

# **DESERTIFICAÇÃO**

## **ANÁLISE E MAPEAMENTO**



Neison Cabral Ferreira Freire  
Admilson da Penha Pachêco

# DESERTIFICAÇÃO

## ANÁLISE E MAPEAMENTO

Recife  
2011

Editora  
Universitária  UFPE



Fundação  
Joaquim  
Nabuco 



**PROPESQ**  
PRÓ-REITORIA PARA ASSUNTOS  
DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. Proibida a reprodução total ou parcial, por qualquer meio ou processo, especialmente por sistemas gráficos, microfílmicos, fotográficos, reprográficos, fonográficos e videográficos. Vedada a memorização e/ou a recuperação total ou parcial em qualquer sistema de processamento de dados e a inclusão de qualquer parte da obra em qualquer programa juscibernético. Essas proibições aplicam-se também às características gráficas da obra e à sua editoração.

## Conselho Editorial

Profa. Dra. Alexandrina Sobreira (Fundação Joaquim Nabuco)

Profa. Dra. Lúcia Xavier (Fundação Joaquim Nabuco)

Profa. Dra. Regina Lins (Universidade Federal de Alagoas)

Revisão: Autores

Design gráfico: Elvira de Paula

Imagens: Neison Cabral Ferreira Freire

Catálogo na fonte: Bibliotecária Joselly de Barros Gonçalves, CRB4-1748

---

F866d Freire, Neison Cabral Ferreira.  
Desertificação : análise e mapeamento / Neison Cabral Ferreira Freire, Admilson da Penha Pachêco. – Recife : Ed. Universitária da UFPE, 2011.  
93 p. : il., gráfs., mapas.  
  
Inclui referências e apêndice.  
ISBN 978-85-7315-480-1 (broch.)  
  
1. Desertificação. 2. Monitorização ambiental. 3. Impacto ambiental – Avaliação. 4. Degradação ambiental – Xingó (Mesorregião). I. Pacheco, Admilson da Penha. II. Título.

---

## Agradecimentos

Ao Corpo Docente da Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Nível Mestrado, do Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco, em especial à Profa. Dra. Verônica Maria Costa Romão, pelo apoio contínuo à pesquisa científica, e ao Prof. Dr. Admilson da Penha Pachêco, orientador acadêmico; à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior; ao INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – que, através do CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – na pessoa do Sr. Eleutério Fernandes, forneceu as imagens e os dados necessários à realização da pesquisa, e ao Prof. Eduardo Camargo pelos ensinamentos no Spring; ao Instituto de Desenvolvimento Científico e Tecnológico de Xingó que, através do GeoXingó – Laboratório de Geoprocessamento de Xingó – possibilitou as pesquisas de campo na vasta região em estudo, cujo colega e amigo Eng. Cartógrafo Helder Gama trouxe uma valiosa contribuição ao processamento e análise dos dados, além do Eng. Agrônomo Adriano Amorim que muito colaborou na coleta de dados locais, da Profa. Wbaneide Andrade pelo valioso material bibliográfico sobre desertificação e do Administrador Ronaldo Melo que viabilizou a pesquisa de campo; à Geógrafa Débora Moura, doutora em Biologia Vegetal pela UFPE pela contribuição na extensa revisão bibliográfica de Xingó; ao amigo Administrador Rafael Luiz Durães de Sant’Anna, pelo apoio na pesquisa e à Arquiteta Paula Farias, pelo carinho e amizade de longa data.

Os autores também agradecem a valiosa contribuição do Conselho Editorial, constituído pelas Profas. Dras. Alexandrina Sobreira, Lúcia Xavier e Regina Lins.



Lista de Abreviaturas e Siglas .....	9
<b>Capítulo 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 2 – A TRANSDISCIPLINARIDADE DA DESERTIFICAÇÃO .....</b>	<b>17</b>
2.1 – Uma conceituação enquanto fenômeno antrópico .....	17
2.2 – Os indicadores dos processos desertificatórios .....	23
<b>Capítulo 3 – O SENSORIAMENTO REMOTO E OS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NO MONITORAMENTO AMBIENTAL .....</b>	<b>31</b>
3.1 – O Processamento Digital de Imagens (PDI) na detecção de áreas degradadas .....	31
3.1.1 – Princípios do Sensoriamento Remoto .....	31
3.1.2 – PDI e Extração de Informações em imagens de satélite	37
3.1.3 – Detecção de áreas degradadas .....	40
3.2 – O Comportamento Espectral dos alvos naturais da Caatinga ...	41
<b>Capítulo 4 – A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL EM XINGÓ: UMA VISÃO SINÓTICA NUMA PERSPECTIVA ESPECTRO-TEMPORAL ...</b>	<b>47</b>
4.1 – Generalidades .....	47
4.2 – Materiais .....	48
4.2.1 – Dados .....	48
4.2.2 – Equipamentos .....	50
4.2.3 – Programas Computacionais .....	50
4.3 – Metodologia .....	52
4.3.1 – Tratamento dos Dados .....	52
4.3.2 – Processamento dos Dados .....	52
4.3.3 – Mapeamento Temático .....	71
4.4 – Resultados Obtidos .....	73

<b>Capítulo 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>77</b>
5.1 – Energia e pobreza: a dualidade intrínseca de Xingó – uma discussão .....	77
5.2 – 1989 – 2003: o recrudescimento dos indicadores ambientais nas áreas desertificadas .....	78
<b>Referências .....</b>	<b>82</b>
<b>Apêndice – Mapa Temático das Áreas de Risco à Desertificação na Região de Xingó .....</b>	<b>93</b>

---

## Lista de Abreviaturas e Siglas

- CAD – *Computer Aided Design*
- CBERS – *China-Brazil Earth Remote Sensing*
- CD – *Compact Disk*
- CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco
- CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica
- CNUMAD - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – Eco'92, Rio de Janeiro
- CP – Componente Principal
- CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
- DGI – Divisão de Geração de Imagens, INPE, Cachoeira Paulista/SP
- DIGEO – Divisão de Geociências
- DLIS – Desenvolvimento local, integrado e sustentável
- DSG-3a.DL – Diretoria de Serviço Geográfico/3a. Divisão de Levantamentos, Ministério do Exército, Governo do Brasil
- DSG-5a.DL – Diretoria de Serviço Geográfico/5a. Divisão de Levantamentos, Ministério do Exército, Governo do Brasil
- DXF – *Data Exchange Format (Autodesk, Inc.)*
- EEM – Espectro Eletromagnético
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EMBRATUR – Empresa Brasileira de Turismo, Governo do Brasil
- ETM+ – *Enhanced Thematic Mapper Plus*
- ETP – Evapo-Transpiração Potencial
- FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*
- FIG – Federação Internacional dos Geômetras
- GPS – *Global Positioning System*
- HD – *Hard Disk*
- IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IBGE/DIGEO – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/Divisão de Geociências

IHS – *Intensity, Hue, Saturation* (intensidade, matiz e saturação)  
IMOV – Média Espacial Móvel  
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
IX – Instituto de Desenvolvimento Científico e Tecnológico de Xingó  
LEGAL – Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico  
MAXVER – Máximo Verossimilhança  
MMA – Ministério do Meio Ambiente, Governo do Brasil  
MSB – Mapeamento Sistemático Brasileiro  
NASA – *North American Spacial Agency*, Governo dos EUA  
NC – Nível de Cinza  
NDVI – Índice da Diferença Normalizada de Vegetação  
ONU – Organização das Nações Unidas  
PC – Ponto de Controle  
PDI – Processamento Digital de Imagens  
PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica  
PI – Plano de Informação  
PNCD/MMA – Programa Nacional de Combate à Desertificação/Ministério do Meio Ambiente, Governo do Brasil  
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente  
RGB – *Red, Green, Blue* (respectivamente, canais do vermelho, do verde e do azul)  
RMSE – Erro Médio Quadrático  
SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio a Pequena e Média Empresa  
SAD-69 – *South American Datum 1969* (Datum Sul-Americano 1969)  
SGB – Sistema Geodésico Brasileiro  
SVH – Sistema Visual Humano  
SIG – Sistema de Informações Geográficas  
SIGT – Sistema de Informações Geográficas Temporais  
SPRING – Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas  
SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste  
TM – *Thematic Mapper*  
UFAL – Universidade Federal de Alagoas  
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco  
UFS – Universidade Federal de Sergipe  
UHE Xingó – Usina Hidrelétrica de Xingó  
UTM – *Universal Transverse Mercator*

## 1. INTRODUÇÃO

Desde tempos imemoriais, o ser humano luta contra as adversidades do meio ambiente, seja modelando o meio físico ou consumindo seus limitados recursos naturais, numa infinita busca por riqueza e bem-estar materiais. A humanidade vem interagindo de forma complexa sobre a biosfera, modificando habitats naturais e colocando novos desafios às atuais e futuras gerações. Sob o pretexto do crescimento econômico, processos relativamente recentes de modernização vêm trazendo graves desequilíbrios sócio-ambientais a diversas regiões do planeta, notadamente aquelas situadas em países pobres.

Embora muitas vezes detentores de alto patrimônio ecológico, estas regiões não conseguem escapar do ciclo vicioso da pobreza e da destruição ambiental, aumentando a exclusão social e diminuindo a capacidade de carga dos ecossistemas locais. Neste contexto, Sociedade e Natureza precisam estar intimamente correlacionadas num novo paradigma de desenvolvimento sustentável, baseado em princípios da transdisciplinaridade sistêmica de uma “nova” visão desse binômio.

No caso brasileiro, uma das regiões mais afetadas pela crise do modelo de consumo extensivo dos recursos naturais é o semi-árido nordestino, cuja **degradação ambiental** crescente vem ocasionando **processos de desertificação** cada vez mais significativos, trazendo como conseqüências imediatas, dentre outras, a perda da fertilidade do solo e da biodiversidade, a destruição de *habitats* naturais e o êxodo rural. Segundo o Censo Demográfico de 2000 (IBGE, 2003), cerca de 18 milhões de pessoas (ou 42% da população nordestina, ou, ainda, 11% da população brasileira) vivem em regiões de clima semi-árido no Brasil.

Uma discussão conceitual sobre o tema da desertificação evoluiu desde a década de 60 do século passado e se consolidou através do documento intitulado “Agenda 21”, elaborado durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada na ci-

dade do Rio de Janeiro em 1992 – a Eco'92 -, onde, no seu Capítulo 12, definiu-se a desertificação como sendo “a degradação da terra nas zonas áridas, semi-áridas e sub-úmidas secas, resultante de vários fatores, incluindo as variações climáticas e as atividades humanas ” (SACHS, 1993). A preocupação com o tema é de tal ordem que a Organização das Nações Unidas aprovou em 26 de dezembro de 1996 a Convenção Internacional de Combate a Desertificação, sendo ratificada pelo Congresso Nacional Brasileiro no dia 12 de junho de 1997. Desde então, diversas instituições de pesquisa e organizações não-governamentais brasileiras têm se dedicado ao assunto, destacando os esforços desenvolvidos pela Oficina de Trabalho sobre Ciência e Tecnologia para a Sustentabilidade do Semi-árido do Nordeste do Brasil, realizada em novembro de 1999 na cidade do Recife.

Mais recentemente, em setembro de 2003, vários países da África, América Latina e Caribe discutiram o problema durante a 6a. Conferência das Nações Unidas sobre Desertificação e Seca, realizada em Havana, Cuba. Na ocasião, ao analisar as áreas de risco à desertificação, constatou-se que “o processo de degradação do solo e redução de sua cobertura vegetal provoca prejuízos de US\$ 42 bilhões por ano em todo o mundo e afeta diretamente mais de 250 milhões de pessoas” (Folha OnLine, 2003).

Sem dúvida estas conferências internacionais representam um grande esforço político que precisa estar aliado à ação executiva para enfrentar a magnitude do problema, exigindo seu profundo conhecimento para equacionar soluções viáveis, onde a Ciência e a Tecnologia cumprem papel primordial, além da efetiva participação popular que, através dos mecanismos da sociedade civil organizada, devem decidir até onde se pode aproveitar os recursos do meio ambiente sem comprometer irreversivelmente sua utilização pelas futuras gerações.

Historicamente, a região do semi-árido brasileiro inseriu-se dentro de um modelo de desenvolvimento cuja base econômica não estava atrelada às condicionantes sociais, culturais e ambientais da região. As populações sertanejas atingidas pelo problema da desertificação, por exemplo, estão entre as mais pobres do País, com índices de desenvolvimento humano muito abaixo da média nacional. O desafio atual consiste em propor instrumentos tecnológicos que possibilitem análises alternativas e ade-

quadas para a melhoria da qualidade de vida e bem-estar social das populações que habitam essas áreas do semi-árido do Nordeste, visando estabelecer um ponto focal de desenvolvimento regional auto-sustentável de forma multidisciplinar e a partir da compreensão de que o dinamismo da região virá em função do nível de conhecimento, aliado à pesquisa aplicada e às inovadoras técnicas de produção em consonância com as vocações sócio-econômicas da área, escolhendo formas de desenvolvimento sensíveis à questão ambiental e buscando conciliar a exploração eficiente e reciclável dos limitados recursos naturais do semi-árido nordestino - o “capital natural” - e a necessidade urgente de crescimento material das comunidades sertanejas - o “capital construído pelo homem”.

A pesquisa partiu da hipótese que quando ocorre um determinado processo de desertificação, verifica-se um recrudescimento dos indicadores sócio-econômicos, através de relacionamentos geoambientais e antrópicos diretamente vinculados ao fenômeno observado, sendo possível sua identificação através de imagens de satélite e dados censitários.

