utilizado o TerraView, que possui um *plugin* de células capaz de gerar diversas operações espaciais, como: 1) distância mínima entre as células, 2) presença que indica se determinada variável está contida ou não na célula, etc.

As listas com as variáveis e operações que melhor explicam cada uma das variáveis dependentes são apresentadas nas Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8.

A seguir, são descritas as componentes de demanda, alocação e potencial do LuccME utilizados para a construção do modelo LuccME/NEB no contexto do presente trabalho.

4.6.2. Componente de demanda

Através da componente de demanda é calculada a quantidade de mudança para cada transição, ou seja, o quanto vai poder mudar. Existem várias formas de calcular a demanda. Uma delas consiste na extrapolação de tendências, que considera as taxas de mudanças ocorridas no passado para calcular as mudanças que ocorrerão no futuro. Outra forma de definir a demanda é por meio da construção de cenários, que permite simular diferentes realidades frente a diversas alterações. Dessa forma, no presente trabalho a demanda foi calculada para o período 2000-2010 (calibração/validação do modelo) levando-se em consideração a diferença em área (km²) de cada uma das classes de uso e cobertura da terra e redistribuída igualmente para cada ano. Já para o período 2010-2040, foi considerada a área (km²) de cada uma das classes de uso e cobertura da terra e redistribuída igualmente a cada ano levando-se em consideração cada um dos cenários descritos na seção 4.6.6.

4.6.3. Componente de alocação

O componente de alocação, AllocationClueLike, utilizado no modelo LuccME/NEB é baseado em componentes do modelo CLUE (Verburg et al., 1999) implementado por Aguiar et al. (2012). O componente de alocação baseia-se na alocação contínua (VERBURG et al., 1999), em que as células com um potencial de mudança positiva recebem uma porcentagem da demanda anual projetada que deve ser alocada para toda a área, proporcionalmente ao seu potencial. Esta versão também tem alguns novos parâmetros para controlar a quantidade de mudança em cada célula,

considerando o nível de saturação. Através do atributo maxdifference é possível informar a quantidade máxima de erro (percentual), resultante da diferença entre a área alocada e a demanda para determinado espaço de tempo.

4.6.4. Parametrização do Componente de Potencial

Esse módulo é responsável por responder onde ocorrerão as mudanças, e para que essas ocorram é preciso existir uma forte relação entre as mudanças e as variáveis espaciais. Sendo assim, nessa etapa foram selecionadas as seguintes variáveis:

VARIÁVEIS INDEPENDENTES

- População (POP)
- Hidrografia - (São Francisco, Parnaíba)
- Sedes (Aracajú (SE), Fortaleza (CE), João Pessoa (PB), Maceió (AL), Natal (RN), Recife (PE), Salvador (BA), São Luiz (MA), Teresina (PI))
- Declividade Baixa (DeclB)
- Declividade Alta_MuitoAlta (DeclAMA)
- Índice de Aridez SubÚmido (IASU)
- Índice de Aridez Úmido (IAUm)
- Índice de Aridez Semiárido (IASem)
- Sem Unidade de Conservação (SUC)
- Unidade de Conservação Sustentável (UCS)
- Unidade de Conservação Integral (UCI)
- Solo Baixa Vulnerabilidade (SBS)
- Solo Alta Vulnerabilidade (SAS)

Essa etapa do modelo é de fundamental importância para o sucesso da modelagem, uma vez que é nela que ocorre a escolha das variáveis explicativas com base nas suas relações com a variável dependente. Para cada célula é calculada a probabilidade de mudança de uso da terra que dependerá do seu maior ou menor potencial de transição (XIMENES et al., 2008). Assim sendo, no presente trabalho, através do plugin de células, foram determinadas as seguintes variáveis potenciais: proximidade dos cursos d'água (rios São Francisco e Parnaíba) e das sedes municipais (capitais), porcentagem de tipos de solo (alta, baixa e média susceptibilidade), de tipos climáticos (semiárido, subúmido seco, subúmido-úmido e úmido), de pecuária e população, e, distância a estradas. O cálculo dos intervalos nos mapas de distância é obtido por meio de uma operação muito similar a um fatiamento. Neste caso, foi considerado que quanto mais distante de rios e das sedes municipais, maior o potencial de desertificação. No caso da distância a estradas, o raciocínio foi inverso, pois quanto mais próximo maior as chances de degradação devido a facilidade de acesso e de queimadas. Os resultados desses mapas são utilizados para derivar os mapas de probabilidade de transição nas simulações, conforme detalhado a abaixo.

4.6.5 Processo de análise exploratória e análises estatísticas

Primeiramente, foi realizada, uma análise de correlação, a partir do software R, para escolha de um conjunto de variáveis que melhor se adapta ao modelo, com um menor erro de generalização. Dessa forma, inseriu-se no modelo apenas as variáveis que apresentaram menos de 50% de correlação entre elas, conforme ilustrado na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Subconjunto de variáveis explanatórias potenciais.

	VegN2000_A	P2000_A	AG2000_A	Pop00	Hidro	Maq06	Sedes	Rodo	DeclB	Decliv_AMA	IASem	IA_UMSU	UCSus	UCIn	SAV	SBV
VegN2000_A	1.00	-0.81	-0.17	-0.23	0.02	-0.17	0.22	0.18	0.05	-0.02	-0.05	0.06	-0.02	0.13	0.13	-0.13
P2000_A	-0.81	1.00	-0.29	0.25	-0.03	0.21	-0.37	-0.26	-0.10	0.09	0.15	-0.12	0.03	-0.12	-0.05	0.05
AG2000_A	-0.17	-0.29	1.00	-0.05	-0.01	-0.04	0.29	0.11	0.16	-0.09	-0.15	0.16	-0.02	-0.03	-0.14	0.14
Pop00	-0.23	0.25	-0.05	1.00	0.02	0.38	-0.31	-0.22	-0.14	0.11	0.00	0.01	0.03	-0.07	-0.01	0.01
Hidro	0.02	-0.03	-0.01	0.02	1.00	0.02	0.01	0.03	-0.08	0.05	0.03	-0.05	-0.04	0.00	0.00	0.00
Maq06	-0.17	0.21	-0.04	0.38	0.02	1.00	-0.20	-0.16	-0.02	-0.03	0.24	-0.22	-0.01	-0.05	0.06	-0.06
Sedes	0.22	-0.37	0.29	-0.31	0.01	-0.20	1.00	0.53	0.19	-0.13	-0.14	0.13	-0.05	0.16	0.02	-0.02
Rodo	0.18	-0.26	0.11	-0.22	0.03	-0.16	0.53	1.00	0.05	-0.07	-0.15	0.11	-0.03	0.24	0.06	-0.06
DeclB	0.05	-0.10	0.16	-0.14	-0.08	-0.02	0.19	0.05	1.00	-0.59	0.13	-0.11	0.07	0.02	0.09	-0.09
Decliv_AMA	-0.02	0.09	-0.09	0.11	0.05	-0.03	-0.13	-0.07	-0.59	1.00	-0.11	0.12	-0.04	0.00	-0.10	0.10
IASem	-0.05	0.15	-0.15	0.00	0.03	0.24	-0.14	-0.15	0.13	-0.11	1.00	-0.76	-0.03	-0.03	0.13	-0.13
IA_UMSUB	0.06	-0.12	0.16	0.01	-0.05	-0.22	0.13	0.11	-0.11	0.12	-0.76	1.00	0.02	0.03	-0.12	0.12
UCSus	-0.02	0.03	-0.02	0.03	-0.04	-0.01	-0.05	-0.03	0.07	-0.04	-0.03	0.02	1.00	-0.02	0.02	-0.02
UCIn	0.13	-0.12	-0.03	-0.07	0.00	-0.05	0.16	0.24	0.02	0.00	-0.03	0.03	-0.02	1.00	0.06	-0.06
SAV	0.13	-0.05	-0.14	-0.01	0.00	0.06	0.02	0.06	0.09	-0.10	0.13	-0.12	0.02	0.06	1.00	-1.00
SBV	-0.13	0.05	0.14	0.01	0.00	-0.06	-0.02	-0.06	-0.09	0.10	-0.13	0.12	-0.02	-0.06	-1.00	1.00

Após a análise exploratória das variáveis foi realizada a autocorrelação espacial, que pode ser entendida como a tendência que um valor de uma variável, associada a uma determinada localização, assemelha-se mais aos valores de suas observações vizinhas do que ao restante das localizações do conjunto amostral (CLIFF E ORD, 1981). Assim, para analisar a correlação espacial foi aplicada a regressão *spatial lag* (ANSELIN, 2001).

Na regressão espacial existe um termo de dependência que inclui a autocorrelação espacial ao modelo exploratório:

$$y = \beta WY + X\beta + \varepsilon \quad (4.6)$$

em que: Y é a matriz de proximidade espacial, WY expressa a dependência espacial sobre Y e β é o coeficiente auto regressivo espacial (Bailey and Gatrell, 1995). Assim, o modelo considera que o processo espacial cujas observações estão sendo analisadas é estacionário. Isto implica que os padrões de autocorrelação espacial podem ser capturados em um único termo de regressão.

O conjunto de indicadores selecionados para explicar cada uma das variáveis dependentes, bem como os valores dos coeficientes de regressão, são apresentados nas Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7.

4.6.6 Calibração e validação do modelo de mudança do uso da terra

Nesta etapa foram definidas as transições de uso no componente de alocação do modelo LuccME/NEB. A compreensão da dinâmica de conversão é essencial para a definição destes parâmetros. O valor -1 da matriz indica que a mudança ocorre para uma única direção (a mudança pode somente aumentar ou diminuir). Quando o valor da matriz é 0 o uso pode tanto aumentar quanto diminuir e se é 1 não ocorrerá mudança. Devido ao fato da área de estudo apresentar alta complexidade em relação à regeneração da vegetação, agricultura de subsistência nômade e pastagem extensiva, a matriz de transição ficou com valor 0 para as 3 classes consideradas (vegetação, agricultura e pastagem).

Nesta fase também foi realizado diversos testes para definir a porcentagem mínima e máxima de erro permitida pelo modelo, limiares máximo e mínimo de mudança até saturação e após saturação da célula. Os valores finais desses testes encontram-se descritos nas Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8.

Com o modelo calibrado, o próximo passo foi realizar a validação para quantificar os erros de alocação, com base em análises de multiresolução (COSTANZA, 1989; PONTIUS, 2002). Esse tipo de análise é aplicado em diversas resoluções espaciais por meio de mudança de tamanho de janelas de amostragem. Essas janelas percorrem as duas cenas (simulado e real) identificando células que pertencem à mesma classe. Quando as células são idênticas, um diagrama relacionado ao ajuste da janela irá fornecer uma linha reta. No entanto, se as cenas forem diferentes essa linha gradualmente vai aumentando até chegar ao valor 1, que indica que as janelas de amostragens são iguais (Figura 4.2).

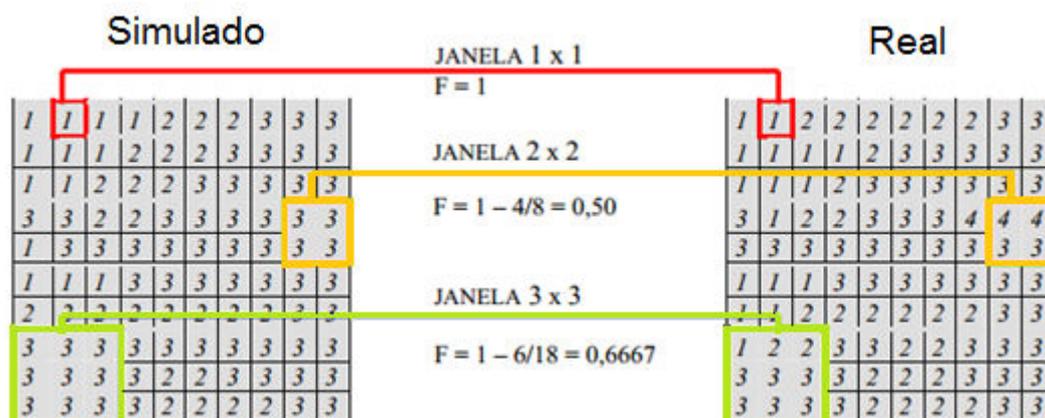


Figura 4.2 – Exemplo do método de resolução múltipla para uma cena 10 x 10 com quatro classes.