Neste contexto, portanto, este estudo teve o objetivo de contribuir com a pesquisa aplicada ao mapear e analisar as áreas de risco passíveis de desertificação no semi-árido brasileiro, tomando como estudo de caso uma área geográfica denominada de Região de Xingó, utilizando-se das tecnologias proporcionadas pelo Sensoriamento Remoto e Sistemas de Geoinformação, identificando as possíveis interações entre os meios físico e sócio-econômico e espacializando as ocorrências deste fenômeno ambiental de causas antrópicas.

Objetivou-se, então, avaliar o potencial destes instrumentais tecnológicos para tais finalidades, através de séries temporais e multiespectrais de imagens de satélite combinadas com mapas digitais e dados descritivos dos indicadores sócio-econômicos, onde, no transcorrer da pesquisa, pretendeu-se estabelecer as relações de causa e efeito e documentar a evolução do fenômeno no período em estudo, para então finalizar com algumas proposições de prevenção e combate aos processos de desertificação, consciente de que em um sistema vivo, a compreensão das partes não leva necessariamente à compreensão do todo, pois este necessita de uma contextualização transdisciplinar e integrada.

Além disso, uma proposta metodológica foi formulada no sentido de integrar diversas tecnologias de tratamento da informação espacial com o objetivo de contribuir para a detecção e o combate à desertificação no semi-árido nordestino – um tema atual e em constante evolução no meio acadêmico que desperta um profundo interesse não apenas para a agenda governamental brasileira, como também para todas as nações que lidam com o problema.

Os aspectos conceituais referentes à desertificação como um fenômeno nitidamente antrópico foram tratados no **Capítulo 2**, passando pela análise de seus indicadores de situação (sócio-econômicos e climáticos) e especificamente de desertificação (vegetação, solos e recursos hídricos), ambos consagrados pela literatura científica atual. Características físicas e suscetibilidades da região semi-árida foram descritas, identificando os núcleos de desertificação e enfocando a questão das secas como um fator importante, embora não determinante, dos processos de desertificação, além dos impactos ambientais, sociais e econômicos. Pela importância espectro-textual, os ecossistemas onde predominam a cobertura vegetal de Caatinga foram descritos detalhadamente em seus domínios naturais com relação às diferenças fisionômicas (porte, densidade, espécie e xerofilismo). Assim, a Caatinga foi definida como uma mata tropical seca, que apresenta características relacionadas à deficiência hídrica, com plantas herbáceas anuais, suculência, acúleos e espinhos, sendo constituída de vegetais lenhosos e com uma composição florística não uniforme, resultando num alto grau de biodiversidade. Foi também tratada a questão do desafio do desenvolvimento sustentável no semi-árido nordestino brasileiro, onde a dialética dos limitados recursos naturais e a necessidade de crescimento econômico das populações vem se convertendo numa preocupação prioritária de programas governamentais.

O **Capítulo 3** estudou o potencial do instrumental geotecnológico disponível sob o ponto de vista do meio ambiente, uso do solo e análises espaciais baseadas em processos espaço-temporais e modelos físicos e sócio-econômicos. O Sensoriamento Remoto com o Processamento Digital de Imagens, suas técnicas e resultados obtidos em relevantes trabalhos científicos sobre o tema foram abordados detalhadamente.

Para a extração das informações espaciais e devido à extensa natureza geográfica da região, tornou-se imprescindível a visão sinótica proporcionada pelas imagens de satélite, aliadas às possibilidades de análises temporais e espectrais dos sensores remotos. Foram coletados dados ambientais referentes aos índices pluviométricos do período em estudo, verificando-se quais as melhores datas de aquisição das cenas orbitais, considerando-se picos mensais acumulados de mínimo e de máximo em ciclos climáticos. Os dados, métodos, parâmetros, programas computacionais, equipamentos eletrônicos, procedimentos, análises, pesquisa de campo e resultados obtidos na experimentação laboratorial foram, então, detalhados no **Capítulo 4**. Datas, imagens de satélite, mapas, rotinas, programas e rotinas específicos, dados pluviométricos, censitários e sócio-econômicos foram utilizados dentro de um modelo metodológico e conceitual visando a implementação de um SIG que pudesse modelar o mundo real da área de estudo e, assim, tornar-se capaz de responder às demandas objeto desta pesquisa. Através do cruzamento de diversos dados espaciais e descritivos em séries temporais (1989 – 1995 – 2003), foi então estabelecida uma metodologia para abordar o problema acadêmico sob um ponto de vista alicerçado em um novo paradigma tecnológico: a integração do Sensoriamento Remoto e dos Sistemas de Geoinformação, apoiando-se em suas técnicas de classificação supervisionada e de análise espacial. Para validar os resultados obtidos em laboratório, um conjunto de pontos-objeto georreferenciados foi identificado no campo e então documentado por fotografias digitais do ambiente em estudo.

Observando-se a literatura sobre o tema e de posse dos resultados originados no capítulo anterior, o **Capítulo 5** conclui a pesquisa ao analisar, inicialmente, o paradoxo existente na região entre a modernidade representada pela geração de energia elétrica que alimenta boa parte do Nordeste a partir da instalação da Usina Hidrelétrica de Xingó em 1996 e, por outro lado, o recrudescimento dos indicadores sócio-ambientais nos municípios circunvizinhos à usina. Os dados mostraram, enfim, que, embora utilizando um poderoso recurso natural, a geração de energia não trouxe riqueza econômica às populações desta porção do semi-árido nordestino, mas sim um agravamento da degradação ambiental, inserindo a região num contexto crescente de suscetibilidade à desertificação e con-

seqüente aumento dos índices de pobreza. O capítulo finaliza ao observar algumas proposições de políticas públicas de convivência com a seca e combate à desertificação, evitando, assim, o lugar comum da catástrofe, tão presente nesta área do conhecimento aplicado.

Desse modo, a experimentação laboratorial validada em pesquisas de campo evidenciou o agravamento do problema da degradação ambiental na região de Xingó na última década do século passado, onde se constatou, por exemplo, o aumento de cerca de 91% de solo exposto no período 1989 – 2003, já representando 1.715,71 km<sup>2</sup> da área total de estudo (4.405,29 km<sup>2</sup>) entre os seis municípios circunvizinhos à Usina Hidrelétrica de Xingó (em Alagoas: Olho D'Água do Casado, Piranhas e Pão-de-Açúcar, e em Sergipe: Poço Redondo, Canindé do São Francisco e Porto da Folha). Assim, observou-se, por exemplo, que a classe Caatinga Arbustiva foi totalmente degradada em mais de 69% - índice ambiental alarmante com grandes prejuízos à biodiversidade, à fertilidade do solo e ao aumento do êxodo rural, dentre outras conseqüências negativas. Considerando-se a fragilidade dos ecossistemas da Caatinga e a lenta restauração dos recursos ambientais desta biota, o problema ganha uma dimensão ainda maior.

Concluindo, a pesquisa apresenta os principais resultados obtidos, fazendo uma abordagem final panorâmica sobre o conjunto referenciado, sua contribuição científica e relevância para o conhecimento científico sobre o tema da **desertificação**, especialmente na Região de Xingó.

---

## 2. A TRANSDISCIPLINARIDADE DA DESERTIFICAÇÃO<sup>1</sup>

### 2.1 Uma conceituação enquanto fenômeno antrópico

O termo **desertificação** tem uma definição oficial estabelecida pela ONU. Durante a CNUMAD, em 1992, na cidade do Rio de Janeiro, a Assembleia Geral da ONU aprovou a negociação da “Convenção Internacional de Combate a Desertificação”, iniciada em janeiro de 1993 e concluída em Paris em 17 de junho de 1994 – data estabelecida como o “Dia Mundial de Luta Contra a Desertificação”. Posteriormente, o documento foi aprovado por cerca de 155 países em dezembro de 1996, incluindo o Brasil, sendo finalmente ratificado pelo Congresso Nacional Brasileiro em dezembro de 1997. A Convenção, em seu Capítulo 12, afirma que: **“A desertificação deve ser entendida como a degradação da terra nas zonas áridas, semi-áridas e sub-úmidas, resultante de vários fatores, incluindo as variações climáticas e as atividades humanas”** (SAMPAIO & SAMPAIO, 2002).

O texto da Convenção também define que a desertificação pode ocorrer em função da degradação da terra, das zonas climáticas específicas e dos fatores resultantes de processos antrópicos, podendo se manifestar em qualquer parte do planeta, com exceção das zonas polares e subpolares, sendo tecnicamente estabelecido que o Índice de Aridez (ou seja, uma razão entre a precipitação anual e a evapo-transpiração potencial) compreendida entre 0,05 e 0,65 caracteriza regiões enquadradas no escopo de aplicação da Convenção, sendo este índice adotado para o Atlas Mundial da Desertificação do PNUMA – uma referência mundial

---

<sup>1</sup> Capítulo publicado no formato de artigo em: (1) *Revista Geografia* - v. 15, n. 1, jan./jun. 2006 - Universidade Estadual de Londrina; (2) Moura, Alexandrina (org.). *Políticas Públicas e Meio Ambiente: da economia política às ações territoriais*. Recife: Fundação Joaquim Nabuco, Ed. Massangana, 2009. (p. 129-167).

sobre o tema. Conforme esta definição, “o grau de aridez de uma região depende da quantidade de água advinda da chuva (P) e da perda máxima possível de água através da evaporação e transpiração (ETP)” (BRASIL, 1999), cuja fórmula estabelecida por Thornthwaite em 1941 foi posteriormente ajustada por Penman a fim de que se elaborasse a classificação que é hoje aceita internacionalmente (Tabela 1).

Da Tabela 1, verifica-se que a atuação da Convenção restringe-se, portanto, às regiões áridas, semi-áridas e sub-úmidas secas do mundo, somando cerca de 1/3 de toda a superfície do planeta, ou mais de 5 bilhões de ha (51.720.000 km<sup>2</sup>), afetando direta e indiretamente mais de 100 países, excluindo desse total os desertos, que somam 9.780.000 km<sup>2</sup>, ou 16% da superfície do globo (BRASIL, 2003).

ANDRADE (1999) afirma que o grau de aridez de uma região para outra, no entanto, é muito variável, “havendo aquelas classificadas como hiper-áridas, onde a umidade é muito baixa durante todo ano” e outras consideradas apenas áridas com chuvas esporádicas e, ainda, outras áreas semi-áridas, “quando a estação úmida é curta, de três a quatro meses por ano, permitindo o desenvolvimento de culturas de ciclo vegetativo curto”, situação esta mais próxima da realidade do semi-árido brasileiro.

Tabela 1 - Categorias de clima de acordo com o índice de aridez

Categoria	Índice de Aridez
Hiper-Árido	< 0,05
Árido	0,05 - 0,20
Semi-Árido	0,21 - 0,50
Sub-úmido seco	0,51 - 0,65
Sub-úmido e úmido	> 0,65

Fonte: MMA, 2003.

Entretanto, convém observar que “a aridez ou a semi-aridez, não tornam estas terras improdutivas, apesar da pobreza dos solos em matéria orgânica, uma vez que os mesmos podem ser enriquecidos com adubos orgânicos ou podem ser irrigados” (ANDRADE, 1999), como ocorre

em diversos países do mundo. Isto permite afirmar, então, que a variação da suscetibilidade à desertificação não pode ser unicamente expressa pelo índice de aridez, uma vez que outros fatores, como por exemplo, as atividades humanas sobre os recursos naturais, podem intervir. Assim, há que se considerar que mesmo atendendo aos pesquisadores, a Convenção da ONU precisa de adequações às diversas realidades regionais, podendo haver uma ampliação posterior do conceito de desertificação então adotado.

Apesar dos diversos estudos realizados, não há, contudo, um consenso científico sobre a dimensão e abrangência do problema, cujo desencontro de interpretações do texto da Convenção sobre Desertificação por parte da mídia tem causado certa confusão sobre o tema perante a sociedade. Segundo SAMPAIO & SAMPAIO (2002), estes desencontros têm três causas principais: 1) O conceito de desertificação não foi desenvolvido pelo uso, mas sim de entendimentos diplomáticos, gerando ambigüidades; 2) o termo remete à formação do deserto nos moldes da expansão do Saara africano - situação pouco provável de vir a existir, por exemplo, no semi-árido brasileiro e necessitando, portanto, de uma melhor significação científica; e, 3) as explicações do texto são vagas e carecem de melhor aplicabilidade para a realidade brasileira.

De acordo com o IBAMA (2003), “no Brasil, a desertificação encontra-se especialmente considerada na ‘Política Nacional de Controle à Desertificação’, cujas diretrizes destacam, entre seus marcos referenciais, ‘a necessidade do fortalecimento da base de conhecimentos e desenvolvimento de sistemas de informação e monitoramento para as regiões susceptíveis à desertificação e à seca’”.

Por outro lado, apesar de séculos de colonização européia do semi-árido brasileiro, ainda não há pesquisas científicas em larga escala que evidenciem “até onde os processos de uso dos recursos naturais podem sustentar-se sem promover a degradação e tão pouco se sabe em quanto a extração de lenha e produção de carvão, a pecuária e a agricultura influenciam na perda de biodiversidade, da produtividade do solo ou em outros fatores de degradação da terra” (ARAÚJO et alli, 2002).

Nas justificativas da própria Convenção da ONU consta que “o crescimento da população e da densidade populacional contribuem para

a exploração dos recursos naturais além de sua capacidade de suporte” (BRASIL, 1999). Desse modo, este aumento populacional, alimentar e energético, além do consumo cada vez maior dos recursos naturais, vem provocando importante impacto nas regiões semi-áridas. Contribui para o problema a inadequação dos sistemas produtivos que agrava o quadro social e leva população a migrar para os centros urbanos, trazendo, em última instância, um desequilíbrio regional.