Fonte: COSTANZA (1989)

Essa janela varre as duas cenas (real e simulada) verificando o número de células pertencentes à classe i na cena da imagem simulada e o número de classe pertencente à classe i na cena da imagem real.

4.6.7 Cenários de mudança de uso e cobertura da terra

Essa etapa do trabalho tem como meta a exploração de cenários futuros (2011 a 2050) para gerar prognósticos dos impactos na dinâmica do uso e cobertura da terra frente ao aumento da população rural e alterações no índice de aridez.

A adoção de variações nas projeções de dados populacionais e no índice de aridez deve-se ao aumento da população observado nos últimos censos demográficos, e também nas simulações dos modelos climáticos que apresentam cenários cada vez mais secos para a região do semiárido brasileiro.

4.6.7.1 Projeção de crescimento de população

O método utilizado para realizar a projeção das populações é baseado na análise de tendência (MADEIRA E SIMÕES, 1972), do censo demográfico de 2010 do IBGE, que leva em consideração à mortalidade, fecundidade e

migração. As projeções têm início em 2000 e vão até 2030. O método é representado pela equação de equilíbrio populacional.

$$\text{Crescimento Populacional} = \frac{(\text{nascimento} + \text{imigração}) - (\text{mortalidade} + \text{Emigração})}{\text{Tamanho da população}}$$

Esta equação demonstra claramente que as entradas em uma população dão-se apenas através dos nascimentos e da imigração, e as saídas através dos óbitos e da emigração. Após 2030 assumiu-se, para o presente trabalho, uma tendência linear até o ano de 2040.

4.6.7.2 Projeção do índice de aridez

Os cenários futuros do índice de aridez foram obtidos do modelo climático regional ETA/CPTEC do INPE. O modelo foi configurado sobre a América do Sul utilizando as condições de contorno do modelo global acoplado oceano-atmosfera HadCM3 do MetOffice do Reino Unido (CHOU et al., 2010). As saídas dos modelos globais de clima (acoplados atmosfera-oceano) contêm informações sobre os cenários SRES, que foram implementados pelo IPCC-A2 (Altas emissões ou pessimista) e IPCC-B2 (baixas emissões ou otimistas). Ambos cenários levam em consideração o crescimento populacional e situações relacionadas às diferenças regionais (IPCC, 2001). Especificamente para o cenário da família A1B, parte-se do princípio de que haverá um equilíbrio entre os combustíveis fósseis e outras fontes de energia, sendo considerado um cenário intermediário entre os A2 e B2 (MARENGO, 2007). O modelo Eta-CPTEC oferece quatro cenários de sensibilidade, alta, média, baixa e sem perturbação, sendo que no presente trabalho foi usado o cenário sem perturbação ou controle. O índice de aridez foi calculado a partir das simulações do modelo ETA-CPTEC para 2040, com resolução de 40 km (CHOU et al., 2010).

Com base no modelo de mudanças de uso e cobertura da terra, mencionado no item 2.5, foram gerados dois cenários de mudanças, sendo um pessimista,

chegando praticamente à exploração total de todo o potencial existente, e o outro otimista, que mantém as tendências de desmatamento das últimas décadas, mas não se chega a uma exploração de todo potencial socioeconômico e social. Para construir os cenários foi necessário calcular as demandas, levando em consideração a taxa de desmatamento estimada para cada um dos cenários.

Na Tabela 4.5 são detalhadas as principais características levadas em consideração para a elaboração de cada um dos cenários.

Tabela 4.5 - Descrição dos contextos socioeconômicos e ambientais considerados nos cenários.

Cenário Pessimista	Cenário Otimista
<p>Existe desenvolvimento socioeconômico e ambiental. A agricultura e agropecuária são as atividades em expansão. Neste cenário a vegetação chega a sofrer uma diminuição, no ano de 2050, de 22%, em relação a 2011 restando apenas 3% de floresta nativa.</p>	<p>A partir de 2011 perde-se 2% de remanescente de vegetação em relação ao ano anterior até 2050. É mantida a proporção de 10% de agricultura e 90% de pastagem da área restante.</p>

Tabela 4.6 Parâmetros do Modelo LuccME considerados para a classe vegetação

Geral	Escala Espacial	Extensão	Semiárido Brasileiro (Limite SUDENE)	
		Resolução	Célula Regular 5 x 5 km ²	
	Escala Temporal	Extensão	2010-2050	
		Resolução	Anual	
		Calibration	2000-2010 (SAP)	
		Validation	2000-2010 (SAP)	
	Classes de uso e cobertura da terra	porcentagem de vegetação em cada célula		
Potencial	Indicador Selecionado Vegetação		Descrição da Variável	Coefficiente de Regressão
	W_%_vegetação		Spatial autoregressive coefficient	0.90937
	constant		Regression constant	0.02381185
	População		Porcentagem de cada célula	-0.0004082805
	Índice de Aridez Úmido		Porcentagem de cada célula	-0.0109923
	Rodovias Pavimentadas		Distância Mínima	0.06073906
	Declividade Alta_MuitoAlta		Porcentagem de cada célula	0.06571585
	Unidade de Conservação Integral		Porcentagem de cada célula	0.03710305
	Solo Alta Vulnerabilidade		Porcentagem de cada célula	0.02376068
Índice de Aridez Semiárido		Porcentagem de cada célula	0.004283214	
Alocação	Principais Parâmetros (submodelo alocação)		Descrição	Valores
	Erromax		Erro de alocação máxima permitida para cada uso do solo	500 km ²
	Parâmetros específicos de uso da			Vegetação
	Valormin		Valor mínimo (em porcentagem) permitido para mudanças de uso	0%
	Valormax		Valor máximo (em porcentagem) permitido para mudanças de uso	95%
	Limearmudança		Utilizado para definir a velocidade da mudança de um determinado uso do solo na célula que é modificado.	10%
	Maxmudança		Variação Máxima permitida em uma célula em um intervalo de tempo até (saturação) limiar	1%
Limearmaxalteração		Variação máxima permitida em uma célula em um intervalo de tempo após (saturação) limiar	1%	
Demanda	Componente LuccME: ValoresPreComputados			

Tabela 4.7 Parâmetros do Modelo LuccME considerados para a classe agricultura

Geral	Escala Espacial	Extensão	Semiárido Brasileiro (Limite SUDENE)	
		Resolução	Célula Regular 5 x 5 km ²	
	Escala Temporal	Extensão	2010-2050	
		Resolução	Anual	
		Calibration	2000-2010 (SAP)	
		Validation	2000-2010 (SAP)	
	Classes de uso e cobertura da terra	porcentagem de agricultura em cada célula		
Potencial	Indicador Selecionado Agricultura		Descrição da Variável	Coeficiente de
	W_%_vegetação		Spatial autoregressive coefficient	0.921374
	constant		Regression constant	-0.038332
	Índice de Aridez semiárido		Porcentagem de cada célula	-0.006074408
	Sem Unidade de Concservação		Porcentagem de cada célula	0.01204051
	Declividade Baixa		Porcentagem de cada célula	0.02585645
	Rios		Distância Mínima	0.001957364
	Sedes		Distância Mínima	0.001135578
Solo Baixa Vulnerabilidade		Porcentagem de cada célula	0.01907469	
Alocação	Principais Parâmetros (submodelo alocação)		Descrição	Valores
	Erromax		Erro de alocação máxima permitida para cada uso do solo	500 km ²
	Parâmetros específicos de uso da terra			Agricultura
	Valormin		Valor mínimo (em porcentagem) permitido para mudanças de uso	0%
	Valormax		Valor máximo (em porcentagem) permitido para mudanças de uso	95%
	Limearmudança		Utilizado para definir a velocidade da mudança de um determinado uso do solo na célula que é modificado.	10%
	Maxmudança		Varição Máxima permitida em uma célula em um intervalo de tempo até (saturação) limiar	1%
Limearmaxalteração		Varição máxima permitida em uma célula em um intervalo de tempo após (saturação) limiar	1%	
Demanda	Componente LuccME: ValoresPreComputados			

Tabela 4.8 Parâmetros do Modelo LuccME considerados para a classe pastagem

Geral	Escala Espacial	Extensão	Semiárido Brasileiro (Limite SUDENE)	
	Escala Temporal	Resolução	Célula Regular 5 x 5 km ²	
		Extensão	2010-2050	
		Resolução	Anual	
		Calibration	2000-2010 (SAP)	
	Validation	2000-2010 (SAP)		
	Classes de uso e cobertura da terra	porcentagem de pastagem em cada célula		
Potencial	<i>Indicador Selecionado pastagem</i>		<i>Descrição da Variável</i>	<i>Coefficiente de Regressão</i>
	<i>W_%_vegetação</i>		Spatial autoregressive coefficient	0.8875689
	<i>constant</i>		Regression constant	0.08028608
	<i>População</i>		Porcentagem de cada célula	0.0004075524
	<i>Rodovia Pavimentada</i>		Porcentagem de cada célula	-0.06773501
	<i>Declividade Alta_MuitoAlta</i>		Distância Mínima	-0.1513967
	<i>Índice de Aridez Semiárido</i>		Porcentagem de cada célula	0.004615728
	<i>Sedes</i>		Distância Mínima	0.005017514
	<i>Sem Unidade de Conservação</i>		Porcentagem de cada célula	0.03251298
	<i>Unidade de Conservação Sustentavel</i>		Porcentagem de cada célula	0.03691434
	<i>Declividade Baixa</i>		Porcentagem de cada célula	0.009080898
	<i>Rios</i>		Distância Mínima	0.004178492
Alocação	<i>Principais Parâmetros (submodelo alocação)</i>		<i>Descrição</i>	<i>Valores</i>
	Erromax		Erro de alocação máxima permitida para cada uso do solo	500 km ²
	Parâmetros específicos de uso da terra			Pastagem
	Valormin		Valor mínimo (em porcentagem) permitido para mudanças de uso	0%
	Valormax		Valor máximo (em porcentagem) permitido para mudanças de uso	95%
	Limearmudança		Utilizado para definir a velocidade da mudança de um determinado uso do solo na célula que é modificado.	10%
	Maxmudança		Varição Máxima permitida em uma célula em um intervalo de tempo até (saturação) limiar	1%
	Limearmaxalteração		Varição máxima permitida em uma célula em um intervalo de tempo após (saturação) limiar	1%
Demanda	Componente LuccME: ValoresPreComputados			

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentam-se os resultados referentes à identificação das áreas que são potencialmente mais susceptíveis à desertificação na região do semiárido do Brasil.

Como informação inicial, apresentam-se nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 os pesos atribuídos a cada um dos indicadores utilizados para gerar os índices de qualidade.

Tabela 5.1 - Classes e pesos de susceptibilidade dos indicadores utilizados para obtenção do índice de qualidade IQFT.