No caso brasileiro, a desertificação está nitidamente vinculada ao fator de degradação da terra, implicando em redução ou perda de produtividade biológica ou econômica. Um exemplo típico é o caso do município de Cabrobó, em Pernambuco, onde “o desaparecimento das camadas de solo fértil da ilha (de Assunção) foi resultado direto da ação desastrosa do homem”, onde “projetos de irrigação mal conduzidos levaram água em excesso para o terreno e alteraram drasticamente a composição química do solo. Com as altas temperaturas do Sertão e sem um sistema de drenagem adequado, a água evaporou rapidamente e ficaram apenas os sais concentrados na terra, numa quantidade tão alta que praticamente nenhuma planta consegue sobreviver”, resultando na salinização e erosão de diversas áreas (Jornal do Commercio, 1999).

Neste contexto, SAMPAIO & SAMPAIO (2002) afirmam que “desertificação é um processo, o resultado de uma dinâmica” e “para ser caracterizada precisa-se de uma série temporal de dados”, pois um quadro instantâneo não permite avaliar uma variação no tempo.

De acordo com a FAO (2003), as degradações da terra induzidas pelo homem têm cinco componentes:

- a) Degradação das populações animais e vegetais (degradação biótica ou perda da biodiversidade) de vastas áreas do semi-árido devido à caça e extração de madeira;
- b) Degradação do solo, que pode ocorrer por efeito físico (erosão hídrica ou eólica e compactação causada pelo uso da mecanização pesada) ou por efeito químico (salinização ou sodificação);
- c) Degradação das condições hidrológicas de superfície devido à perda da cobertura vegetal;

- d) Degradação das condições geohidrológicas (águas subterrâneas) devido a modificações nas condições de recarga;
- e) Degradação da infraestrutura econômica e da qualidade de vida dos assentamentos humanos.

No Brasil, segundo o IBAMA (2003), as áreas sujeitas aos processos de desertificação correspondem, basicamente, àquelas oficialmente delimitadas como “Polígono das Secas”, ocupando cerca de 1.083.790,7 km<sup>2</sup>, pois estão sujeitas a períodos curtos ou prolongados de estiagens. Estende-se por boa parte do Nordeste brasileiro, atingindo também uma pequena porção ao norte do Estado de Minas Gerais. Trata-se do “Trópico Semi-árido”, incorporando características climáticas do semi-árido e do sub-úmido seco, possuindo estruturas geológicas referentes ao escudo cristalino e às bacias sedimentares, morfoestruturas com blocos soerguidos e depressões apresentando formações de Caatinga e de Cerrado. Segundo dados do Censo Demográfico 1991 (IBGE, 2003), a área tem cerca de 18,5 milhões de habitantes, sendo 8,6 milhões na zona rural, com densidade demográfica de 20 hab/km<sup>2</sup>. Isto representa 42% da população do Nordeste, ou, ainda, 11% da população brasileira.

O Governo brasileiro adotou, então, um padrão de predisposição ou suscetibilidade à desertificação que varia entre áreas consideradas de elevado, moderado e baixo riscos à desertificação, conforme a classe de grandeza do Índice de Aridez e os processos antrópicos de degradação da terra no semi-árido nordestino brasileiro.

O MMA (BRASIL, 2003) considera que “o processo da desertificação na região semi-árida brasileira vem comprometendo de forma ‘muito grave’ uma área de 98.595 km<sup>2</sup> e de forma ‘grave’ área equivalente a 81.870 km<sup>2</sup>, totalizando 181.000 km<sup>2</sup>, com a geração de impactos difusos e concentrados sobre o território”.

Para ilustrar o problema, o IBAMA (2003) elaborou um mapa de ocorrência de áreas desertificadas, onde classifica as áreas “moderadas”, “grave” e “muito grave”, com Núcleos de Desertificação”, conforme mostra a Figura 1. Segundo o MMA (BRASIL, 2003), os núcleos de desertificação são áreas limitadas onde os danos são de profunda gravidade, identificando-se quatro núcleos principais, onde tais processos podem

ser considerados extremamente graves. São eles: Gilbués/PI, Irauçuba/CE, Seridó/RN e Cabrobó/PE, totalizando cerca de 15.000 km<sup>2</sup>.

Ampliando essa vertente internacional que conceitua a desertificação enquanto fenômeno antrópico, a 6a. Convenção das Nações Unidas de Combate a Desertificação e Seca, realizada em Havana, Cuba, em setembro de 2003, constatou que “o processo de degradação do solo e redução de sua cobertura vegetal provoca prejuízos de US\$ 42 bilhões por ano em todo o mundo e afeta diretamente mais de 250 milhões de pessoas” (Folha OnLine, 2003).

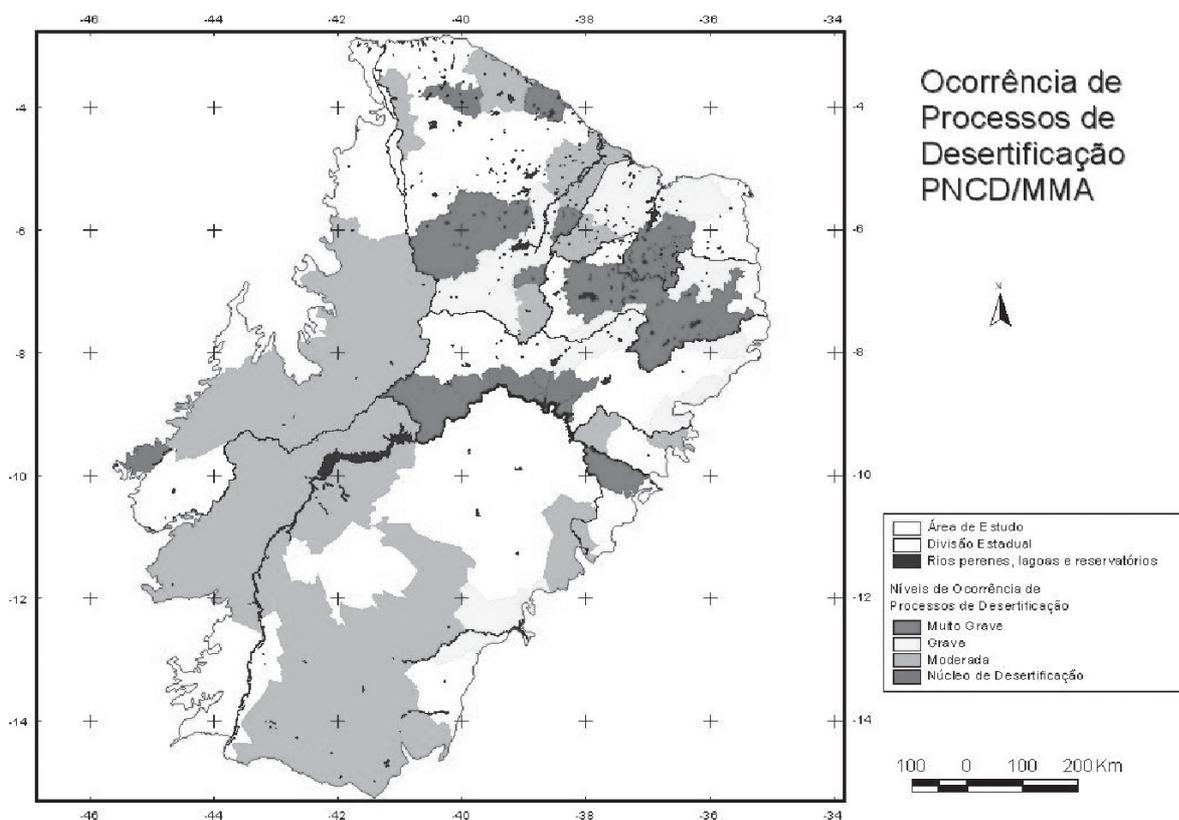


Figura 1 – Mapa de Ocorrência de Desertificação no Brasil.

Fonte: IBAMA, 2003.

A imprensa vem registrando continuamente o sofrimento das comunidades sertanejas atingidas pelo problema da desertificação e da seca e suas já conhecidas conseqüências: pobreza, miséria, desnutrição, mortalidade infantil elevada e êxodo rural, dentre outras. De fato, ao longo do tempo, a mídia vem encarando a questão como uma fatalidade geográfica, quando na verdade um conjunto cada vez maior de trabalhos cientí-

ficos evidencia substancialmente as ações predatórias do homem sobre o meio ambiente como um fator primordial no agravamento da situação sócio-econômica (SACHS, 2000).

Trata-se de um sério e crescente problema de âmbito mundial, onde o Brasil está social, econômico, cultural e ambientalmente inserido, cabendo um papel primordial ao binômio “Ciência & Tecnologia” no sentido de prover os instrumentos, técnicas, dados e procedimentos adequados e necessários à identificação, localização, quantificação e avaliação das ações e resultados das políticas públicas de combate à desertificação, tanto no Brasil, como no mundo, esperando-se uma contribuição significativa das Tecnologias da Geoinformação ao permitir uma análise espacial do problema.

## **2.2 Os indicadores de desertificação**

Determinar com precisão quais são os indicadores de desertificação não é uma tarefa fácil, devido, por um lado, à falta de consenso entre os pesquisadores no âmbito mundial e, por outro, às diversas particularidades regionais. O assunto, porém, reveste-se de fundamental importância, pois os critérios adotados serão primordiais na delimitação das regiões desertificadas e, conseqüentemente, no estabelecimento de ações que darão suporte às medidas de prevenção, reabilitação e recuperação das áreas degradadas, por parte do poder público e da sociedade civil organizada, além de definir a prioridade geográfica de maior urgência de intervenção no combate à desertificação.

O processo de desertificação pode ser caracterizado como um ciclo vicioso, onde “suas causas também são seus efeitos” (ARAÚJO et alli, 2002). O fenômeno se inicia com a degradação crescente da cobertura vegetal para suprir, essencialmente, demandas enérgicas (carvão vegetal) da população ou aberturas de novas áreas para pastagem. A partir deste início, com o curto regime de chuvas irregulares e torrenciais típico do semi-árido nordestino, começa a erosão nas áreas atingidas, que por sua vez causa a diminuição da capacidade de retenção de água pelos solos e a conseqüente redução de biomassa, uma vez que menores aportes de matéria orgânica chegam ao solo. No processo, a vegetação se torna cada vez

mais rala e pobre em biodiversidade e porte, favorecendo a radiação solar que, por sua vez, disseca ainda mais o solo e acelera a erosão, aumentando a aridez, e retroalimentando um processo de “simplificação ecológica, onde a ação do homem tem tido papel fundamental”.

Detalhando suas causas, o IBAMA (2003) lista os principais agentes considerados desencadeadores da desertificação:

- Expansão e intensificação de uso agrícola sobre terras secas, não respeitando sua capacidade de suporte;
- Redução dos períodos de pousio dos campos de cultivo ou pastagem, não atendendo o tempo necessário à sua recomposição;
- Utilização de técnicas de irrigação mal dimensionadas, não dispondo de adequado sistema de drenagem ou baseando-se na utilização de águas de qualidade duvidosa;
- Intensa coleta ou corte de plantas para alimentos, fins medicinais, energéticos, de construção civil ou assemelhados, reduzindo o material genético;
- Desmatamento indiscriminado, especialmente atingindo grandes extensões, encostas, nascentes, áreas de solo incipiente ou pobre;
- Queimadas, implementadas periódica e sistematicamente desassociadas à utilização de técnicas de manejo ou controle;
- Sobrepastoreio, ignorando a capacidade de suporte do ambiente;
- Mineração, realizada à parte de um sistema de manejo e recuperação dos recursos;
- Falta de políticas de uso da terra, para proceder ao zoneamento das áreas e disciplinar o uso e ocupação dos solos;
- Elevadas concentrações populacionais ou repentinos afluxos migratórios, sobrecarregando os recursos naturais;
- Falta de ajustes das atividades antrópicas às naturais flutuações do ambiente;
- Forças internacionais que estimulam a superexploração dos recursos; entre outros.

Por sua vez, considerando os aspectos climáticos, hidrogeológicos, morfodinâmicos, edáficos, fitogenéticos, zoogenéticos e antrópicos, resultam da desertificação as seguintes conseqüências (IBAMA, 2003):

- Redução da precipitação atmosférica e do episódico fornecimento de água ao solo;
- Redução de reservas hídricas;
- Elevação do lençol freático;
- Mudanças no macro e microclima;
- Aumento da aridez;
- Salinização dos solos e dos recursos hídricos;
- Exposição dos solos;
- Compactação dos solos;
- Impermeabilização dos solos;
- Acúmulo de substâncias tóxicas nos solos;
- Surgimento e movimentação de dunas;
- Atividade e aceleração de processos de erosão hídrica e eólica;
- Perda de nutrientes e microorganismos do solo;
- Mudanças no padrão de drenagem;
- Assoreamento de rios, reservatórios, áreas úmidas e sistemas marinhos;
- Mudanças na composição da vegetação;
- Redução das populações;
- Risco à extinção de espécies;
- Redução da biodiversidade (vegetal, animal e da paisagem);
- Colonização por invasoras;
- Redução da viabilidade de energéticos florestais;
- Desaparecimento da fauna nativa;
- Redução da viabilidade de materiais naturais de uso ou importância cultural;
- Perda de rebanhos;
- Perda de produtividade agrícola;
- Importação de produtos básicos;
- Mudanças nos sistemas de produção;
- Empobrecimento da população;

- Desestruturação da sociedade;
- Abandono de terras;
- Êxodo rural;
- Perda do conhecimento tradicional das áreas abandonadas;
- Fomento da instabilidade política na região;
- Redução das condições de saúde;
- Emigração;
- Aumento das tensões sociais em áreas receptoras de migrantes;
- Criação de bolsões de pobreza;
- Aumento da dependência de benefícios do Estado; entre inúmeros outros.

VASCONCELOS SOBRINHO (1978) formulou as primeiras tentativas científicas no Brasil de determinar indicadores para os processos de desertificação, ao defender que “a desertificação é um fenômeno de sistemas no qual intervêm o clima, os solos, a flora, a fauna e o homem”, sendo causada pela fragilidade dos ecossistemas frente à pressão excessiva exercida pelas populações humanas ou às vezes pela fauna autóctone, perdendo produtividade e capacidade de recuperação autônoma.