Classes de susceptibilidade	Geomorfologia	Pesos
Baixa	Formações estruturais de topos tabulares, terraços. A rugosidade do relevo se caracteriza por ser fracamente dissecada; relevo plano e superfície aplainada sem intensa ação erosiva (pediplanos)	1, 00
	Formas de relevo plano a convexo; a rugosidade do relevo é caracterizada por ser moderadamente dissecado; superfície aplainada com ação erosiva significativa; relevo ligeiramente ondulado, com declives suaves (colinas baixas e suaves)	1, 25
Moderada	Formas de topos convexos; a rugosidade do relevo é caracterizada por ser moderadamente dissecada; relevo ondulado, com declives acentuados (morros de maior declive)	1, 50
	Topos convexos a pontiagudos; a rugosidade do relevo se caracteriza por ser altamente dissecada; relevo fortemente ondulado, com declives muito íngremes, formas cársticas (relevo em calcário)	

Continua

Continuação da Tabela 5.1

Alta	Relevo que apresenta vales encaixados e com topos muito aguçados; perfis íngremes de declive; a rugosidade do relevo se caracteriza por ser altamente dissecada; colúvios; depósito eólicos (relevos escarpados, serras, dunas)	1, 75
Geologia		
Baixa	Quartzito, metaquartzito, formação ferrífera bandada, metagranodiorito, metatonalito	1,00
	Riólito, granito, dacito, metassienogranito, metamonzogranito, sienogranito, magnetito, metadiorito, metagabro	1, 05
	Granodiorito, quartzo-diorito, granulito	1, 10
	Migmatito, gnaisses, ortognaisse	1, 15
	Nefelina sienito, traquito, quartzo-monzonito, quartzo-sienito	1, 20
	Andesito, basalto	1, 25
	Gabro, anortosito	1, 30
Moderada	Biotita, quartzo-muscovita, itaberito, metabasito, mica xisto	1, 35
	Anfibolito, kimberlito	1, 40
	Hornblenda, tremolita	1, 45
	Xisto	1, 50
Alta	Filito, metassiltito	1, 55
	Ardósia, metargilito	1, 60
	Mármore	1, 65
	Arenitos quartzosos, ortoquartzitos	1, 70
	Conglomerados	1, 75
	Subgrauvacas, Grauvacas, Arcózios	1, 80
	Siltito, argilitos, Calcilito	1, 85
	Folhelhos	1, 90
	Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	1, 95
	Sedimentos inconsolidados: aluviões, colúvios etc.	2, 00

Continua

Conclusão Tabela 5.1

Tipos de solos (EMBRAPA, 1999)		
Baixa	Latossolos, solos orgânicos, solos hidromórficos e húmicos	1, 00
Moderada	Solos Podzólico, brunizém, planossolos, structured terra roxa estruturada	1, 33
Alta	Cambissolo Solos não-coesivos, solos imaturos, laterita, afloramento rochoso	1, 66
		2, 00
Declividade (%)		
Baixa	2 - 6	1, 00
Moderada	6 - 18	1, 50
Alta	> 18	2, 00

Tabela 5.2 - Classes e pesos de susceptibilidade dos indicadores utilizados para gerar o índice de qualidade - IQM.

Uso e cobertura da terra		
Classes de Susceptibilidade	classes	Pesos
Baixa	Floresta perene, corpos d'água, praias, áreas urbanas	1, 00
	Floresta decidua	1, 40
	Restinga	1, 45
Moderada	Savanna (Cerrado), pioneira fluvio-marinha, pioneira aluvial	1, 50
	Complexo Campo Maior, Baixada Maranhense	1, 55
	<i>Caatinga</i>	1, 60
	Carcinicultura, pastagem	1, 80
	Agricultura	1, 90
Alta	Solo exposto, dunas, afloramento rochoso	2, 00

Continua

Conclusão Tabela 5.2

Densidade de Pecuária		
Baixa	0 a 30	1, 00
Moderada	30 a 75	1, 50
Alta	acima 75	2, 00
Densidade de focos de queimada		
Baixa	0 a 1,00	1, 00
Moderada	1,000 a 2,00	1, 50
Alta	acima de 2,00	2, 00
Unidades de Conservação		
Baixa	Unidade de conservação integral	1, 00
Moderada	Unidade de conservação de uso sustentável	1, 50
Alta	Sem unidade de conservação	2, 00

Tabela 5.3 - Classes e pesos de susceptibilidade dos indicadores utilizados para gerar o índice de qualidade climática - IQC.

Classe de susceptibilidade	Tipos de clima	Pesos
Baixa	Subúmido-úmido e úmido (IA acima 0, 65)	1, 00
Moderada	Subúmido - seco (IA entre 0,51 a 0, 65)	1, 50
Alta	Semiárido (IA entre 0, 21 a 0, 50)	2, 00

Tabela 5.4 - Classes e pesos dos indicadores utilizados para gerar o índice de susceptibilidade IQS.

Índice de desenvolvimento Humano (IDH)		
Classes de susceptibilidade	por município	Pesos
Baixa	0,70 a 1,00	1, 00
Moderada	0, 60 a 0, 70	1, 50
Alta	0 a 0, 60	2, 00
Densidade de população rural		
Baixa	0 a 25	1, 00
Moderada	25 a 50	1, 50
Alta	acima 50	2, 00

Após atribuição dos pesos, foram obtidos os mapas de susceptibilidade para cada um dos indicadores, conforme ilustrado no Anexo A1. Ressalta-se que cada um dos 11 mapas foi posteriormente combinado, conforme ilustrado no Capítulo 4, Figura 4.1, para obtenção dos índices de qualidade (Figura 5.1).

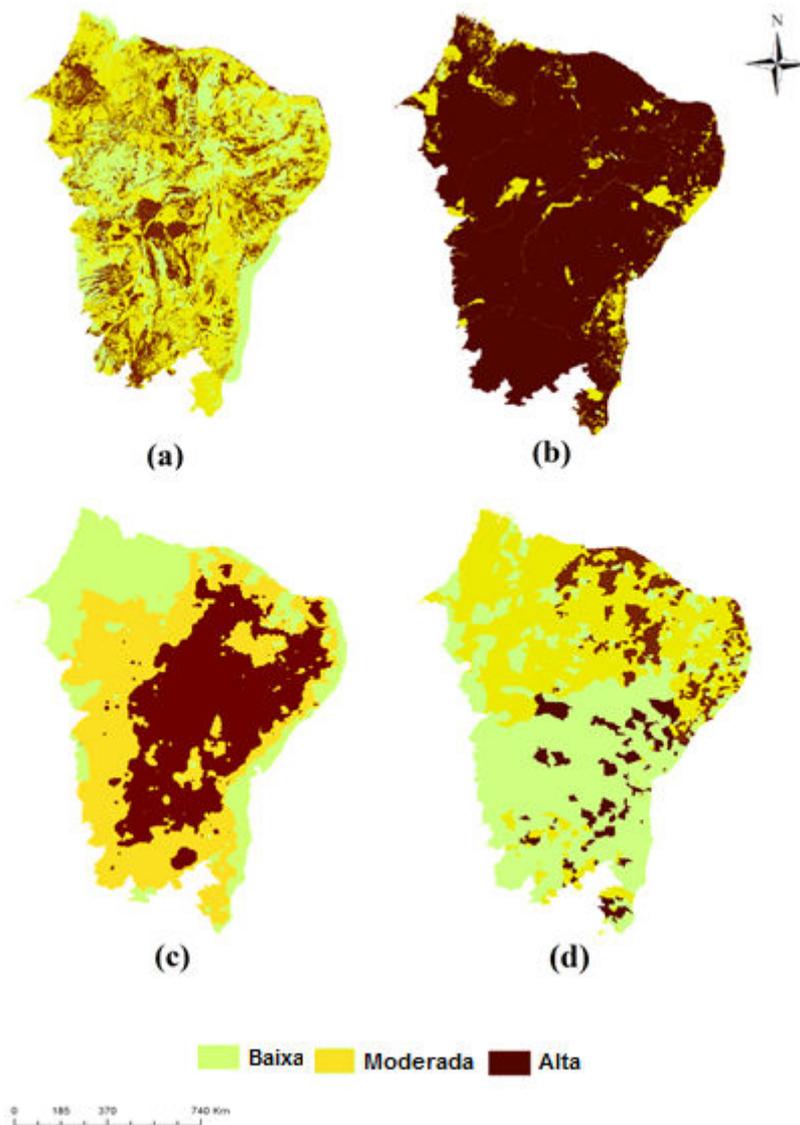


Figura 5.1 – (a) Índice de qualidade física do terreno; (b) índice de qualidade de manejo; (c) índice de qualidade climática; (d) índice de qualidade social.

5.1. Índice de qualidade físico do terreno (IQFT)

Para avaliação da fragilidade ambiental, foram combinados os mapas de solo, geologia, geomorfologia e declividade.

Em termos de tipos de solo, as porções sul e nordeste da região são em grande parte cobertas por solos podzólico (23%), os quais são mais propensos à erosão devido a baixa permeabilidade do horizonte B argiloso. Os solos litossolos (21%) ocorrem na região semiárida, associado a afloramentos rochosos. Por último, os latossolos (18%) dominam a região noroeste, associada com vegetação de savana, onde o relevo é de planície, que favorece a agricultura mecanizada e, conseqüentemente, são áreas com maior propensão a compactação do solo (CAVALIERE et al., 2006; ARAÚJO, et al., 2007) e a criação de gado.

Em conformidade com a distribuição espacial do índice de qualidade física do terreno (Figura 5.1a), as áreas com alta susceptibilidade atualmente ocupam 23% da região e estão mais concentradas na porção noroeste e centro sul da área de estudo. Já as áreas de susceptibilidade moderada, estas ocupam 52% (Tabela 5.5) da região e estão distribuídas de forma mais uniforme por toda a região. As regiões de susceptibilidade moderada são muito utilizadas para a agricultura e pastagem e, portanto, merecem atenção quanto ao uso do solo.

5.1.1. Índice de qualidade climática (IQC)

Segundo o IQC (Figura 5.1c), 42% da área (Tabela 5.5) é caracterizada por clima semiárido (19%) e subúmido-seco (23%); portanto, são áreas consideradas altamente susceptíveis à desertificação do ponto de vista climático. Dos outros 58% da área, a maior parte (38%) é caracterizada por clima subúmido-úmido e 19% é de clima úmido, sendo essas áreas caracterizadas por baixa susceptibilidade à desertificação.

5.1.2. Índice de qualidade de manejo (IQM)

As análises das áreas, considerando um período de 11 anos, mostram um aumento de 3% da área com alta suscetibilidade entre 2000 e 2010 (Tabela 5.5). As áreas com alta suscetibilidade totalizaram 87% (1.571.033 km²) no ano

de 2000, ao passo que em 2010 o percentual aumentou para 90% (1.622.716 km²).

Entre os fatores que podem contribuir para o aumento da área de alta susceptibilidade destacam-se a criação de camarões, a agricultura, pecuária e focos de queimadas. A partir dos resultados de avaliação dos usos da terra observa-se que a vegetação natural foi substituída por pastagens e agricultura. Os resultados corroboram com aqueles encontrados por Vieira et al. (2013), que constataram que a vegetação típica do semiárido do Brasil, conhecida como *caatinga*, está sendo substituída por atividades agrícolas e de pastagem. Cerca de 40% da *caatinga* já foi convertida para esses usos, e a área restante está sendo transformada em uma taxa de 0,3% por ano conforme apresentado em IBAMA/MMA (2010).

O agronegócio tornou-se um dos segmentos mais dinâmicos nos Estados da região Nordeste, com destaque para a produção de frutas, como mamão, melão, uva, melancia, abacaxi e manga. Segundo projeções realizadas a mais de uma década pela FAO, o aumento de terras aráveis em países em desenvolvimento deve aumentar ainda mais, chegando a uma expansão de 41 milhões de hectares (20%) para a América Latina em 2030. Essa expansão deverá ocorrer pela conversão de florestas e bosques ou de áreas frágeis da zona do semiárido para áreas de cultivo (FAO, 2001).

Outra atividade que vem se destacando na região do semiárido do Brasil está relacionada ao cultivo de camarão, que aumentou de 69,7 km² no ano 2000 para 136,7 km², em 2010. De acordo com a Associação Brasileira de criadores de camarão, a região Nordeste é responsável por 94% de toda produção de camarões do país (FERREIRA et al., 2008).

Ainda em conformidade com os resultados, houve um aumento no número de focos de queimadas no período avaliado, tendo sido contabilizados 26.181 focos em 2000 e 73.429 focos em 2010. Esse aumento pode estar relacionado com a prática do fogo em áreas de pastagem. Esta prática na região do

Nordeste é cultural, sendo este método rotineiramente utilizado para limpeza de áreas afetadas por espécies invasoras, pragas e doenças, e renovação do pasto (Mirando, 2010). Além da prática cultural, outro fator que intensifica a ameaça do fogo na região é o fato de que nos períodos secos o acúmulo de biomassa seca nas pastagens é um fator potencial para a ocorrência de fogo acidental.

A utilização das pastagens logo após as queimadas é uma das principais causas de degradação, devido ao fato de haver inserção de animais no pasto no início de sua recuperação, impedindo que o mesmo rebrote. Tal prática acaba intensificando a erosão do solo, devido à falta de cobertura de vegetação (ARIAS, 1963). Outro fator que deve ser levado em consideração ao analisar os impactos do fogo na degradação do solo é o fato de que quando ocorrem em solos arenosos formam crostas superficiais que diminuem a capacidade de infiltração da água e aumenta as perdas por erosão (Santos, 1992).

5.1.3. Índice de qualidade social (IQS)

Estudos internacionais ressaltam que nos países em desenvolvimento o processo de desertificação intensifica a pobreza. Segundo Nascimento (2006), grande parte das áreas afetadas pela desertificação no mundo coincidem com os bolsões de pobreza dos países não desenvolvidos. A perda dos nutrientes encontrados no solo e, conseqüentemente, a diminuição de produção associada a eventos climáticos cada vez mais extremos provocam o abandono do campo para os grandes centros urbanos, conforme ressaltado em Roxo (1998).

A partir das análises dos resultados associados ao índice de qualidade social, estes obtidos a partir do cruzamento do IDH e densidade de população, observa-se um aumento da classe de baixa susceptibilidade, que variou de 42% em 2000 para 48% em 2010 (Tabela 5.5). Uma das causas do aumento das classes com baixa susceptibilidade pode estar relacionada com a melhoria

do IDH na região devido ao crescimento econômico do país. A desigualdade social também é outro fator que vem caindo em todo o Brasil de um modo geral. A região Nordeste, por exemplo, por volta dos anos 90 apresentava o maior índice de Gini, ou seja, maior taxa de desigualdade social e, nas últimas duas décadas, o índice diminuiu em torno de 20%. A taxa de analfabetismo também vem caindo na região; entretanto, ainda é a mais alta quando comparada com aquelas observadas em outros Estados brasileiros (Figura 5.2).

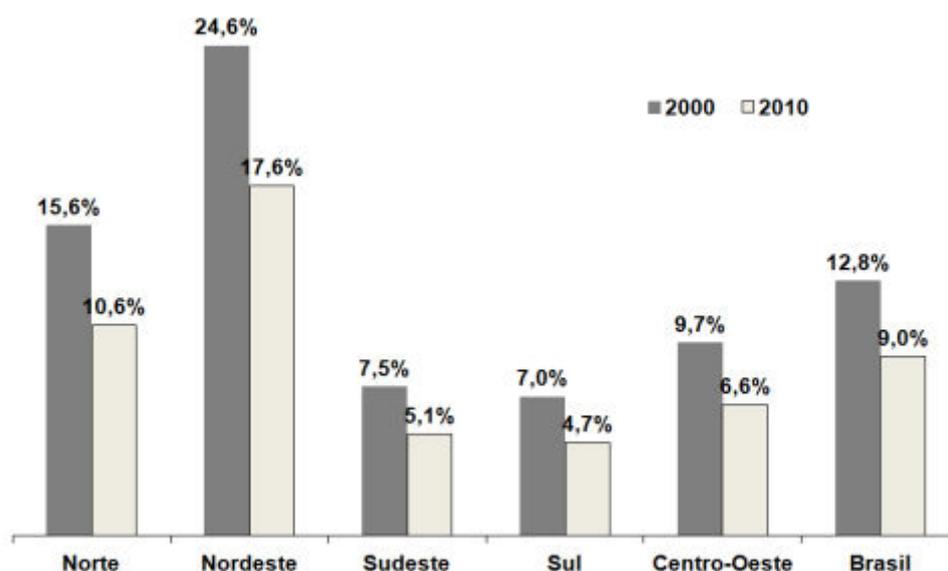


Figura 5.2 – Distribuição da taxa de analfabetismos das pessoas acima de 10 anos.
Fonte: IBGE (2012)

Tabela 5.5 - Porcentagens das classes de susceptibilidade para cada um dos índice de qualidade avaliados.

Índices	Classe de susceptibilidade	2000 (%)	2010 (%)
Índice de qualidade físico do terreno (IQFT)	Baixo	24,5	24,5
	Moderado	52,7	52,7
	Alto	22,9	22,9
Índice de qualidade de manejo (IQM)	Baixo	1,00	0,8
	Moderado	11,6	8,9
	Alto	87,4	90,3
Índice de qualidade climático (IQC)	Baixo	19,5	19,5
	Moderado	38,2	38,2
	Alto	42,3	42,3
Índice de qualidade social (IQS)	Baixo	42,4	48,1
	Moderado	34,8	32,9
	Alto	22,8	19,0

5.2. Áreas susceptíveis à desertificação

As áreas suscetíveis à desertificação no semiárido brasileiro, para os períodos de 2000 e 2010, bem como as mudanças que ocorreram entre estes períodos são ilustradas na Figura 5.3.

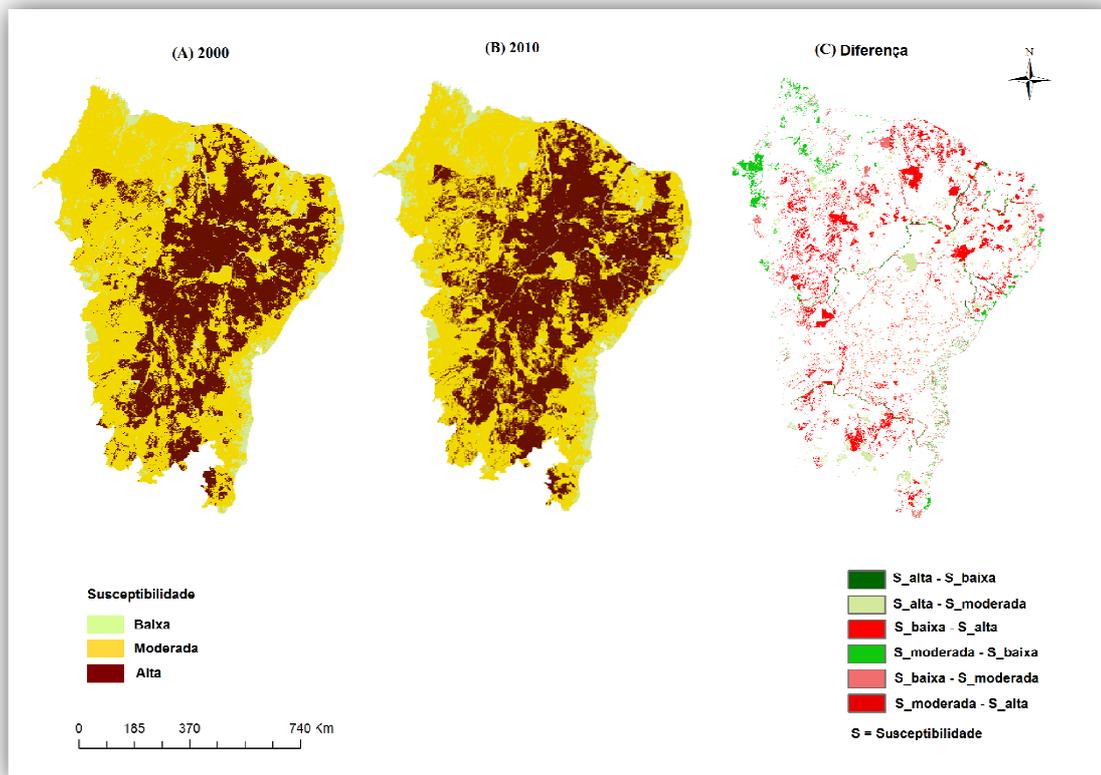


Figura 5.3 – Áreas ambientalmente susceptíveis a desertificação (A) 2000 e (B) 2010 e (C) mudança entre 2000 e 2010.

As áreas da região com alta susceptibilidade em 2000 representavam um total de 35% (629.103 km²), enquanto em 2010 esse número aumentou para 40% (711.235 km²). Na Figura 5.3c, referente às mudanças entre os períodos analisados, é possível observar que as áreas com alta susceptibilidade estão concentradas na região sul do Piauí, no Ceará e norte de Minas Gerais. As áreas moderadamente susceptíveis diminuíram aproximadamente 5% enquanto a área de baixa susceptibilidade aumentou de 5,5% (2000) para 6% (2010) (Tabela, 5.6).

Tabela 5.6 - Cálculo de área (km²) para as classes de susceptibilidade mapeadas para os anos de 2000 e de 2010.

Classe de Susceptibilidade	Ano 2000 (km²)	Ano 2010 (km²)	Diferença (anual) (km²)	2000 (%)	2010 (%)	Diferença (%)
Baixa	98.267	103.813	5.546	5.5	5.8	0.3
Moderada	1.064.958	977.430	-87.528	59.4	54.5	-4.9
Alta	629.103	711.235	82.132	35.1	39.7	4.6

Ressalta-se que o modelo foi capaz de identificar bem as áreas com alta susceptibilidade à desertificação, uma vez que incluiu nestas áreas regiões que são reconhecidas oficialmente como desertificadas pelo MMA (MMA, 2005), isto é, os núcleos de desertificação de Gilbués (PI), Irauçuba (CE), Cabrobó (PE) e Seridó (RN). Esse é um forte indicativo de que, para a escala adotada, considerando os indicadores selecionados e a forma como esses foram agrupados, o modelo correspondeu ao esperado. Além disso, o teste de validação indicou uma precisão de 85 % de acerto de classificação. Das 110 amostras selecionadas sobre a classe de alta susceptibilidade, apenas 2 pontos não correspondiam a essa classe, estando sobre áreas de vegetação densa e mangue que são de baixa susceptibilidade.

5.3 Cenários de mudança de uso da terra

Na Figura 5.4 são apresentados os mapas de uso e cobertura da terra obtidos levando-se em consideração as demandas calculadas para cada um dos cenários.

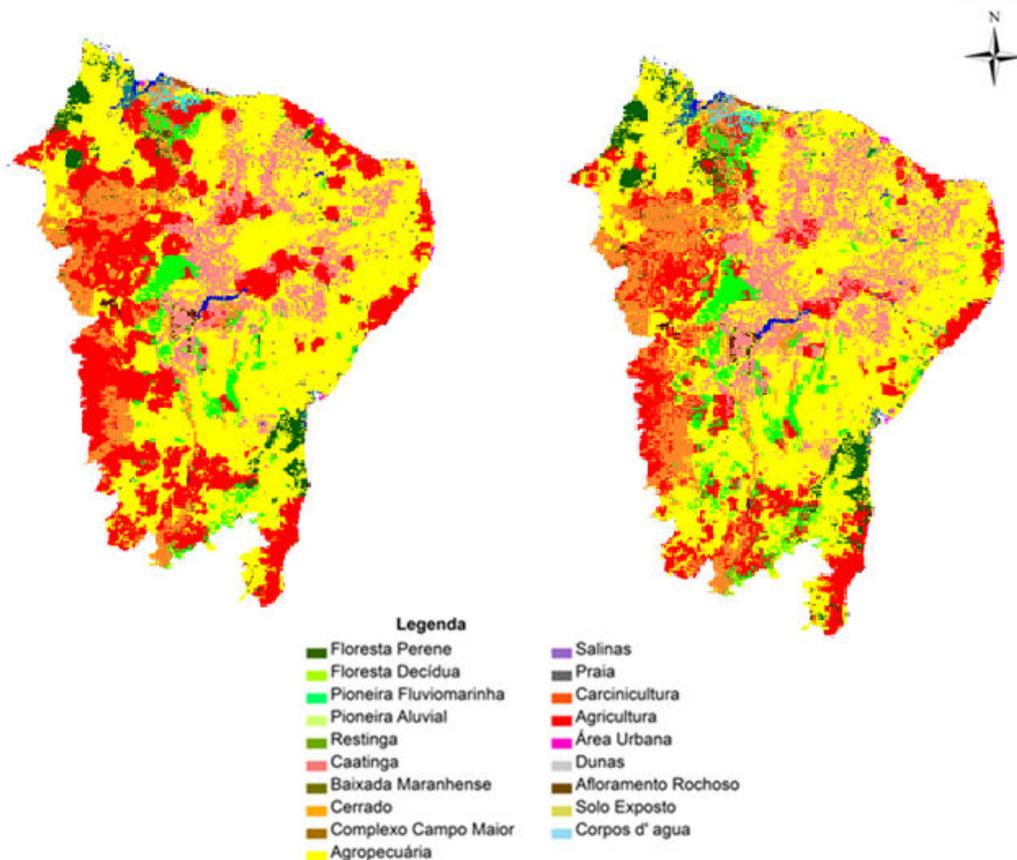


Figura 5.4 – Mapas de uso e cobertura da terra referente aos cenários pessimista e otimista.