Em 1991 FERREIRA *et alli* (1994) sugeriram 19 indicadores de desertificação, a partir das proposições de RODRIGUES *et alli* (1992) feitas em 1982, baseando-se no critério de “presença/ausência” ao nível de microrregião. Segundo ARAÚJO *et alli* (2002), esta forma de análise “linearizou o efeito dos indicadores, desconsiderando seus pesos e suas classes de intensidade ou frequência”, pois muitos indicadores apresentavam ambivalência, sobreposição e/ou interação, comprometendo o modelo defendido pelos autores. Ao basear a análise em dados censitários e bibliográficos, o modelo deixou a desejar pela ausência de dados de campo que evidenciassem a dinâmica dos indicadores.

Outra questão falha na determinação destes indicadores de desertificação, também evidenciada por SAMPAIO & SAMPAIO (2002), diz respeito à escala dos dados, muitas vezes restritos a microrregiões consideradas “homogêneas”, quando, na verdade, as tendências de comportamento espacial dos dados são desprezadas, mesmo considerando-se

como unidade administrativa de trabalho o município. Assim, a precisão da análise cai, pois como localizar aqueles dados que não seguem fronteiras políticas, como, por exemplo, o desmatamento? Técnicas de Processamento Digital de Imagens em Sensoriamento Remoto esclarecem a questão ao permitir, por exemplo, o registro da energia eletromagnética refletida pelos alvos terrestres em resolução espacial compatível com as escalas desejadas.

Com o propósito de uniformizar os procedimentos de identificação e monitoramento dos processos de desertificação, MATALLO (1999) propôs uma extensa e criteriosa metodologia que agrupa os indicadores em dois grandes grupos: Situação e Desertificação. Esta classificação representa um marco referencial de consenso entre os pesquisadores da atualidade.

Como Indicadores de Situação, estão agrupados aqueles indicadores voltados aos dados sociais, econômicos e climáticos. Uma vez que o antropismo é determinante para a degradação ambiental, os dados sócio-econômicos caracterizariam áreas de risco à desertificação, assim como os indicadores de precipitação, insolação e evapo-transpiração – todos constantemente monitorados segundo métodos adequados. No outro grupo, como Indicadores de Desertificação propriamente ditos, estariam os indicadores ambientais: índices de vegetação, solos e recursos hídricos. Segundo o autor, os indicadores devem ser usados em combinação, “pois nenhum deles pode, sozinho, prover as informações necessárias para o diagnóstico da desertificação” (MATALLO, 1999). Apreende-se deste modelo a complexidade e, mais que a multidisciplinaridade, uma transdisciplinaridade do estudo dos processos de desertificação. São necessários diversos estudos regionais e locais, em escalas apropriadas e compatíveis, levando-se em consideração a grande diversidade do semi-árido brasileiro. Neste contexto, MATALLO (1999) concluiu que “o sistema de indicadores existentes, ainda que insuficientes e necessitando de desenvolvimentos, são os únicos instrumentos disponíveis para a compreensão do problema”.

VIANA & RODRIGUES (1999) propuseram um “Índice Interdisciplinar de Propensão à Desertificação”, construindo uma matriz de variáveis naturais, agrícolas, econômicas, demográficas e sociais, diretamente rela-

cionadas com o fenômeno. Aplicando um modelo estatístico multivariado, os autores elaboraram um índice para detecção de desertificação no Ceará, baseado nos indicadores propostos pela Convenção sobre Desertificação da ONU. Utilizaram uma formulação matemática fundamentada em 65 variáveis que representassem propensão à desertificação. Entretanto, devido à escala do problema na vasta região em estudo, o método deixa de observar as variações espaciais mencionadas por SAMPAIO & SAMPAIO (2002), ao considerar a unidade de pesquisa por município, excluindo, por exemplo, as possibilidades de dados espectrais e temporais oriundos das imagens orbitais.

Pelas facilidades de Análise Espacial com dados advindos de imagens de satélite, ACCIOLY et alli (2001) afirmam que “um dos indicadores da desertificação é a redução da cobertura de plantas perenes”, aliado à degradação dos solos em áreas com menor cobertura vegetal. Segundo os autores, estas duas condições provocam o aumento do albedo das superfícies sujeitas à degradação.

Portanto, no contexto desta pesquisa, referente aos indicadores de desertificação, observou-se que:

- a) o consenso das referências bibliográficas indica as reais possibilidades de extração de informações pertinentes à detecção de processos de desertificação através de imagens de satélite;
- b) a complexidade dos indicadores propostos e as reais condições de aquisição de dados no âmbito de uma pesquisa acadêmica no Brasil não permitem uma abrangência universal dos indicadores propostos;
- c) uma combinação de indicadores de desertificação pode trazer uma valiosa contribuição à pesquisa científica na região em estudo, a partir da manipulação e análise dos dados disponíveis e significativos para a escala e área de estudo proposta;
- d) a urgência que o problema requer frente aos novos desafios para a sociedade brasileira, especialmente no campo do desenvolvimento sustentável, justificam a aquisição, modelagem e tratamento dos dados do maior número possível dos indicadores propostos pelos autores.

Uma vez que os solos predominantes na área de estudo têm características semelhantes quanto à fragilidade (erosão) e deficiência em matéria orgânica (SUDENE, 1975; EMBRAPA, 1999), considerou-se para a detecção de desertificação na área de estudo os seguintes indicadores, da classificação proposta por MATALLO (1999) e que são essenciais à compreensão do fenômeno na Região de Xingó:

a) Indicadores de Situação:

- Precipitação Pluviométrica

b) Indicadores de Desertificação:

- Cobertura Vegetal
- Estratificação da Vegetação
- Uso do Solo Agrícola
- Densidade Demográfica



### 3. O SENSORIAMENTO REMOTO E OS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NO MONITORAMENTO AMBIENTAL

#### 3.1 O Processamento Digital de Imagens (PDI) na detecção de áreas degradadas

##### 3.1.1 Princípios do Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto trata da aquisição de dados de um objeto ou cena por um sensor que está distante dos alvos (COLWELL, 1983). Fotografias aéreas, imagens de satélite e de radar são exemplos de produtos gerados a partir de dispositivos remotamente sensoriados.

Os sensores utilizados em Sensoriamento Remoto basicamente registram a radiação eletromagnética – uma energia transmitida pelo espaço na forma de ondas elétricas e magnéticas (STAR & ESTES, 1990). JENSEN (1999) afirma que os sensores remotos são feitos por detectores que registram comprimentos de onda específicos no espectro eletromagnético. Este espectro abrange o intervalo de radiação eletromagnética que vai desde as ondas cósmicas, até as ondas de rádio.

A diferença no comprimento de onda da energia eletromagnética está diretamente relacionada com a quantidade de energia que a onda carrega, diferenciando, assim, as formas de radiação (refletida e emitida – ou termal), podendo-se afirmar que quanto menor o comprimento de onda da radiação, maior é a sua energia (NOVO, 1989).

Segundo MOREIRA (2003), “para o sensoriamento remoto, a energia solar é a base de todos os princípios em que se fundamenta essa tecnologia”, pois mesmo os sensores ativos, como os radares, necessitam da radiação solar para manter suas reservas de energia, necessárias ao fun-

cionamento dos equipamentos e permanência em órbita da Terra. “Quando o Sol é utilizado como fonte de energia, em Sensoriamento Remoto, o que se mede é a energia refletida pelos diversos objetos da superfície terrestre” (INPE, 2001).

O processo de fusão nuclear que ocorre na zona radioativa do Sol produz várias radiações eletromagnéticas, com diferentes comprimentos de onda contidos no intervalo entre 0,3 a 4,0  $\mu\text{m}$ , sendo por esta razão denominadas de ondas curtas. Por outro lado, as “radiações produzidas pela emissão de energia da Terra são chamadas de ondas longas. Além disso, o Sol emite radiações eletromagnéticas com diferentes intensidades radiantes, e as de maiores intensidades localizam-se na região do visível e do infravermelho próximo” (MOREIRA, 2003), onde a maioria das atividades em Sensoriamento Remoto é desenvolvida. Outras regiões, ou faixas compõem o espectro eletromagnético, de acordo com suas características físicas de detecção de energia (JENSEN, 1999).

Os sensores são equipamentos formados por sistemas fotográficos ou óptico-eletrônicos utilizados para a coleta da energia eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos terrestres, convertendo-a em sinal passível de ser registrado para uma posterior extração de informações do ambiente (NOVO, 1989). O INPE (2001) afirma que os elementos básicos da fase de aquisição de dados pelos sensores são: “energia radiante, fonte de radiação, objeto (alvo), trajetória e sensor (sistema de imageamento óptico e detector)”.

O ciclo total do processo envolve simultaneamente a emissão, absorção, reflexão e transmissão da energia eletromagnética. Neste processo, a atmosfera interage com a radiação solar, interferindo na energia final registrada pelo sensor (FLORENZANO, 2002). De fato, segundo MOREIRA (2003), para o Sensoriamento Remoto, “o estudo da atmosfera terrestre como um todo é fundamental, porque constitui um meio natural que interfere tanto na radiação incidente (irradiância), quanto na parte da radiação que é refletida ou emitida (radiância) pelos alvos da superfície que, eventualmente, será coletada pelos sistemas sensores”, manifestando-se na trajetória (fenômenos de refração e difração), na velocidade e absorção em determinadas faixas do espectro eletromagnético. Ao atravessar a atmosfera terrestre e chegar à superfície terrestre, a radiação solar é for-

temente atenuada pela “reflexão, espalhamento e absorção pelos constituintes atmosféricos, por partículas dispersas e nuvens”.

Devido às diferentes propriedades bio-físico-químicas, todos os alvos da superfície terrestre (rochas, corpos d’água, vegetação, etc.) absorvem uma porção específica do espectro eletromagnético, permitindo uma assinatura identificável de radiação eletromagnética. Assim, conhecendo qual comprimento de onda é absorvido por um determinado alvo e também qual a intensidade de sua reflectância, torna-se possível analisar uma imagem de Sensoriamento Remoto e obterem-se interpretações acuradas de uma determinada cena orbital (SUITS, 1983; STAR & ESTES, 1990). Esse comportamento espectral dos alvos é chamado de “assinatura espectral”, ou seja, um valor específico de reflectância dentro do espectro eletromagnético (Figura 2), permitindo ao Sensoriamento Remoto distinguir os diversos materiais ou alvos entre si.

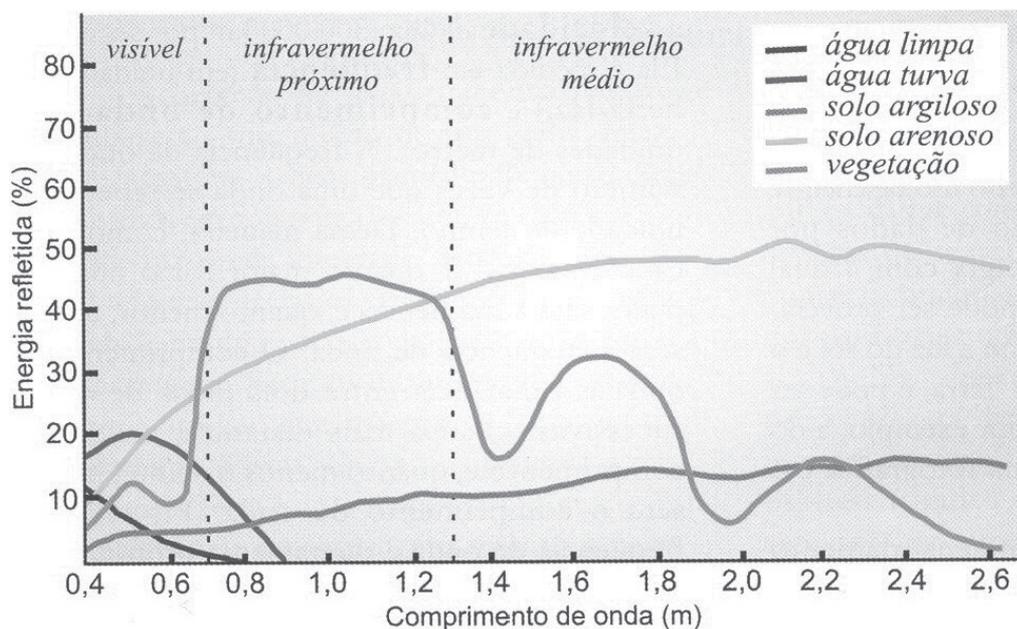


Figura 2 – Curvas espectrais de diferentes alvos.

Fonte: FLORENZANO (2002).

Segundo NOVO (1989), os sensores podem ser classificados em passivos ou ativos. Os sensores passivos detectam a radiação solar refletida ou a radiação emitida pelos objetos da superfície terrestre, dependendo, portanto, “de uma fonte de radiação externa para que possam

operar”, como, por exemplo, os sistemas fotográficos. Por outro lado, os sensores ativos produzem sua própria radiação, como os radares, por exemplo.