Em ambos os cenários, observa-se diminuição da vegetação, restando apenas 16% (301.301 km²) no cenário pessimista e 23% (419.041 km²) no cenário otimista. É possível constatar que as áreas de expansão agrícola se concentram principalmente na região oeste da área de estudo, onde atualmente encontra-se a fronteira agrícola, de elevada aptidão agrícola e que, até recentemente, ainda se encontravam cobertas por Cerrado. Esta área é conhecida como Matopiba (acrônimo referente às áreas de chapada dos Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). Esta região além de ser plana, de conter solos potencialmente produtivos e disponibilidade de água, apresenta atualmente clima favorável para o desenvolvimento da agricultura. A partir da avaliação do índice de aridez, este calculado a partir de cenários do modelo meteorológico ETA, é possível constatar que, no que diz respeito às

variações climáticas, a região não deverá sofrer grandes variações, permanecendo com clima úmido e subúmido-úmido entre 2020 e 2040 (Figura 5.5). O mesmo pode ser constatado quando se observa a parte norte do Estado do Espírito Santo e toda a faixa litorânea até chegar ao Estado Rio Grande do Norte, onde o clima passa a ficar árido e semiárido.

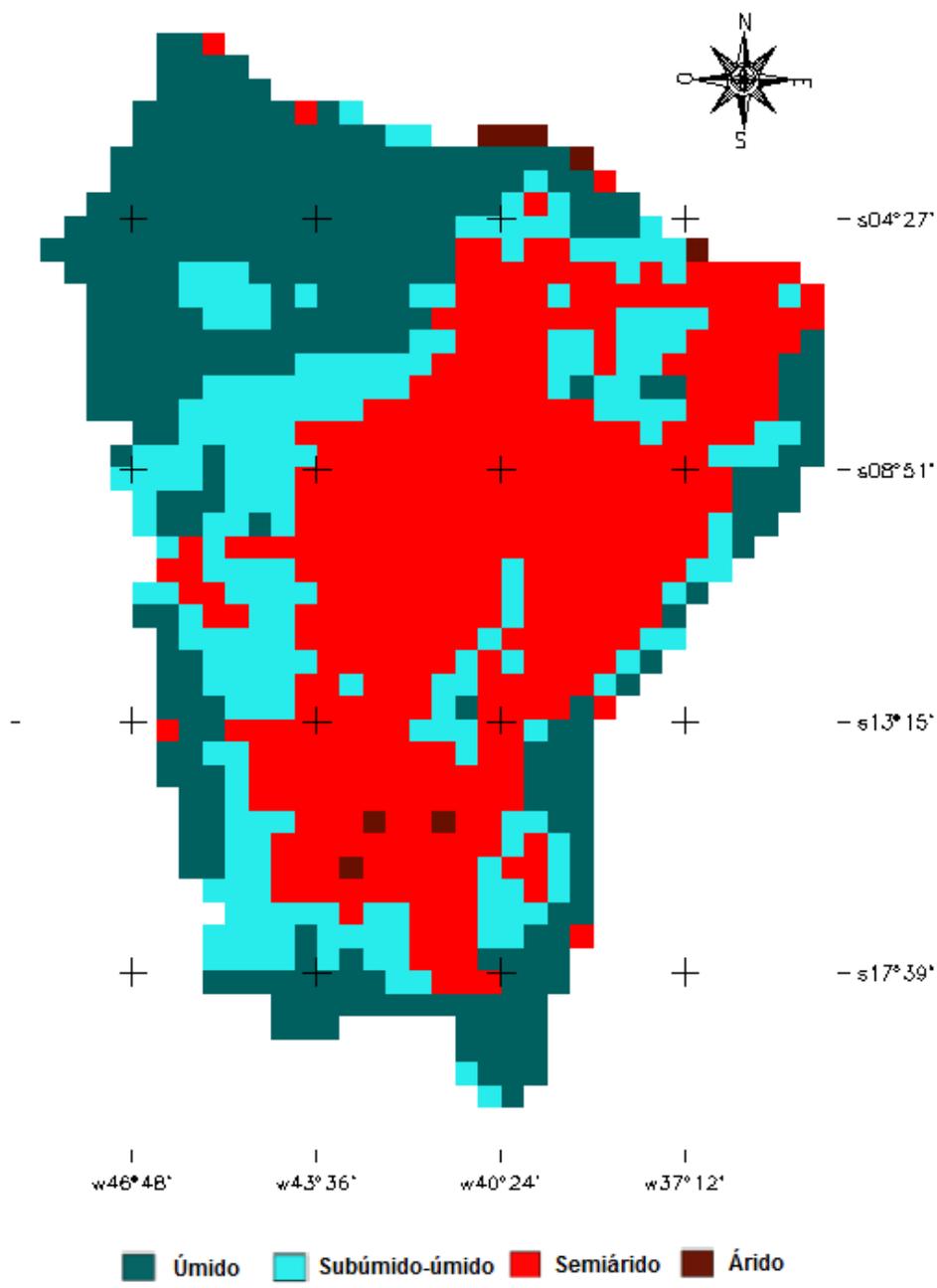


Figura 5.5 – Projeção do índice de aridez para 2040.

As projeções de densidade de população indicam que os Estados de Minas Gerais e Bahia serão os mais populosos em 2040, seguidos do Maranhão, Piauí e Ceará (Figura 5.6).

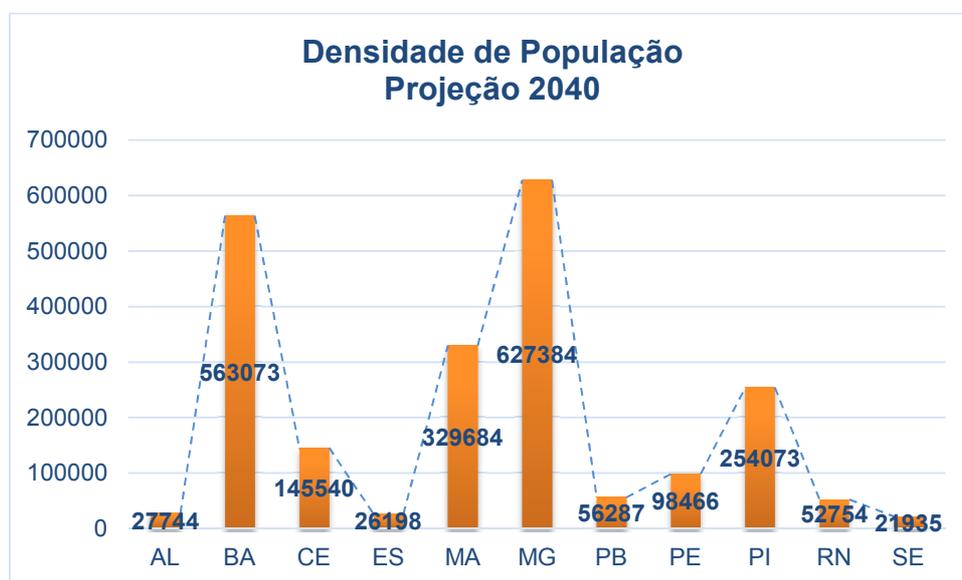


Figura 5.6 – Projeção da densidade de população para 2040.

5.4. Cenários de áreas ambientalmente susceptíveis a desertificação

Após obtenção dos cenários de mudanças de uso e cobertura da terra, as classes originais dos mapas foram recuperadas, a fim de que ambos ficassem com as mesmas classes observadas nos mapas de 2000 e 2010.

Ressalta-se que o processo adotado para obtenção dos mapas de susceptibilidade referente aos cenários pessimista e otimista foi aquele apresentado no Capítulo 4. Para cada um dos cenários foram gerados mapas de áreas ambientalmente susceptíveis à desertificação. A Figura 5.7 ilustra as áreas mapeadas para o ano de 2040.

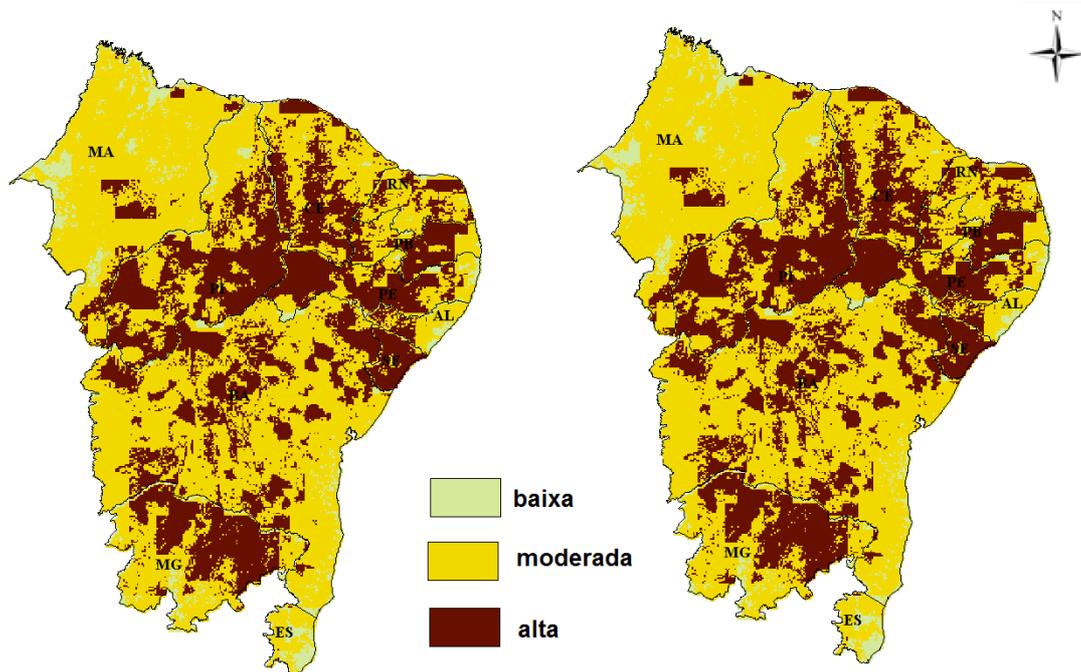


Figura 5.7 - Cenários de áreas ambientalmente susceptíveis à degradação / desertificação.

Como se pode observar na Figura acima, as classes de susceptibilidade não se alteraram muito entre os diferentes tipos de cenários. No entanto, ao analisar o cálculo de área, apresentado na Tabela 5.11, pode-se constatar que houve aumento da classe de alta susceptibilidade, de 0,4 % entre ambos os cenários. Já as classes de baixa e moderada susceptibilidade diminuíram em 0,2%.

Tabela 5.7 – Cálculo de área (km²) das classes de susceptibilidade mapeadas nos cenários pessimista e otimista.

Classe de susceptibilidade	Cenário_otimista	Cenario_pessimista
Baixa	114.402	111.065
Moderada	1.092.461	1.089.751
Alta	603.256	609.630

A partir da análise das alterações observadas entre os mapas de áreas susceptíveis em 2010 com aqueles gerados para os cenários (Figura 5.9), é possível constatar que a expansão das áreas com alta susceptibilidade concentra-se nos Estados de Minas Gerais, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. Além disso, considerando somente o cenário pessimista, é possível observar um avanço da susceptibilidade sobre a região coberta pela mata atlântica que pode estar associado a maior taxa de desmatamento que, atualmente, vem sendo ocasionado pelo avanço da agricultura. Segundo levantamento realizado pela Fundação SOS Mata Atlântica e o INPE, nos últimos 28 anos a mata atlântica perdeu 18.509 km². O Estado de Minas Gerais é o que mais desmata, com 8.437 ha de áreas destruídas, seguido do Piauí (6.633 ha) e Bahia (4.777 ha) (<http://www.sosma.org.br/17811/divulgados-novos-dados-sobre-o-desmatamento-da-mata-atlantica/#sthash.QdvbrgmH.dpuf>). Ainda em relação a Figura 5.9, pode-se observar que as regiões com alta susceptibilidade em 2010 no Estado do Ceará apresentam melhoras em ambos os cenários, passando de alta para moderada susceptibilidade. Essa melhora pode estar associada ao clima que, pelas previsões do ETA, passará em 2040 de semiárido para subúmido-úmido. Por fim, é importante mencionar que as áreas em branco correspondem às regiões que não se alteraram durante o período analisado.

A porcentagem das classes alta, média e baixa susceptibilidade para cada um dos Estados presentes na área encontra-se na Figura 5.8.

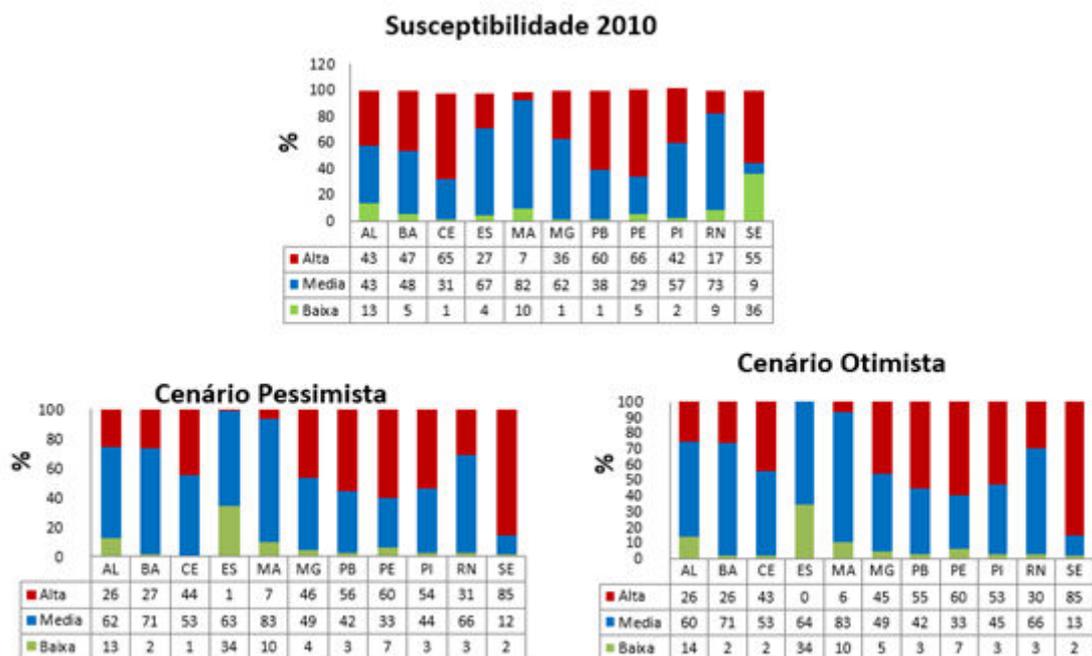


Figura 5.8 – Porcentagem das classes de susceptibilidade para os 11 Estados presentes na área de estudo.

Nos Estados do Rio Grande do Norte e em Sergipe a pedologia é o fator que mais contribui para explicar a expansão da área de alta susceptibilidade à degradação/desertificação na projeção 2040 (Figura 5.9). Para o norte de Minas Gerais as projeções climáticas do ETA, indicam uma expansão das áreas classificadas como de clima árido, da área de alta susceptibilidade para essa região (Figura 5.5). Além disso, as projeções de densidade de população para essa região são as mais altas em relação aos outros Estados (Figura 5.6).

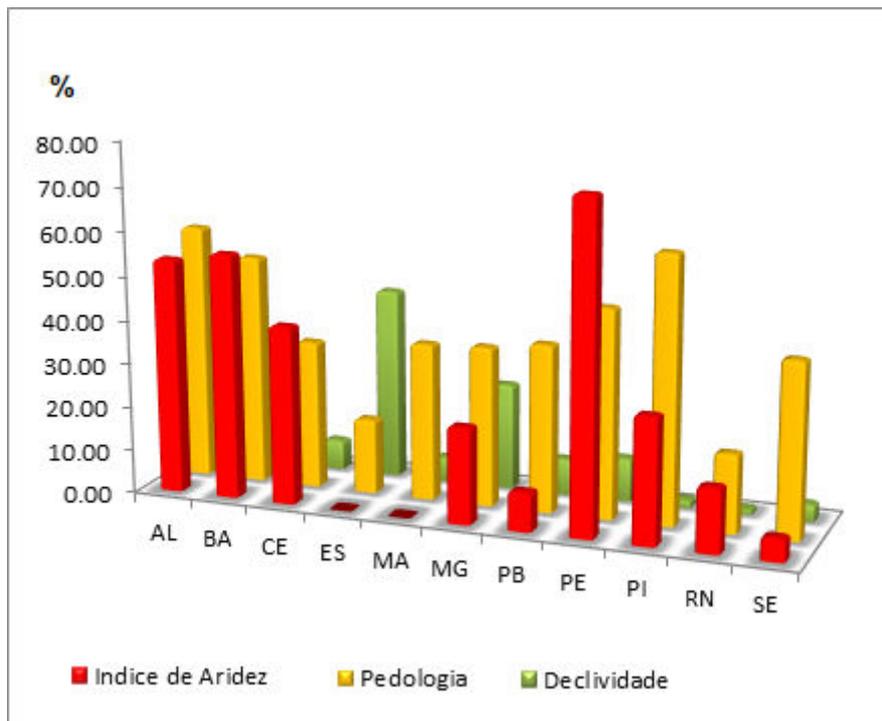


Figura 5.9 – Porcentagem das variáveis referentes ao índice de aridez, pedologia e declividade para os 11 Estados contidos na área de estudo.

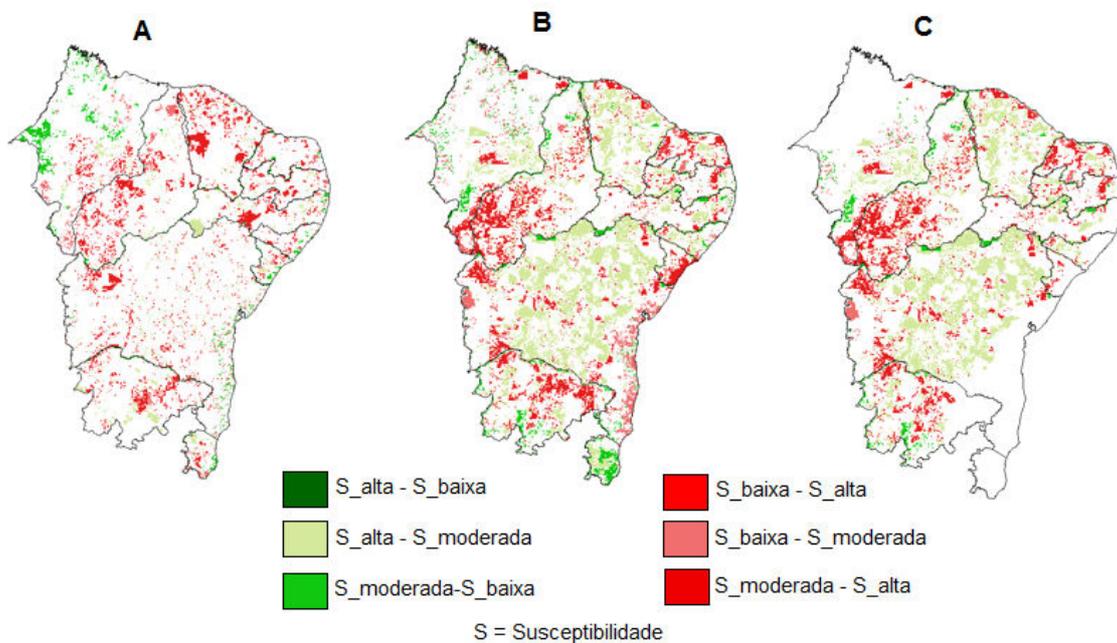


Figura 5.10 – (A) Diferenças entre os mapas de susceptibilidade de 2010 e 2000, (B) cenário pessimista e 2010, (C) cenário otimista e 2010.

Considerando a complexidade da área de estudo, destaca-se que o modelo LuccME/NEB apresentou um desempenho razoável na alocação de demanda, alcançando índices de ajuste espacial de 60% para a vegetação, 30% para a agricultura e 50% para a pastagem. O modelo foi validado para o período 2000-2010.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A desertificação é o processo final de degradação da terra e é reconhecida como uma ameaça para o meio ambiente global, com impactos diretos no bem-estar do ser humano. A falta de um sistema adequado de controle integrado tem sido identificada como um dos principais obstáculos para o combate à desertificação e degradação dos solos. Neste contexto, no presente trabalho foi elaborado um modelo, com base na metodologia de Crepani et al. (1996) e no método do projeto MEDALUS, para identificar áreas ambientalmente susceptíveis à desertificação. A partir do estudo observou-se que a região do semiárido brasileiro apresenta-se de moderada a altamente susceptível à degradação/desertificação.

Do ponto de vista climático, as zonas úmidas e subúmida-úmida têm baixa susceptibilidade; no entanto, quando questões de manejo associadas com os usos da terra são levadas em consideração, essas áreas tornam-se potencialmente susceptíveis à degradação/desertificação.

Com a utilização de modelagem de mudanças de uso da terra foi possível entender a dinâmica do processo de degradação nas próximas décadas. É relevante destacar que o modelo pode ser melhorado, ou seja, podem ser incorporados a ele um conjunto mais completo de indicadores, como umidade do solo, albedo, etc.

Com relação aos cenários, nestes poderão ser incorporados outros cenários de emissões de mudanças climáticas, considerando a utilização de diferentes modelos do IPCC, visando avaliar o impacto das incertezas desses cenários na susceptibilidade a desertificação na região.

Por fim, ressalta-se que o estudo apresentado é o primeiro a produzir um diagnóstico partindo da análise de uma base integrada contendo os principais indicadores de desertificação, em mesma escala e resolução. A metodologia proposta mostrou-se útil para identificar as áreas que são susceptíveis à degradação/desertificação, uma vez que combina a experiência de estudos

anteriores com um método consolidado. Além disso, novos indicadores foram incluídos na metodologia do presente trabalho, como o IDH (indicador social) e unidades de conservação (indicador de gestão), por serem relevantes para o entendimento da desertificação no semiárido brasileiro. A metodologia desenvolvida poderá ser utilizada considerando-se diferentes escalas de trabalho, de modo que resultados possam ser obtidos mostrando a magnitude do risco em áreas para diferentes anos, além dos fatores que possam contribuir para desencadear o processo.

Uma das grandes contribuições deste trabalho é a possibilidade de identificar as áreas com maior susceptibilidade à degradação/desertificação. Isso não significa que essas áreas estejam condenadas a sofrerem degradação severa em decorrência das mudanças climáticas. O indicador proposto sugere que essas áreas apresentam maior fragilidade ambiental e, conseqüentemente, um manejo inadequado pode torná-las improdutivas no futuro, acarretando altos custos sociais e econômicos. Assim, boas práticas de conservação dos recursos naturais e da fertilidade natural do solo se tornam imperativas e urgentes nessas áreas. Dado o caráter irreversível das mudanças climáticas, independente do grau do comprometimento dos países em ações de mitigação, faz-se necessário a adoção de políticas que minimizem os efeitos prejudiciais dessas mudanças. Assim, o mérito da ferramenta desenvolvida é o de fornecer subsídios técnicos que contribuam na elaboração do plano nacional de adaptação às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. **A problemática da desertificação e da savanização no Brasil**. In: Geomorfologia, USP: São Paulo: usp, 1977, n° 53, 20 p.

Série: Geomorfologia (Universidade de São Paulo. Instituto de Geografia)

AGUIAR, A. P. D.; CARNEIRO, T.; ANDRADE, P. R.; ASSIS, T. O. LuccME-TerraME: an open-source framework for spatially explicit land use change modelling. **GPL News**, n. 8, p. 21-23, 2012.