Outra classificação diz respeito ao tipo de produto gerado pelos sensores orbitais, dividindo-se em:

- a) Não-imageadores: não fornecem uma imagem da superfície sensoriada; como exemplo, os radiômetros (com saída em dígitos ou gráficos) e os espectro-radiômetros (utilizados para assinatura espectral dos alvos);
- b) Imageadores: fornecem informações sobre a variação espacial da resposta espectral da superfície observada (cena), sendo possível gerar imagens desta superfície. Subdividem-se em:
  - (1) sistema de quadros (*frame*): adquirem a imagem da cena em sua totalidade num mesmo instante, como, por exemplo, as imagens RBV (*Return Beam Vidicon*), coletadas à bordo dos satélites LandSAT 1, 2 e 3, já desativados;
  - (2) sistema de varredura:
    - mecânica: utiliza um sistema óptico grande-angular, onde a cena é captada através de um arranjo linear de detectores ou elemento de resolução (*pixel*), à medida que a plataforma se locomove ao longo da órbita, sendo em seguida convertido para um sinal digital passível de transmissão; são exemplos os sensores MSS (LandSAT 1, 2 e 3) e TM (LandSAT 4, 5 e 7).
    - eletrônica: tem o mesmo princípio de funcionamento do anterior, porém utilizando um sistema eletro-óptico-eletrônico, onde os dados são originados digitalmente; são exemplos os sensores HRV (SPOT 4 e 5);

Muitos são os sistemas orbitais em atividade atualmente. Nas aplicações civis, destacam-se os sistemas de observação da Terra, com multibandas e multi-sensores, tais como o LandSAT 5 TM e 7 ETM+, o SPOT 4 e 5, o Ikonos 2, o QuickBird, o Aster e o CBERS-2.

De uma maneira em geral, esses sistemas apresentam as seguintes premissas:

- Órbita:
  - Circular, para garantir imagens de diferentes regiões da Terra com mesma escala e resolução;
  - Sol-síncrona: síncrona com o Sol (heliossíncrono), garantindo condições constantes de iluminação da superfície terrestre; (altitude de 200 a 1.000 km);
  - Polar: direção circular norte – sul que permite observar toda a superfície da Terra; inclinação de 90°; altitude de 200 a 1.000 km;
  - Geoestacionária: inclinação de 0°, constituindo-se de uma única órbita acima do Equador, mantendo, dessa forma, a mesma posição em relação a um ponto fixo na superfície e obtendo sempre imagens da mesma face da Terra; altitude de 35.000 km;
- Imageamento cíclico da superfície, garantindo observações periódicas e repetitivas dos mesmos lugares;
- Horário de passagem do satélite atendendo às solicitações de diferentes áreas de aplicação.

Desenvolvida pela NASA, a série de sistemas LandSAT (Quadro 1) atualmente está na versão 7<sup>2</sup>, operando com o sistema sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), onde, além de contar com as bandas disponíveis no LandSAT 5 TM (avançado sistema sensor de varredura multiespectral, operando em 7 faixas espectrais), conta com uma banda pancromática de resolução espacial igual a 15m e um canal termal com resolução espacial de 60m. Um espelho de varredura capta a energia proveniente da cena, oscilando perpendicularmente à direção de deslocamento do satélite em sentido leste-oeste. Depois de corrigido, o sinal detectado pelo sistema LandSAT é amplificado e convertido em sinal digital, sendo transmitido via telemetria, no Brasil desde 1973, para a Estação de Recepção do INPE, em Cuiabá/MT.

Uma vez armazenadas, as imagens são enviadas à Divisão de Geração de Imagens – DGI - no Centro Espacial de Cachoeira Paulista/SP e ficam disponíveis para o público em geral, através de diversos produtos (cópias em papel em diferentes escalas e formatos, fitas digitais e CD-ROM) e níveis de correção (Quadro 2).

---

<sup>2</sup> Por problemas técnicos, o satélite LandSAT 7 ETM+ parou de funcionar em maio/2003.

Quadro 1 – Características principais dos sistemas sensores LandSAT 5 e 7.

Padrão	Característica
Órbita	Circular – 98,2° – heliossíncrona
Período	99 min
Altitude	705 km
Cruzamento	09:45 h
Ciclo	16 dias
Órbita adjacente	172 km
Velocidade	7,7 km/s
Tempo de obtenção de uma cena	24 s

Fonte: INPE (2001).

Um mapa base, na escala de 1:10.000.000, foi elaborado pelo INPE/DSG-5a.DL, localizando as cenas disponíveis para o Brasil e parte da América do Sul e identificando-as por órbitas (*path*) e pontos (*row*). Cada cena cobre uma área de 185 km x 185 km, com bandas espectrais cuja resolução espacial varia entre 15 e 120m e aplicações específicas (Quadro 3).

Quadro 2 – Níveis de Correção disponibilizados pelo INPE para imagens LandSAT.

Nível	Correção
Nível 0R	Dados brutos com as bandas espectrais alinhadas espacialmente
Nível 1G	Imagem com correção radiométrica sem associação com sistema de projeção
Nível 1G	Imagem com correções radiométrica e geométrica associada a um sistema de projeção

Fonte: INPE (2003).

Nesta pesquisa, serão utilizadas imagens dos sistemas LandSAT 5 e 7, pelas facilidades de aquisição junto ao INPE, através do Laboratório de Geoprocessamento do Instituto Xingó, além da extensa e consolidada bibliografia científica disponível sobre Sensoriamento Remoto aplicado ao monitoramento ambiental para estes sensores.

### 3.1.2 PDI e Extração de Informações em imagens de satélite

A função primordial do PDI é “facilitar a identificação e a extração de informações contidas nas imagens” (CRÓSTA, 1993), removendo barreiras inerentes ao sistema visual humano e objetivando uma posterior interpretação pelo usuário. Para isso são utilizados sistemas computacionais dedicados, onde as imagens brutas são processadas, analisadas e manipuladas, resultando em outras imagens com as informações específicas desejadas, após diversas técnicas de realce e modificação de sua estrutura espectral.

Quadro 3 – Características e aplicações das bandas espectrais do LandSAT 5.

<b>Banda</b>	<b>Intervalo espectral (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Principais características e aplicações das bandas TM do satélite LANDSAT-5</b>
<b>1</b>	(0,45 - 0,52)	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
<b>2</b>	(0,52 - 0,60)	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
<b>3</b>	(0,52 - 0,60)	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.

4	(0,76 - 0,90)	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com <i>pinus</i> e <i>eucalipto</i> . Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	(1,55 - 1,75)	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	(10,4 - 12,5)	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	(2,08 - 2,35)	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

Fonte: INPE (2003).

Embora o ser humano seja capaz de reconhecer padrões distintos, o grande volume de dados oriundos das imagens orbitais impossibilita um processamento sem o auxílio da tecnologia digital, que alcançou enorme evolução nas últimas décadas, diminuindo custos ao mesmo tempo em que aumentou a capacidade de armazenamento e processamento dos dados.

As imagens orbitais são diferentes de outras imagens digitais em sua estrutura e resolução. Segundo CRÓSTA (1993), estas imagens têm natureza discreta e são constituídas “por um arranjo de elementos sob a forma de uma malha ou *grid*”, onde cada célula, chamada de *pixel* (de *picture element*, em inglês) tem sua localização definida por um sistema de coordenadas  $x, y$  (linha e coluna), representando sempre uma área com as mesmas dimensões na superfície terrestre. Associado ao pixel existe um atributo  $z$ , indicando seu nível de cinza, conhecido por DN (do inglês, *digital number*), que varia do branco ao preto. Assim, uma imagem pode ser vista como uma matriz composta por milhares de linhas e colunas, onde cada elemento possui um nível de cinza específico, de acordo com a assinatura espectral do alvo imageado.

Qualquer imagem, como uma fotografia em papel, por exemplo, pode ser transformada em imagem digital, utilizando um equipamento *scanner*. No processo, também é gerada uma matriz com seus elementos em tamanhos pré-definidos e seus níveis de cinza proporcionais à tonalidade da imagem original, podendo ser manipulada por sistemas computacionais de processamento de imagem.

O termo “resolução” em PDI diz respeito à medida da habilidade que um determinado sensor possui de distinguir entre respostas que são semelhantes espectralmente ou próximas espacialmente (INPE, 2001). Divide-se em:

- a) Resolução espacial: medida em metros, é “definida pela capacidade do sistema sensor em ‘enxergar’ objetos na superfície terrestre”, sendo que quanto menor o objeto possível de ser observado, maior será sua resolução espacial (CRÓSTA, 1993); a maneira mais comum de ser determinada é pelo campo instantâneo de visada (IFOV) que define a área do terreno imageada a uma dada altitude num dado instante (*pixel*), um conceito teórico baseado nas propriedades geométricas do sistema sensor;
- b) Resolução espectral: definida pelo número de bandas espectrais de acordo com sua largura do intervalo de comprimento de onda no EEM; quanto menor a largura do intervalo, maior será a resolução espectral do sensor;

- c) Resolução radiométrica: definida pelo número de níveis digitais que representam os níveis de cinza de um *pixel*; “quanto maior o número de níveis, maior é a resolução radiométrica” (CRÓSTA, 1993).

Em sistemas sensores, também é utilizada uma outra resolução, a temporal, determinada pela frequência com que o sensor volta a imagear a mesma cena (medida em dias ou horas).

### 3.1.3 Detecção de áreas degradadas

As atividades antrópicas no semi-árido se desenvolvem, essencialmente, através de manejos não sustentáveis, ocasionando diversas modificações nos alvos naturais sobre a superfície terrestre. Diversas pesquisas têm demonstrado o potencial do PDI na detecção de áreas degradadas, a partir do estudo do comportamento espectral destes alvos, “delimitando os fenômenos que caracterizam a geodinâmica de uma região do semi-árido, através de texturas, matizes e relações horizontais entre os elementos das imagens orbitais” (MALDONADO, 2001).

Uma técnica de interferometria que combina imagens de radar e ópticas, por exemplo, aumenta o sinergismo da extração de informações. Em estudos geomorfológicos, noutro exemplo, a análise das curvas de nível em planícies aluviais sobrepostas a combinações multiespectrais evidencia as áreas de erosão ou de acumulação de material do solo. CARVALHO (2001), ao fazer uma abordagem multiescala para o monitoramento do processo de desertificação no semi-árido brasileiro, diz que a escolha metodológica de investigação do problema, associada à escolha dos indicadores, varia em função das escalas temporais e espaciais.

Assim, “as informações obtidas por sistemas sensores nos diferentes níveis de observação são complementares e integradas, parte de uma mesma realidade”. Modificações no albedo, índices de vegetação e de brilho, mudanças na forma de uso e manejo da terra, observação das condições biológicas, físicas e químicas da água, além de variações nas paisagens naturais e radiação solar, dentre outros, são exemplos de aplicações em PDI voltadas ao estudo de áreas degradadas em estado de desertificação.

Uma combinação das bandas espectrais 5, 4 e 3 do sensor Landsat 5 TM, permitiu a COSTA *et alli* (2001) uma interpretação das áreas de redução de biomassa na caatinga, baseada nas diferentes respostas espectrais dos alvos sensorizados perceptíveis nas imagens. Ao cruzar com mapas de solos e pesquisas de campo, os autores identificaram o estado de conservação dos recursos naturais do município de Caridade/CE, destacando as áreas degradadas “por uso não conservacionista destes solos, associados a suas próprias limitações, como a alta suscetibilidade à erosão, além do excesso de sódio, o qual limita o desenvolvimento de determinadas espécies”.

Portanto, as ações do homem sobre a paisagem e sobre os recursos naturais podem ser monitoradas a partir das técnicas disponíveis no PDI, identificando os diversos graus de degradação do meio ambiente e permitindo uma quantificação das diversas áreas atingidas pelo problema. No Capítulo 4, serão abordadas detalhadamente as técnicas de PDI utilizadas nesta pesquisa que objetivam a extração de informações necessárias à composição dos processos desertificatórios na área em estudo.

### **3.2 O Comportamento Espectral dos alvos naturais da Caatinga**

O conhecimento sobre o comportamento espectral dos alvos sobre a superfície terrestre é fundamental para a extração de informações a partir de dados de Sensoriamento Remoto, assim como os fatores que interferem neste comportamento (NOVO, 1989). Uma combinação de bandas espectrais que melhor discrimine um determinado alvo, por exemplo, requer conhecer o comportamento espectral deste alvo de interesse ou, então, corre-se o risco de desprezar faixas espectrais de grande importância para sua identificação.

Dentre os principais fatores que interferem nas medidas do comportamento espectral dos alvos, destacam-se:

- a) Método de aquisição: laboratório, campo ou plataforma elevada (helicóptero, avião ou satélite), utilizando-se um espectrorradiômetro para a coleta dos dados (assinatura espectral);

- b) Geometria de aquisição dos dados: são parâmetros (Quadro 4) que interferem na geometria de iluminação da cena;
- c) Parâmetros atmosféricos: umidade atmosférica, presença de aerossóis, turbulência, dentre outros;
- d) Parâmetros relativos ao alvo: objetos adjacentes ao alvo de interesse podem interferir nas medidas de reflectância deste, pois uma energia diferente espalhada pela vizinhança do alvo pode mascarar sua resposta.

Assim, vegetação, solos, rochas e minerais, água e superfícies construídas são alguns dos principais componentes da superfície terrestre objeto de estudo em Sensoriamento Remoto. Como dito, o conhecimento do comportamento espectral dos alvos de interesse e as interferências observadas no processo são essenciais para uma correta utilização dos dados sensorizados, objetivando fornecer extensas e precisas informações para todas as áreas das geociências, particularmente para o monitoramento ambiental.

Neste contexto, segundo MALDONADO (2001), uma das ferramentas mais importantes para o monitoramento das mudanças de cobertura e uso do solo é oriunda das imagens satelitais, sendo que “no caso de regiões semi-áridas, as condições climática, edáfica e de degradação da paisagem têm importante influência na resposta espectro-textual da cobertura e uso do solo, quando observados em dados sensorizados”. Uma das técnicas mais apuradas refere-se à Análise por Componentes Principais, pois permite avaliar o grau de modificação provocada pela ação do homem na paisagem de domínio da Caatinga.

Quadro 4 – Efeito das variáveis da geometria de aquisição de dados de Sensoriamento Remoto sobre as medidas de reflectância.