AGUIAR, A.P.D. **Modelagem de mudança do uso da terra na Amazônia: explorando a heterogeneidade intraregional**. 2006. 153 p. (INPE- 08.10.18.21-TDI). Thesis (Doctoral in Remote Sensing) - Brazilian National Institute for Space Research (INPE), São José dos Campos, 2006. Retrieved from: <http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/M7t7e>. Access on: 05 dez. 2011.

AGUIAR, A.P.D.; CÂMARA, G.; ESCADA, M.I.S. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: exploring intra-regional heterogeneity. **Ecological Modelling**, v. 209, n. 2, 169–188 p., 2007.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration** - guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Rome; FAO, 1998. Paper 56.

ANSELIN, L. Spatial econometrics. In: BATALGI, B. (ed.). **A companion to theoretical econometrics**. Oxford: Basil Blackwell, p. 310- 330, 2001.

ARAUJO, R.; GOEDERT W. J.; AND LACERDA M. P. C. Qualidade do solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1099-1108, 2007.

ARELLANO-SOTA, C.; FRISK, T.; IZQUIERDO, J.; PRIETO-CELI, M., THELEN, K.D.; VITA, A. **FAO/UNEP – Programme on desertification control in Latin America and the Caribbean, Desertification Control Bulletin**. v. 29, p. 56–62, 1996.

ARIAS, P.J. Prós e contras da queima dos pastos. **Rev. Bras. Fertilizantes Inseticidas e Rações**, v.12, p.45-55, 1963.

BAILEY, T. C.; GATRELL, A. C. **Interactive spatial data analysis**. Essex: Longman Scientific and Technical, 1995.

BISARO, A.; KIRK, M.; ZDRULI, M.; ZDRULI, P.; ZIMMERMANN, W. Global drivers setting desertification research priorities: insights from a stakeholder consultation forum. **Land Degradation & Development**. v. 25, p. 5-16, 2014.

BASSO F.; BOVE E.; DUMONTET S.; FERRARA A.; PISANTE M.; QUARANTA G.; TABERNER, M. Evaluating environmental sensitivity at the basin scale through the use of geographic information systems and remotely sensed data: an example covering the Agri basin (Southern Italy). **Catena**, v. 40, p. 19–35. 2000.

BRANDT J.; GEESON, N.; IMESON A. **A desertification indicator system for Mediterranean Europe (DIS4ME)**. 2003. Retrieved from: <http://www.kcl.ac.uk/projects/desert_links/downloads/public_downloads/>. Accessed on: 8 october 2013.

BENABDERRAHMANE, M. C.; CHENCHOUNI, H. Assessing environmental sensitivity areas to desertification in eastern Algeria using Mediterranean Desertification and Land Use 'MEDALUS' model. **Int. J. of Sustainable Water & Environmental Systems**, v. 1, p. 5-10, 2010.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling, **Computer & Graphics**, v. 20, p. 395–403, 1996.

CARNEIRO, T. **Nested-CA**: a foundation for multiscale modeling of land use and land change. PhD in Computer Science. 2006. 114 p. (INPE-14702-TDI/1227). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/01.03.11.57>>. Acesso em: 12 jun. 2015. CARNEIRO, T.G.S.; ANDRADE, P.R.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V.; PEREIRA, R.R. An extensible toolbox for modeling nature-society interactions. **Environmental Modelling & Software**, v. 46, n. 1, p. 104-117, 2013.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S., GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 30, p. 137-147, 2006.

CONGALTON, R.G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data**: principles and practices. Boca Raton: CRC Lewis Press, 137 p., 1999.

- CONTI, J.B. **Clima e meio ambiente**. São Paulo: Atual, 1998.
- COSTANZA, R. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. **Ecological Modelling**, v. 47, n. 3, p. 199-215, 1989.
- CLIFF, A.D.; ORD, J.K. **Spatial processes: models and applications**. London: Pion, 1981. 266 p.
- CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA A. A.; SUEIRO G.; PESQUERO, J. F.; ALVES L.M.; KAY G, BETTS R.; CHAGAS D. J.; GOMES J. L.; BUSTAMANTE J. F.; TAVARES P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Clim. Dyn.**, v. 38, n. [3-4](#), p 635-653 Feb. 2012. doi:10.1007/s00382-011-1002-8.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; FILHO, P.H.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001. 103 p. (INPE-8454-RPQ/722).
- DALLA-NORA, E. L.; AGUIAR, A. P. D.; LAPOLA, D. M.; WOLTJER, G. Why have land use change models for the Amazon failed to capture the amount of deforestation over the last decade?. **Land Use Policy**, v. 39, p. 403-411. 2014.
- DE LA RIVA, J.; PEREZ-CABELLO, F.; LANA RENAULT, N.; KOUTSIAS, N. Mapping forest fire occurrence at a regional scale. **Remote Sens. Environ.**, v. 92, p. 363–369, 2004.
- DEICHMANN, U. and EKLUNDH, L. **Global digital datasets for land degradation studies: a GIS approach**. GRID Case Study Series, 1991. v. 4.
- D'ODORICO, P.; CARR, J.A.; LAIO, F.; RIDOLFI, L.; VANDONI, S. Feeding humanity through global food trade. **Earth's Future**, v. 2, p. 458–469, 2014.
- DIOUF, A.; LAMBIN, E. F. Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing and field observations in the Ferlo, Senegal. **Journal of Arid Environments**. v. 48, p. 129–148, 2001.
- ENGELSMAN, W. **Simulating land use changes in an urbanising area in Malaysia: an application of the CLUE-S model in the Selangor river basin**. Wageningen University. Environmental Sciences,. 2002. 67 p.

FAO **Agriculture**: towards 2015/30. Rome: Food and Agriculture Organization, 2001. Technical Interim Report April 2000. . Disponível em: <http://www.fao.org/es/ESD/at2015/chapter1.pdf> [Geo-2-167].

FERREIRA, D.G.; MELO, H.P.; NETO, F.R.R.; NASCIMENTO, P.J.S.; RODRIGUES, V. Avaliação do quadro de desertificação no Nordeste do Brasil: diagnósticos e perspectivas. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE DESERTIFICAÇÃO, 1994, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 1994. p.7-55.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca**. PAN-BRASIL. Brasília: MMA, 225p.

FOURY, A. P. As matas do Nordeste brasileiro e sua importância econômica. **Boletim de Geografia**, v. 31, p. 14-13, 1972.

GASPAR, L. **O Nordeste do Brasil** - pesquisa escolar online. Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 2009. Disponível em: <http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar/>. Acesso em: 08 jun. 2015.

GEIST, H.J.; E.F. LAMBIN. Dynamic causal patters of desertification. **BioScience**, v. 54, n. 9, p. 817-829. 2004.

GEIST, H.J.; E.F. LAMBIN. Dynamic causal patters of desertification. **BioScience**, v. 54, n. 9, p. 817-829. 2004.

GINEVAN, M. Testing land use map accuracy: another look. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 45, p. 1371-1377, 1979.

GONÇALVES, D.M. **Cenários futuros de mudanças de uso da terra e degradação ambiental no semiárido do Nordeste Brasileiro**. Trabalho de conclusão de curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos. 152 p. 2007.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 472p.

GLP. **Global land project**: science plan and implementation strategy. Stockholm:IGBP Secretariat, 2005. 64p.

HULME, M.; KELLY, M. Exploring the links between: desertification and Climate Change. **Environment**, v. 35, n. 6, p. 5-11, 1993.

IBAMA/MMA. Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélites. **Monitoramento do Bioma Caatinga 2002 a 2008, Centro de Sensoriamento Remoto – CSR/IBAMA:**

http://www.ambiente.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatrio_tcnico_caatinga_72.pdf. 2010, last access: 10 March 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE).

Estudos de pesquisas e informações geográficas. Rio de Janeiro: Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais e Coordenação de Geografia. 389p, 2004.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERAÇÃO PARA AGRICULTURA (IICA). **Projeto Áridas.** 2010. Disponível em:

at:<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>
Acesso em: 05 abr. 2011.

SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; AND MILLER, H. L. (eds.). **IPCC: climate change 2007: the physical science basis.** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

JACOMINE, P.K.T. Caracterização do estágio atual dos solos sob caatinga In: ARAÚJO, Q. R. (Org.). **500 anos de uso do solo no Brasil.** Ilheus-BA, UESC, v. 13, p. 365–397, 2002. Reunião Bras. Manejo e Conservação de solo.

JACOMINE, P.K.T. Solos sob caatingas: características e uso agrícola. In: ALVAREZ V.; FONTES, M.P.F. (eds.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e desenvolvimento sustentável.** Viçosa, MG: SBCS/UFV-DS, 1996, p. 95-111.

KEPNER, W.G.; RUBIO, J. L.; MOUAT, D. A; PEDRAZZINI, F. (eds.).

Desertification in the Mediterranean Region: a security issue. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2006. NATO Security through Science Series-C. Environmental Security.:

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Mon. Weather Rev.**, v. 107, p. 1140–1153, 1979.

KOUTSIAS, N.; KALABOKIDIS, K. D.; ALLGOWER, B. Fire occurrence patterns at landscape level: beyond positional accuracy of ignition points with kernel density estimation methods, **Nat. Resour. Model**, v. 17, p. 359–376, 2004.

KOSMAS, C.; TSARA, M.; MOUSTAKAS, N.; KOSMA, D.; YASSOGLU, N. Environmental sensitive areas and indicators of desertification. In: **Desertification in the Mediterranean region** - a security issue. NATO Security Through Science Series 3, 2006. Proceedings of the NATO Mediterranean Dialogue Workshop, held in Valencia, Spain, 2-5 December 2003.

KOSMAS, C.; KIRKBY, M.; AND GEESON, N. **The Medalus project Mediterranean desertification and land use** - manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification, , Brussels: European Commission, 1999.

LAMBIN, E. F.; GEIST, H.; RINDFUSS, R. R. Introduction: local processes with global impacts In: LAMBIN, E. F.; GEIST, H. (Eds.). **Land-use and land-cover change, local process and global impacts**. Springer Berlin Heidelberg, 2006.

LAMBIN, E.; ROUNSEVELL, M. D. A.; GEIST, H. J. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 82, p. 321–331, 2000.

LAURANCE, W. F.; COCHRANE, M. A.; BERGEN, S.; FEARNSIDE, P. M.; DELAMÔNICA, P.; BARBER, C.; D'ANGELO, S.; FERNANDES, T. The future of the Brazilian Amazon. **Science**, v. 291, n. 5506, p. 438-439, 2001.

LAVADO CONTADOR, J. F.; SCHNABEL, S.; GÓMEZ GUTIÉRREZ, A.; PULIDO FERNÁNDEZ, M. Mapping sensitivity to land degradation in Extremadura. SW Spain. **Land Degradation and Development**. v. 20, n. 2, 129-144, 2009.

LEMOS, J.J.S. Níveis de degradação no Nordeste do brasileiro. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 32, p. 406-429, 2001.

LEPSCH, I.F. **Solos** – formação e conservação. São Paulo:Editora da Universidade de São Paulo, 1976. 160 p.

MACHADO, M. R. O processo histórico do desmatamento do Nordeste Brasileiro: impactos ambientais e atividades econômicas. **Revista de Geografia**, v. 23, n. 2, p. 123-134, 2008.

MAINGUET, M. **What is desertification?** definitions and evolution of the concept, desertification natural background and human mismanagement. Berlin Springer:1994. p. 1-16.

MARENGO, J. A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: MEDEIROS S. S. et al. (eds.). **Recursos Hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande, 2011. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. p. 383-416. ISBN 9788564265011.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**. v. 27, p. 149-75, 2008.

MATALLO JÚNIOR, H. **Indicadores de desertificação**: histórico e perspectivas. Brasília: UNESCO. 126 p. 2001.

MARENGO, J.A. et al. **Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI**: projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio), 2007. Relatório 5. MADEIRA, J. L.; SIMÕES, C.C. S. Estimativas preliminares da população urbana e rural segundo as unidades da federação, de 1960/1980 por uma nova metodologia. **Revista Brasileira de Estatística**, v.33, n.129, p.3-11, jan./mar. 1972.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Washington DC: Island Press. 2005.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (MIN). **Nova delimitação da região semiárida do Brasil**. Brasília, 2005. Portaria nº 89, publicada no DOU em 17 de março de 2005.