Variável	Efeito sobre as medidas de reflectância
Ângulo solar Zenital ( $\phi z$ )	Aumento do $\phi z$ – Diminuição da irradiância solar na superfície do alvo – diminuição da porcentagem de energia refletida pela superfície. Aumento do $\phi z$ – Aumento de porcentagem de incidência de radiação difusa sobre a superfície do alvo – aumento da componente de radiação difusa sobre o alvo.
Ângulo de visada ( $\phi v$ )	Aumento de $\phi v$ – Aumento do componente de radiação da atmosfera na energia refletida pela superfície – Redução do contraste entre os alvos – Aumento da influência da anisotropia <sup>3</sup> da reflectância sobre as medidas radiométricas.
Ângulo Azimutal do Sol e do sensor	Altera a distribuição de energia na superfície do alvo no caso de culturas plantadas em linhas, no caso de lineamentos geológicos.
Ângulo Azimutal relativo	A variação de $\Psi$ altera a porcentagem de energia registrada pelo sensor em cada comprimento de onda. Quando $\Psi = 0^\circ$ – maior porcentagem de energia refletida em todos os comprimentos de onda, se $z = 20^\circ$ ; $\theta v = 5^\circ$ .
Altitude do sensor	Aumento de H – aumento da interferência da radiação da atmosfera na medida de reflectância do alvo.

Fonte: NOVO (1989).

O mapeamento de coberturas vegetais com base em suas características fisionômicas, ecológicas e florísticas ganhou impulso considerável com o advento do sensoriamento remoto, segundo PONZONI (2001). O autor afirma que “experimentos têm sido conduzidos em todo o mundo, buscando caracterizar o comportamento espectral das partes das plantas (...) com o objetivo de atender às necessidades específicas” de pesquisa e aplicações comerciais, propiciando o mapeamento de extensas áreas da superfície terrestre, o monitoramento, a fiscalização e o controle da exploração dos recursos naturais.

<sup>3</sup> Qualidade de um objeto que apresenta propriedades físicas diferentes em todas as direções; opõe-se a isotropia (AURÉLIO, 1988).

Estudos recentes demonstram que a alteração do equilíbrio hídrico das plantas pode ser observada principalmente na região do infravermelho próximo, sendo que, no caso do sensor LandSAT 5 TM, esta característica situa-se na banda espectral 5. Observando a aparência da vegetação em imagens orbitais, verifica-se que “um dossel vegetal tem valores de reflectância relativamente baixos na região do visível, devido à ação dos pigmentos fotossintetizantes que absorvem a radiação eletromagnética para a realização da fotossíntese”. Porém, “na região do infravermelho próximo, esses valores apresentam-se elevados, por causa do espalhamento interno sofrido pela radiação eletromagnética em função da disposição da estrutura morfológica da folha, aliado, ainda, ao espalhamento múltiplo entre as diferentes camadas de folhas”. Isto tem fundamental importância da análise e processamento dos índices de vegetação da caatinga para os estudos de desertificação no semi-árido nordestino, ao eleger de forma sistemática as bandas espectrais mais adequadas à extração de informações sobre a cobertura vegetal na área em estudo, compreendendo sua morfogênese.

Também estudando o semi-árido brasileiro, KAZMIERCZAK (1996) afirma que “dentro do domínio de aplicações de dados de sensoriamento remoto, verifica-se uma grande falta de informações sobre a Formação da Caatinga: a extensão e o pouco conhecimento existente bastariam para determinar esta região como um dos mais promissores campos de aplicação das tecnologias de sensoriamento remoto, para prover informações sobre os seus recursos”. Parte do problema verificado no estudo da desertificação no passado tem sido a tendência de tratar de modo independente os diferentes aspectos a ela relacionados e que estão intrinsecamente relacionados e que levam à degradação ambiental, tanto em áreas já ocupadas, como em áreas naturais.

O autor demonstra em artigo uma metodologia para detecção de índices normalizados de vegetação da Caatinga, como um fator determinante na detecção de áreas desertificadas, a partir de séries temporais do satélite norte-americano AVHRR/NOAA e do cruzamento com dados pluviométricos de estações no semi-árido brasileiro, analisando os dados e verificando padrões de comportamento espectral dos alvos. Utilizando o NDVI, KAZMIERCZAK (1996) observou que “quanto maior o índice de

vegetação, mais densa é a fitomassa verde”, pois à medida que aumenta a vegetação, aumenta também a reflexão na banda do infra-vermelho próximo, ao passo que diminui a reflexão na banda do vermelho, fazendo com que a razão entre elas seja potencializada, realçando a vegetação.

Utilizando séries temporais, também foi constatada a componente sazonal na produção de fitomassa, em função das estações climáticas, revelando um decréscimo dos valores de NDVI à medida que avança o déficit hídrico no período das secas. Uma conclusão importante deste estudo é que “as condições secas tendem a ser mais favoráveis a discriminação de pequenas diferenças entre os diversos tipos de caatinga”, pois a época chuvosa uniformiza as respostas espectrais das diferentes tipologias existentes na região semi-árida.

Por outro lado, COSTA *et alli* (2001) também observam que a dinâmica do uso da terra na Caatinga, ao utilizar de modo não sustentável os recursos madeireiros, vem provocando perda da diversidade florística e contínua degradação do solo, estando intimamente relacionados a presença de processos desertificatórios na região de Seridó, no Rio Grande do Norte. Os autores, então, propõem um método para o mapeamento da fitomassa da Caatinga, baseando-se no índice de Área de Planta e no NDVI, obtidos com dados do sensor LandSAT 7 ETM+, o mesmo a ser utilizado no âmbito desta pesquisa. Técnicas de processamento digital de bandas espectrais nas regiões do infravermelho próximo (sensores TM3 e TM4) permitem uma melhor resposta espectral para a identificação da cobertura vegetal na área imageada.

CARVALHO (2001), ao fazer uma abordagem multiescala para o monitoramento de indicadores do processo de desertificação, observou que, no nível de percepção regional, as medidas devem ser feitas em escalas temporais da ordem de grandeza de décadas a anos, onde “a ação do homem e dos animais se faz sentir de forma bastante expressiva na paisagem natural”.

Ao pesquisar os processos desertificatórios em Alagoas, ASSIS (2002) utilizou-se de imagens LandSAT 5 TM para detectar a ocorrência de desmatamentos e seus estados de maior ou menor degradação ambiental, chegando a conclusão que cerca de 93% da classe caatinga estava degradada no trópico semi-árido estadual, apresentando áreas de

ocorrência muito grave de desertificação, com “características de terras arrasadas”.

## 4. A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL EM XINGÓ: UMA VISÃO SINÓTICA NUMA PERSPECTIVA ESPECTRO-TEMPORAL

### 4.1 Generalidades

Conforme analisado nos capítulos anteriores, a degradação ambiental crescente no semi-árido brasileiro, o frágil equilíbrio do ecossistema da caatinga, o regime inconstante das chuvas, os solos delgados e pobres em nutrientes orgânicos, aliado às precárias condições sócio-econômicas das populações que habitam essa região, formam um conjunto de fatores que favorecem a ocorrência dos processos de desertificação. Também foi visto que as novas tecnologias de sensoriamento remoto para o monitoramento ambiental de grandes áreas, associadas ao desenvolvimento de sistemas de geoinformação que permitem análises espaço-temporais precisas e acuradas sobre um determinado fenômeno, natural ou antropogênico, indicam um novo caminho para a pesquisa científica sobre o complexo, vital e contemporâneo tema da **desertificação**.

De fato, esta pesquisa parte para uma proposição de um novo paradigma em termos da multidisciplinaridade, ou melhor, da transdisciplinaridade da desertificação, pois entender, identificar, localizar e dimensionar os processos de desertificação exige uma abordagem dinâmica e temporal, fazendo uso da mais avançada tecnologia disponível no momento. Isto se reflete na necessidade de um estudo amplo e detalhado sobre os dados e métodos disponíveis que permitam análises rápidas e precisas sobre o fenômeno aqui identificado, tão importante quanto atual para a sociedade brasileira.

Basicamente, esta pesquisa adotou um conjunto de dados que permitisse o desenvolvimento de uma nova metodologia para a pesquisa sobre a desertificação no semi-árido nordestino, ao processar, extrair

e cruzar dados espectrais captados pelos sensores remotos a bordo de satélites de observação da Terra, com dados de setores censitários rurais oriundos dos censos demográficos, em séries temporais correlatas, abrangendo o período de 1989 a 2003, para a área de estudo escolhida: os seis municípios mais próximos ao lago da Usina Hidrelétrica de Xingó, no Baixo São Francisco.

Assim, espera-se contribuir com as diversas linhas de pesquisa sobre o tema, sempre dinâmico e evolutivo sobre todos os aspectos, sem querer com isso encerrar a discussão sobre os métodos de análise desta área do conhecimento específico, mas, antes, trazer uma nova visão, uma abordagem espaço-temporal com o uso das tecnologias da geoinformação disponíveis para que se possa vislumbrar um futuro melhor e mais promissor para o sertanejo de hoje e o de amanhã.

A seguir serão descritos e analisados detalhadamente os dados, materiais, metodologia e resultados obtidos, além da validação em campo desta pesquisa.

## **4.2 Materiais**

### **4.2.1 Dados**

Inicialmente, uma vez identificada, caracterizada e localizada espacialmente a área de estudo, foi solicitado ao CPTEC/INPE os dados referentes às médias mensais pluviométricas da área de estudo, no período de 1978 a 2003, considerando que as imagens digitais dos sistemas Landsat 5 TM e Landsat 7 ETM+ só estão disponíveis no INPE a partir de 1982. Para datas anteriores, há disponibilidade de imagens apenas em papel fotográfico. Esta possibilidade foi descartada devido às precárias condições de recuperação dos dados espectrais quando em papel.

Os dados pluviométricos são imprescindíveis para uma escolha correta das imagens de satélite a serem posteriormente solicitadas, pois a resposta espectral da vegetação de caatinga tem grande variabilidade com a presença de água, devido às suas características fisiológicas de adaptação às secas. O gráfico evidencia o regime inconstante das chuvas que, aliado aos outros fatores descritos no Capítulo 2, aumenta a suscep-

tibilidade à erosão e o conseqüente empobrecimento dos solos no semi-árido, potencializando as causas da desertificação.

Assim, a escolha da cena teria que levar em consideração, além da pouca cobertura de nuvens para uma melhor identificação dos alvos de interesse (<10% para toda a cena), um conhecimento prévio das condições hídricas da área de estudo para a data de aquisição das imagens, visando uma correta interpretação posterior. O sistema LandsAT tem uma grade regular de imageamento da superfície terrestre, definida por cenas que são identificadas por órbita e ponto<sup>4</sup> a partir das coordenadas geográficas da área de estudo.

Assim, uma vez conhecidas as coordenadas geográficas da área de estudo a partir das cartas analógicas do Ministério do Exército/DSG, foi identificada a órbita 215 e o ponto 067 para toda a área de estudo em Xingó.

Após pesquisa junto ao banco de imagens LandsAT do INPE<sup>5</sup>, verificou-se a disponibilidade de datas para a cena/órbita 215/067, com cobertura de nuvens <10% para toda a cena.

Escolheram-se, então, as seguintes datas:

- 11/03/89 – por ser a mais antiga disponível e, embora o mês de aquisição registre um volume hídrico considerável (141,172mm), observa-se que a aquisição foi feita na primeira quinzena do mês, refletindo, ainda, as condições hídricas do mês anterior, que fora de 19,111mm – uma taxa abaixo da média observada no período 1978 – 2003 que foi de 72,033mm;
- 06/10/95 – uma data intercalada entre a mais antiga e a mais recente (2003) e, também, por estar mais próxima do início do mês, reflete consideravelmente as condições hídricas do mês anterior (19,856mm); e,
- 05/01/03 – data mais recente, com baixa precipitação inclusive no mês anterior (5,400mm).

<sup>4</sup> *Do inglês, path / row.*

<sup>5</sup> *Consulta via e-mail ao sistema ATUS (Atendimento ao Usuário do INPE), disponível na Internet no site <http://www.inpe.br>, acesso em 01/07/03.*

Todas as datas escolhidas refletem períodos de carência hídrica, onde a vegetação está mais vulnerável à degradação. Outro fator decisivo para a escolha destas datas específicas se refere à quase ausência de cobertura de nuvens nas imagens – condição essencial para um melhor resultado na identificação dos alvos de interesse da pesquisa. Isto permitiu o estabelecimento de parâmetros climáticos muito similares para as respostas espectrais dos diversos alvos nas cenas escolhidas para o estudo.

Foram selecionadas as bandas espectrais que registram o espectro da energia refletida, indo da região do visível ao infravermelho próximo, pois os alvos de interesse da pesquisa têm grande resposta espectral nesta faixa. Assim, foram processadas as bandas de 1 a 5, além da banda 7, para ambos os sensores TM e ETM+.

Todas as imagens foram fornecidas pelo INPE em CD-ROM com nível de correção 1G (Capítulo 3, Quadro 2).

Uma vez que as cartas do Mapeamento Sistemático do Brasil, na escala de 1:100.000, não contém os limites municipais, o IBGE – Divisão de Geociências de Salvador/BA – forneceu os arquivos digitais dos seis municípios escolhidos da área de estudo, mediante solicitação por escrito ao órgão público. Estes limites são imprescindíveis para o recorte geográfico nas imagens de satélite originais, pois estas imagens cobrem uma área aproximada de 185km x 185km, bem maior que a área de estudo.

#### 4.2.2 Equipamentos

Foi utilizado um microcomputador tipo notebook, com memória RAM de 512 Mb, clock de 500 Mhz, drive CD-RW, HD 20 Gb. Também se utilizou um receptor GPS, tipo navegação, com 12 canais e uma câmara fotográfica digital para o registro da validação da pesquisa em campo.

#### 4.2.3 Programas Computacionais

O sistema operacional utilizado em todas as fases da pesquisa foi o *MS-Windows 2000 Professional*, com *Service Pack 5.0*, fabricado pela empresa norte-americana Microsoft Corp. Também foi utilizado o banco

de dados *MS-Acess*, Versão 2000, e a planilha eletrônica *MS-Excel*, ambos os programas do mesmo fabricante.

Para o processamento das imagens de satélite foi utilizado o programa computacional *Spring* (Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas), Versão 6.3. Desenvolvido pelo INPE (2003), o *Spring* “é um banco de dados geográficos de 2a. geração”, com distribuição gratuita pela Internet. Ainda segundo o INPE (2003), suas principais características, indispensáveis para os objetivos desta pesquisa, são:

- “Opera como um banco de dados geográfico sem fronteiras e suporta grande volume de dados (sem limitações de escala, projeção e fuso), mantendo a identidade dos objetos geográficos ao longo de todo banco”;
- Administra tanto dados vetoriais como dados matriciais (“raster”), e realiza a integração de dados de Sensoriamento Remoto num SIG;
- Provê um ambiente de trabalho amigável e poderoso, através da combinação de menus e janelas com uma linguagem espacial facilmente programável pelo usuário (LEGAL - Linguagem Espaço-Geográfica baseada em Álgebra);
- Consegue escalonabilidade completa, isto é, ser capaz de operar com toda sua funcionalidade em ambientes que variem desde micro-computadores a estações de trabalho RISC de alto desempenho.”

Para a digitalização das cartas na escala de 1:100.000, criação e edição de toponímias e conversão de formatos vetoriais foram utilizados os programas computacionais *AutoCAD Map*, Versão 2000i, e *CAD Overlay*, Versão 2000i, ambos fabricados pela empresa norte-americana Autodesk, Inc.

O *AutoCAD* tem grande flexibilidade em desenho e edição de entidades vetoriais, além de poder exportar seus dados em formato DXF (*Data Exchange Binary*) Versão R12, que podem ser importados para o ambiente do *Spring* sem perda de dados. A versão utilizada incorpora comandos de mapeamento, limpeza de desenho e extração de atributos. O

*CAD Overlay* permite processar as imagens escanerizadas de uma forma mais eficiente e produtiva, operando em conjunto com o *AutoCAD Map*.

### 4.3 Metodologia

#### 4.3.1 Tratamento dos Dados

Inicialmente, utilizou-se o Módulo IMPIMA, do Spring, para a conversão dos arquivos digitais das imagens de satélite do formato original GEOTIFF para o formato de operação do Spring (GRIB), para posterior registro e processamento.

As cartas do Mapeamento Sistemático do Brasil, na escala de 1:100.000 foram rasterizadas, isto é, convertidas para um formato de imagem digital, utilizando-se um equipamento óptico-eletrônico (“scanner” de grande formato), para posterior georreferenciamento e digitalização no programa *AutoCAD Map*. Os arquivos foram gerados em formato TIFF, em tons de cinza, com resolução óptica de 300 pontos por polegada.

A malha de setores censitários rurais do IBGE foi convertida para o formato nativo do AutoCAD, o DWG, e, depois sua geometria, originalmente em projeção geográfica, foi transformada para uma projeção UTM, Fuso 24, conforme os parâmetros oficiais do SGB.

Os dados descritivos do Censo Demográfico de 2000, originalmente disponíveis em planilhas eletrônicas, foram convertidos para um banco de dados no formato *MS-Acess*, Versão 2000.

#### 4.3.2 Processamento dos Dados

A Figura 3 ilustra um fluxograma geral utilizado para a metodologia de processamento dos dados, processos e sucessivos resultados obtidos.

Após a seleção das imagens LandsAT e conversão dos arquivos digitais para o formato GRIB, o primeiro passo foi definir um esquema conceitual no *Spring*, estabelecendo-se, adequadamente, um **Banco**, um **Projeto**, as **Categorias** e os **Planos de Informações** adequadamente.

Um **Banco** no *Spring* define um ambiente para armazenar dados geográficos, sem estar vinculado a uma área específica (semelhante a um

sistema de arquivos convencional – um depósito de dados). O usuário pode definir vários bancos, mas somente um pode estar ativo em uma sessão de trabalho. O banco de dados armazena todas as definições de categorias de dados, que armazenarão aos diversos tipos de mapas, e que por sua vez são constituídas das entidades básicas geo-objetos<sup>6</sup> e geo-campos<sup>7</sup>. Um banco pode conter um ou mais projetos, o que permite organizar os dados por área geográfica. Fisicamente este banco corresponde a um diretório (pasta) no sistema de arquivos do computador. Por exemplo, um banco chamado “Xingo”, poderia estar arquivado num disco rígido de um microcomputador em: *C:\Mestrado\Xingo*.

Um **Projeto** dentro de um banco permite especificar exatamente o espaço geográfico da área de trabalho, e é onde serão inseridos os diversos mapas (Planos de Informações) desta área (*semelhante a uma gaveta de sistema de arquivos convencional – cada gaveta contém dados de uma determinada área*). Cada Projeto possui ainda propriedades cartográficas (*projeção, datum, etc*) pré-definidas pelo usuário, que são herdadas pelas informações contidas neste projeto. Somente um Projeto pode estar ativo em uma sessão de trabalho. Fisicamente um projeto corresponde a um sub-diretório (pasta) no sistema de arquivos do computador, debaixo do diretório de um banco. Por exemplo, um projeto chamado “Desertificação”, do banco “Xingo”, poderia estar em *C:\Mestrado\Xingo\Desertificação*.

As **Categorias** de um Banco de Dados estão disponíveis para qualquer Projeto dentro deste banco. Um banco pode conter várias categorias. Estas categorias permitem organizar os dados em tipos (modelos) diferentes, semelhante às fichas de uma gaveta de sistema de arquivos convencional, organizadas por letras – cada letra representa um tipo de dado de uma determinada área. Os tipos de categorias disponíveis são: Temático, Imagem, Numérico, Cadastral, Redes e Objetos, podendo-se

---

<sup>6</sup> “Representam elementos únicos que possuem atributos descritivos e estão associados a múltiplas localizações geográficas”, por exemplo, mapas cadastrais e de redes (INPE, 2001).

<sup>7</sup> “Representam a distribuição espacial de uma variável que possui valores em todos os pontos pertencentes a uma região geográfica”, por exemplo, imagens e mapas temáticos (INPE, 2001).

definir uma ou mais do mesmo modelo, mas com nomes distintos para diferenciar a aplicação. Por exemplo, uma categoria para Solos e outra para Vegetação, sendo ambas do modelo Temático.

A categoria do modelo Temático pode ser especializada em Classes Temáticas, por exemplo, as classes de um mapa de Solos, sendo associado a cada classe um visual gráfico diferente. Os dados deste modelo podem ser representados na forma matricial ou vetorial.

A categoria Imagem permite armazenar qualquer imagem obtida por sensores remotos (fotos aéreas ou orbitais) ou ainda imagens de modelos numéricos. Somente a representação matricial é possível neste modelo.

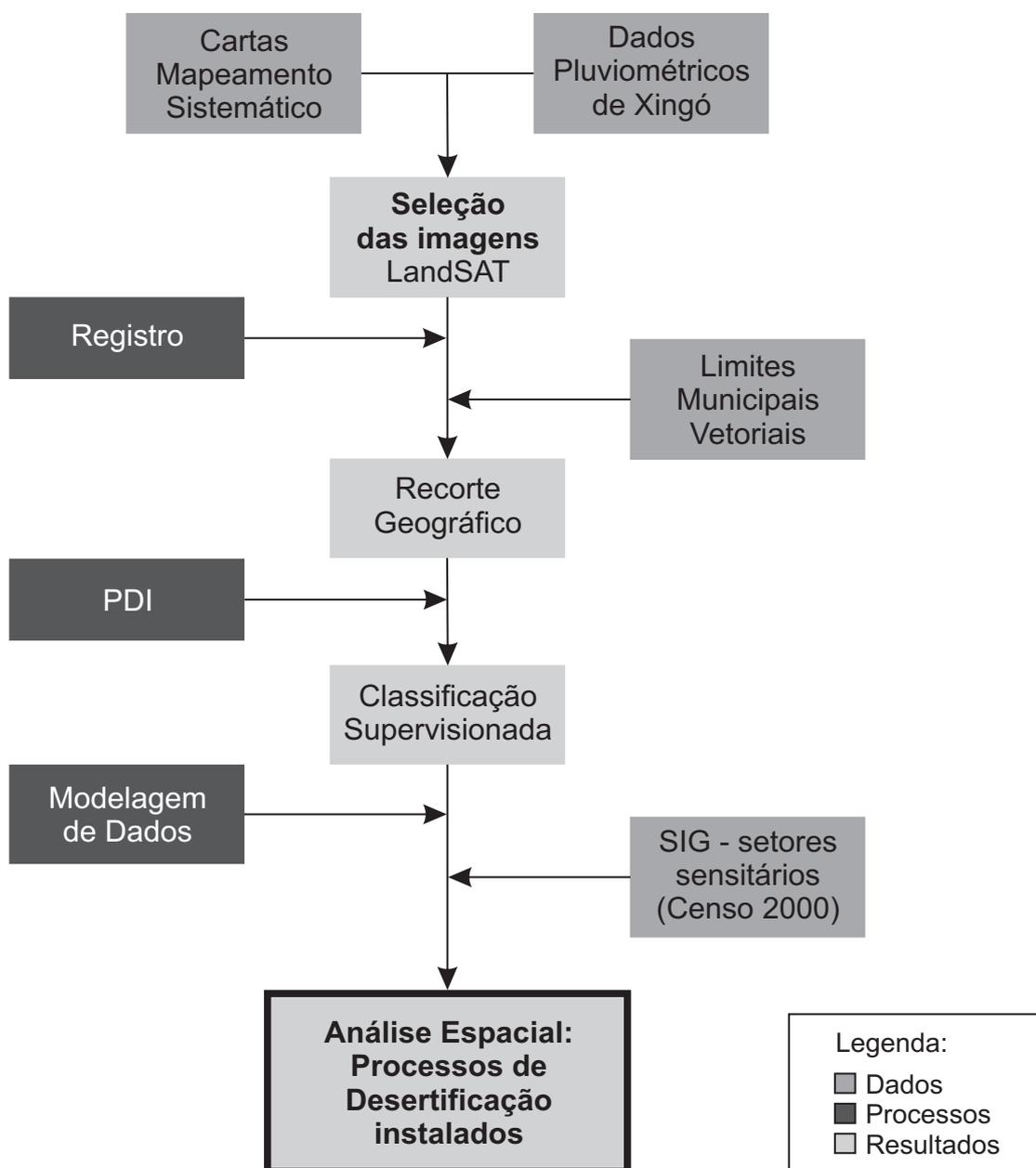


Figura 3 – Fluxograma geral da metodologia utilizada na pesquisa.

A categoria Numérico é utilizada para armazenamento de modelos numéricos de terreno (dados de altimetria, geo-física, geo-química etc.), que podem ser representados na forma matricial ou vetorial.

As categorias Cadastral e Redes permitem especializar objetos. Os objetos de uma categoria do tipo Objeto são únicos e têm atributos em tabelas específicas, podendo estar representados em diversas escalas, em

diferentes categorias cadastrais ou de redes. A forma de representação dos objetos é vetorial. A categoria Cadastral é utilizada para representar objetos na forma de *pontos*, *linhas* ou *polígonos*, por exemplo, um mapa cadastral de lotes urbanos. Já a categoria Redes trabalha somente com objetos na forma de *nós* e *linhas*, por exemplo, um mapa de redes de eletrificação.

Um **Plano de Informação** (PI) deve pertencer a uma única Categoria do banco, entretanto podem existir vários Planos de Informações de uma mesma Categoria em um banco. Por exemplo, dois PI's de datas diferentes de uso da Terra, porém da mesma Categoria temática.

Somente um PI pode estar ativo para executar qualquer operação sobre o mesmo. Fisicamente um PI corresponde a um arquivo no sistema de arquivos do computador, debaixo do sub-diretório do projeto e diretório de um banco. Por exemplo, um PI de "Limites\_Municipais" (V000017.lin – nome do arquivo fornecido pelo sistema) do projeto chamado "Desertificacao", do banco "Xingo", poderia estar em *C:\Mestrado\Xingo\Desertificacao\V000017.lin*.

Desta maneira, foi estabelecido o seguinte modelo conceitual para o *Spring*:

- Banco: Xingo
- Projeto: Desertificacao<sup>8</sup>
  - Projeção: UTM/SAD-69
- Categorias:
  - Analises (temática)
  - Base\_Matricial (imagem)
  - Base\_Vetorial (cadastral)
  - Classificacoes (temático)
- Planos de Informação (PI's):
  - Desertificacao
  - (diversas imagens durante o PDI)
  - Limites\_Municipais
  - ClassSup\_1989

---

<sup>8</sup> Optou-se pelo topônimo sem cedilha e acento para evitar conflitos futuros em outros sistemas operacionais.

- ClassSup\_1995
- ClassSup\_2003

Ao iniciar o processamento das imagens orbitais no programa computacional *Spring*, utilizaram-se Transformações Polinomiais e foi realizado o registro ou georreferenciamento das imagens originais, isto é, estabeleceu-se uma relação entre coordenadas da imagem e coordenadas geográficas, cujos pontos de controle foram obtidos a partir de coordenadas retiradas das cartas analógicas do Ministério do Exército, na escala de 1:100.000, observando pontos notáveis nas imagens e procurando definir uma distribuição mais uniforme e concentrada na área de estudo.

No total, foram inseridos 17 pontos, sendo considerados os 10 melhores em termos de erro sistemático. Neste processo, o sistema permite, simultaneamente ao registro, uma Correção Geométrica visando a eliminação de erros geométricos sistemáticos (rotação da Terra – “skew”, distorções panorâmicas – compressão, curvatura da Terra – compressão, arrastamento da imagem durante uma varredura, variações de altitude, atitude e velocidade do satélite). Utilizou-se o interpolador Vizinho + Próximo, pois este permite um processamento mais rápido e não cria novos valores de NC (CRÓSTA, 1993).