SANTANA, M. O. (org.). **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Ministério do Meio Ambiente (MMA) / Universidade Federal da Paraíba / Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), Brasília, 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Monitoramento dos Desmatamentos nos Biomas Brasileiros Biomas por Satélite**. Brasília: Centro de Sensoriamento Remoto – CSR/IBAMA. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>.

MIRANDA, H. S. (org.). **Efeitos do regime do fogo sobre a estrutura de comunidades de cerrado**: resultados do projeto Fogo, Brasília-DF, Ibama, 2010. 144 p.

MONTANARELLA, L. **Trends in land degradation in Europe**. In: SIVAKUMARM. V. ; N'DIANGUI, N. (Eds). **Climate and land degradation**. Berlin: Springer, 2007.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment in the state and movement of water in living organism. In: SYMPOSIUM SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 19., 1964, Swansea. **Proceedings...** Cambridge: University Press, 1965. p. 205-234.

NASCIMENTO, F.R. **Degradação ambiental e desertificação no Nordeste brasileiro**: o contexto da bacia hidrográfica do rio Acaraú-Ceará. 340p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

NASCIMENTO, F.R. **O fenômeno da desertificação**. Goiânia: Ed. UGG, 2013. 240 p.

NIMER, E. Desertificação: realidade ou mito? **Revista Brasileira de Geografia**. v. 50, n. 1, p. 7-39, 1988.

OLIVEIRA, V.P.V. Indicadores biofísicos de desertificação, Cabo Verde/África. **Mercator**, v.10, n. 22, p. 147-168, 2011.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A.J.B.; MANZI, A.O.; ALVALÁ, R.C.S. CORREIA, M.F.; MOURA, M.S.B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro. **Rev. Bras. Meteorol.**, v. 21, p. 166-174, 2006.

Convenção das Nações Unidas de combate à desertificação nos países afetados por seca grave e/ou desertificação, particularmente na África. Brasília: MMA, 1997. (Documento preparado no âmbito do Projeto BRA 93/036/MMA/PNUD/Fundação Grupo Esquel Brasil, com apoio da FAO.)

PARKER, D.C.; T. BERGER, S. MANSON, S. M. **Agent-based models of land-use /land-cover change**. Irvine, California, USA, LUCC Project. 2002Report and Review of an International Workshop..

PONTIUS, R. G. Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 68, n. 10, p. 1041–1049, 2002.

PRINCE, S. D.; COLSTOUN, E. B.; KRAVITZ, L. L. Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. **Global**

Change Biology, v.4, n.4, p. 359–374, 1998. doi: 10.1046/j.1365-2486.1998.00158.x

REYNOLDS, J. F.; STAFFORD, S. D. M. **Global desertification: do humans cause deserts?** Dahlem University Press, 2002. 437p.

REYNOLDS, J. F.; STAORD, S. D. M.; LAMBIN, E. F.; TURNER, I. B. L.; MORTIMORE, M.; BATTER-BURY, S. P. J.; DOWNING, T. E., DOWLATABADI, H., FERNÁNDEZ, R. J., HERRICK, J. E.; HUBER-SANNWALD, E.; JIANG, H.; LEEMANS, R.; LYNAM, T.; MAESTRE, F. T.; AYARZA, M.; AND WALKER, B. Global desertification: building a science for dryland development, **Science**, v. 316, p. 847–851. doi:10.1126/science.1131634, 2007.

ROCCO, R. **Legislação brasileira do meio ambiente**. Rio de Janeiro, DP&A Editora, 2002.

ROXO, M. J; MOURÃO, J. M. Desertificação – a percepção do fenómeno. **Revista Florestal, Sociedade Portuguesa de Ciências Florestais**, v. 11, n.1, p. 30-36, 1998.

SÁ, I.B.; TAURA, T.A.; CUNHA, T.J.F., SÁ, I.I.S. Mapeamento e caracterização da cobertura vegetal da Bacia Hidrográfica do São Francisco. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 6305-6312.

SALVATI, L.; ZITTI, M. Long term demographic dynamics along an urban-rural gradient: implications for land degradation. **Biota**, v. 8, p. 61-69, 2008.

SALVATI, L.; BAJOCCO, S.; CECCARELLI, T.; ZITTI, M.; PERINI, L. Towards a process based 30 evaluation of land susceptibility to soil degradation in Italy, **Ecol. Indic.**, v.11, p.1216–1227, 2011.

SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, Y. S. B. Propensão à desertificação no semiárido brasileiro. **Revista de Geografia**, v. 22, p. 59–76, 2003.

SAMPAIO, E.V.S.B.; ARAÚJO, M.S.B., SAMPAIO, Y.S.B. Impactos Ambientais da Agricultura no processo de desertificação no Nordeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo: Solos, Sustentabilidade e Qualidade Ambiental, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife-PE: SBCS, UFRPE, Embrapa .

- SAMPAIO, E.V.S.B.; ARAÚJO, M.S.B.; SAMPAIO, Y.S.B. Propensão à desertificação no semiárido brasileiro. In: Congresso Internacional de Zootecnia, 8., 2006, Recife. **Anais...** Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco 2006. p. 59-76.
- SANTINI, M.; CACCAMO, G.; LAURENTI, A.; NOCE, S.; AND VALENTINI, R. A multicomponent GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index, **Appl. Geogr.**, v.30, p.394–415, 2010.
- SANTOS, D., BAHIA, V.G.; TEIXEIRA, W.G. Queimadas e erosão do solo. **Inf. Agropec.**, v.16, n.176, p.62-68, 1992.
- SEPEHR, A. et al. Quantitative assessment of desertification in south of Iran using MEDALUS method. **Environmental monitoring and assessment**, v. 134, n. 1-3, p. 243-254, 2007.
- SILVERMAN, B. W. **Density estimation for statistics and data analysis**. CRC press, 1986.
- SIETZ, D.; UNTIED, B.; WALKENHORST, O.; LÜDEKE, M. K. B.; MERTINS, G.; PETSCHER -HELD, G.; SCHELLNHUBER, H. J. Smallholder agriculture in Northeast Brazil: Assessing heterogeneous human-environmental dynamics. **Regional Environmental Change**, v. 6, p.132-146. 2006.
- SOARES-FILHO, B.; ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G.; DIAZ, V.; DEL CARMEN, M.; VOLL, E. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém–Cuiabá corridor. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, 745-764, 2004.
- SOMMER, S.; ZUCCA, C.; GRAINGER, A.; CHERLET, M.; ZOUGMORE, R.; SOKONA, Y.; HILL, J.; DELLA PERUTA, R.; ROEHRIG, J.; WANG, G. Application of indicator systems for monitoring and assessment of desertification from national to global scales. **Land Degradation & Development**, v.22, p.184–197, 2011.
- SUD, Y.C.; CHAO, W.C; WALKER, G.K. Dependence on rainfall on vegetation: theoretical considerations, simulations experiments, observations and inferences from simulated atmospheric soundings. **Journal of Arid Environments**, v. 25, n. 1, p. 5-18, 1993.

SUERTEGARAY, D. Desertificação: recuperação e desenvolvimento sustentável. In: GUERRA, A. J.T; CUNHA, S. B. (eds.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

SYMEONAKIS, E.; KARATHANASI, N.; KOUKOULAS, S.; PANAGOPOULOS, G. Monitoring sensitivity to land degradation and desertification with the environmentally sensitive area index: the case of Lesvos Island, **Land Degrad. Dev.** 2014. DOI: 10.1002/ldr.2285.

THORNES, J. B. Stability and instability in the management of Mediterranean desertification. In: Wainwright, J.; Mulligan, M. (eds). **Environmental modelling: finding simplicity in complexity**. Chichester, UK: Wiley, 2004. p. 303-315.

THORNTON, C.W. **Atlas of climatic types in the United States. Washington, D.C. :** U.S. Department of Agriculture/Forest Service, 1941. (Miscell Publ. nº 421).

TRICART, J. Ecodinâmica. Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN (Recursos Naturais e Meio Ambiente), 1977. 91 p.

UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION (UNCCD). **United Nations convention to combat drought and desertification in those countries experiencing serious droughts and/or desertification, particularly in Africa**. Paris, 1994. P. 14-15. (A/AC.241/27).

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). : **Map of the world distribution of arid regions: Map at Scale 1 : 25.000000 With Explanatory Note, MAB Technical Notes 7**, UNESCO, 1979. 54 p.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). News of Interest. Desertification Control Bulletin: a bulletin of word events in the control of desertification, restoration of degraded lands and reforestation, USA: **United Nations Environment Programme (Unep)**, n. 27, p. 93-96, 1995.

VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D.F. TOPODATA: Brazilian full coverage refinement of SRTM data, **Applied Geography**, v.32, p.300-309, 2012.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. O. **Metodologia para a identificação de processos de desertificação - manual de indicadores**. Recife, PE: SUDENE-DDL, 1978. 20 p.

VERBURG P. et al. Land use change modelling: current practice and research priorities. **Geo Journal**, v. 61, n. 4, p. 309-324. 2004.

VERBURG, P. H.; KONING, G. H. J.; KOK, K.; VELDKAMP, A.; BOUMA, J. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. **Ecological Modelling**, v. 116, n. 1, p. 45-61, 1999.

VIANA, M.; RODRIGUES, M. Um índice interdisciplinar de propensão à desertificação (IPD): instrumento de planejamento. **Revista Econômica do Nordeste**, v.30, n.3, p.264-294. 1999.

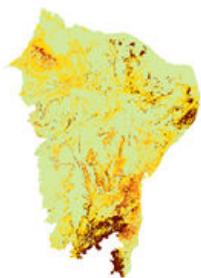
VIEIRA, R. M. S. P.; CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; CARVALHO, V. C.; FERRAZ NETO, S.; AND SESTINI, M. F. Land use and land cover map of a semiarid region of Brazil for meteorological and climatic models. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 129–138, 2013.

WASSENAAR, T.; GERBER, P.; VERBURG, P. H.; ROSALES, M.; IBRAHIM, M.; STEINFELD, H. Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. **Global Environmental Change**, v. 17, n. 1, p. 86-104, 2007.

XIMENES, A. C.; ALMEIDA, C. M.; AMARAL, S.; ESCADA, M. I. S.; AGUIAR, A. P. A. Modelagem dinâmica do desmatamento na Amazônia. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 14, n. 3, p. 370-391. 2008.

ANEXO 1 – MAPAS DE SUSCEPTIBILIDADE (MS)

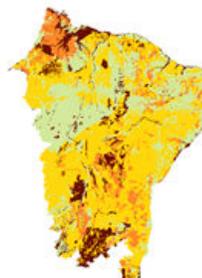
MS_Declividade



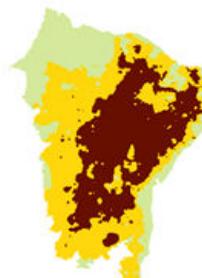
MS_Geologia



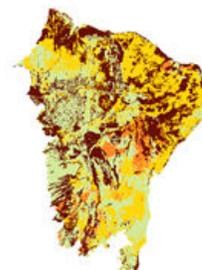
MS_Geomorfologia



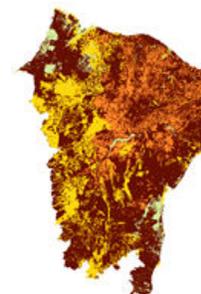
MS_Clima



MS_Pedologia



MS_UsoCob



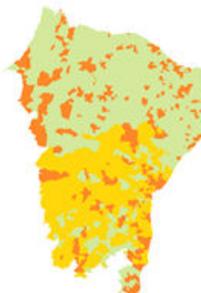
MS_UC



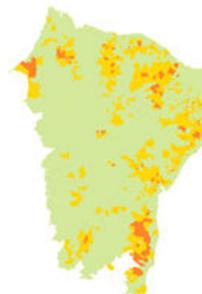
MS_Queimadas



MS_IDH



MS_Pecuaría



MS_PopRural



Legenda