O RMSE nos PC's, obtidos a partir de cartas do MSB, na escala 1:100.000, foi de 1,281pixel que, ao multiplicá-lo pela resolução espacial da imagem multi-espectral Landsat ETM+ (30m), obteve-se um RMSE de 38,43m. Este erro é admissível considerando o PEC, que aceita 0,5mm de erro na escala de trabalho (1:100.000).

Assim, uma vez georreferenciadas todas as cenas, suas respectivas bandas espectrais foram importadas para os devidos PI's, dentro do *Spring*.

O passo seguinte foi a importação vetorial do limite da área de estudo. Antes, no *AutoCAD Map*, foi realizada uma limpeza de desenho (em inglês, “drawing clean-up”) nos arquivos cedidos pelo IBGE/DIGEO-Salvador, objetivando-se a eliminação de erros de desenho e o fechamento de polígonos; depois, foi criada uma topologia de polígonos, utilizando-se os polígonos definidores dos limites municipais; na seqüência, uma operação de dissolução de topologia criou, finalmente, um único polígono definidor

da área de estudo, juntando os seis municípios em estudo, recortando as cenas originais. Assim, ao discretizar os dados da área de estudo, obteve-se uma diminuição considerável do espaço em disco ocupado pelos arquivos de imagens e, conseqüentemente, do tempo de processamento para todas as fases da pesquisa.

Uma vez que as imagens estavam georreferenciadas e recortadas, iniciaram-se as técnicas de PDI, visando a melhoria da qualidade visual das imagens e a extração de informações específicas de interesse da pesquisa. Foram testadas diversas técnicas com o intuito de avaliar a aplicabilidade na identificação das áreas degradadas e passíveis de desertificação. As técnicas que apresentaram melhores resultados foram selecionadas para compor uma análise espacial realizada numa linguagem de programação de álgebra espacial que, junto com os dados censitários, pudesse caracterizar cientificamente e localizar espacialmente a ocorrência dos processos de desertificação em Xingó.

Diversas combinações de bandas espectrais foram testadas, sendo que as que apresentaram melhores resultados (CRÓSTA, 1993; JENSEN, 1999; KAZMIERCZAK, 1996; MALDONADO, 2001) foram:

- RGB 321 – Cor Natural: traz informações da faixa do visível, ideal para a identificação de áreas urbanas e contraste entre tipos de vegetação;
- RGB 543 – Falsa Cor: traz informações do infra-vermelho próximo (banda 5), ideal para identificação de estresse hídrico da vegetação, uso e cobertura do solo.

O primeiro conjunto de técnicas utilizado refere-se ao Realce de Contraste. Segundo CRÓSTA (1993), o objetivo destas técnicas é melhorar a qualidade visual das imagens para uma posterior interpretação e enfatizar alguma característica de interesse para uma aplicação específica. No caso, os alvos de interesse são, basicamente, vegetação nativa, pasto/cultura agrícola, solo exposto, corpos d'água e área urbana.

As técnicas de realce testadas foram:

- Manipulação de Histograma
  - Linear
  - Equalização

- Filtragem Linear
  - Realce de Imagem TM
  - Filtro de Passa-Alta

A manipulação **Linear** de histograma é definida por uma função de transferência linear, onde  $y = f(x)$ . Assim, quanto maior é a inclinação da reta no histograma de freqüências, maior será o realce da imagem (CRÓSTA, 1993; MOREIRA, 2003). A forma do histograma da imagem realçada é a mesma da imagem original, pois cada barra do histograma continua tendo a mesma altura, porém em uma posição diferente.

A **Equalização** de histogramas tem por objetivo modificar o histograma da imagem original de tal forma que a imagem transformada tenha um histograma uniforme. Assim, todos os níveis de cinza (NC) devem aparecer com a mesma freqüência. O problema nesta técnica é que os NC's são alterados, podendo surgir falsos contornos devido à redução da variância espectral.

A filtragem linear com **Realce de Imagem TM** tem por objetivo compensar distorções radiométricas próprias do sensor TM (BANON & BARREIRA, 1994). Uma matriz de realce linear é aplicada na imagem original, resultando numa melhoria visual dos alvos de interesse.

De uma maneira em geral, os filtros têm por objetivo tornar mais nítida a transição entre regiões diferentes (bordas) na imagem (BANON & BARREIRA, 1994). Assim, testando esta técnica, utilizou-se um **Filtro de Passa-Alta** com uma matriz não-direcional de borda. Entretanto, os resultados obtidos não trouxeram grande contribuição na identificação dos alvos, exceto na detecção das margens do rio São Francisco (transição água – solo), pois nesta região o rio está inserido num cânion geológico.

Das técnicas de realce de imagem testadas, conclui-se que, para esta pesquisa, o realce linear de histograma apresentou os melhores resultados na melhoria da qualidade visual das imagens e na distinção entre os alvos naturais e antrópicos, além de não modificar os valores espectrais originais.

A seguir foram testadas e avaliadas as técnicas de PDI referentes às Transformações Multiespectrais, objetivando-se uma avaliação espectro-temporal de imagens co-registradas<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> De uma mesma localização geográfica, porém de épocas distintas.

As técnicas avaliadas foram:

- Razão entre bandas
- Componentes Principais
- Transformação RGB → IHS

Foram testadas três técnicas de **razão entre bandas**: a primeira objetivou a detecção de corpos d'água, a segunda, a presença de vegetação, e a terceira, a mudança de cobertura vegetal entre os anos de 1989 e 2003. Como a água limpa e profunda tem grande absorção nas bandas TM 2 e TM 5, a razão aritmética entre estas bandas diminui os NC's deste alvo, evidenciando sua presença na imagem resultante (Figura 4).

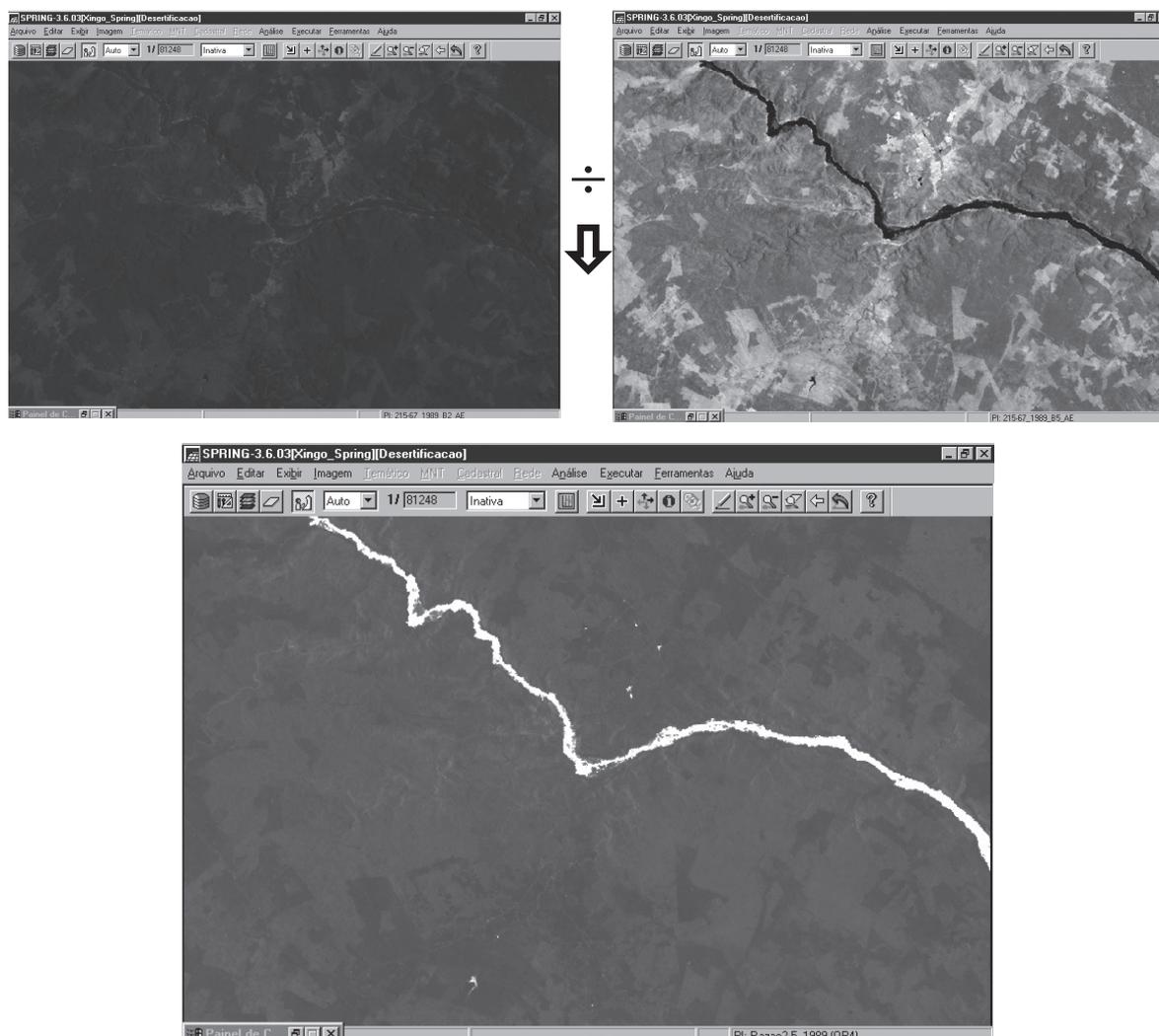


Figura 4 – Razão entre as bandas TM 2 e TM 5 para detecção de corpos d'água: excelentes resultados com a perfeita identificação do leito do rio São Francisco e outros pequenos corpos d'água (em branco); ao alto à esquerda, a banda TM 2 original; ao alto à direita, a banda TM 5 original; na figura maior, a imagem resultante (Data: 11/03/89).

Uma das mais importantes técnicas de transformações multiespectrais para detecção de mudança de vegetação é o NDVI. Trata-se de uma razão entre bandas espectrais de alta correlação entre si, uma operação aritmética que realça os alvos de interesse, no caso, a vegetação (KASMIERCZAK, 1996; OLIVEIRA *et alli*, 2003). Com a aplicação desta técnica, tem-se um aumento de contraste entre solo e vegetação, além dos efeitos de iluminação, declividade da superfície e geometria de visada do sensor serem parcialmente compensados.

Segundo KASMIERCZAK (1996) e COSTA *et alli* (2001), a equação do NDVI é:

$$NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3),$$

Na equação acima, TM representa uma determinada banda espectral do sistema Landsat. Para a banda TM 3 (região do vermelho), a vegetação verde, densa e uniforme fica escura. Por outro lado, para a banda TM 4, os corpos d'água ficam escuros e a vegetação verde, densa e uniforme fica clara. Disto resulta uma nova banda espectral, representando a razão entre as bandas originais, onde as áreas claras indicam a presença de vegetação e as áreas escuras, sua ausência numa mesma data.

As bandas NDVI de 1989 e 2003 foram, então, utilizadas com o objetivo de detectar mudanças de padrão da cobertura do solo no período. A técnica tem as seguintes etapas (CRÓSTA, 1993; MOREIRA, 2003):

- Obtenção das estatísticas da imagem, tomando-se a banda NDVI 1989 como referência, para modificar a banda NDVI 2003;
- Cálculo de ganho e offset para igualar média dos NC's e variância das respectivas bandas:
  - NDVI 1989 – Média = 141,1358
  - NDVI 2003 – Média: antes = 191,7848; depois = 141,4315  
(½)
- Ganho = (V1989/V2003)
- Offset = M1989 – ganho x M2003
- Igualar média e variância: NDVI-2003\_igual = ganho x NDVI\_CL\_1989+offset
- Razão entre as bandas 1989/2003
- Realce de Contraste

Ao realizar a razão entre as bandas NDVI de 1989 e 2003, antes igualando a média e a variância, resulta numa nova banda espectral que identifica as áreas onde houve perda de vegetação no período observado. Para melhorar a qualidade da imagem resultante, foi feita uma composição em pseudo-color com fatiamento em arco-íris.

A segunda técnica de Transformações Multiespectrais em PDI avaliada foi a de **CP**. Segundo FONSECA (2000), esta técnica está baseada

nas propriedades estatísticas da imagem, ao contrário das anteriores que estão fundamentadas nas características físicas da cena e na experiência do usuário. A questão é que as bandas espectrais de uma imagem são, geralmente, altamente correlacionadas. Isto se deve, principalmente, ao sombreamento resultante da topografia do terreno, sobreposição espectral ou baixa reflectância de um determinado alvo numa faixa espectral, ou do próprio comportamento espectral do alvo.

Assim, o problema que se coloca é que bandas espectrais altamente correlacionadas reduzem a capacidade de extração de informações sobre a cena orbital. Portanto, o objetivo desta técnica é gerar, a partir das bandas originais de uma imagem multiespectral, novas bandas descorrelacionadas, isto é, sem redundâncias entre si. Trata-se, portanto, de uma técnica de realce que reduz ou remove esta redundância espectral.

O número de componentes principais é igual ao número de bandas espectrais utilizadas e são ordenadas de acordo com o decréscimo da variância de nível de cinza. “A primeira CP tem a maior variância (maior contraste) e a última, a menor variância. A segunda e as subseqüentes CP, apresentam gradativamente menos contraste entre os alvos e são desprovidas de informação topográfica, devido à ausência de sombreamento. A terceira e quarta componentes principais contêm tipicamente menos estrutura da imagem e mais ruído que as duas primeiras, indicando a compressão dos dados nos primeiros canais. A última componente representa basicamente o ruído existente nos dados originais” (FONSECA, 2000).

A técnica consiste em:

- Transformação da rotação dos eixos de atributos originais (canais 1 e 2) em eixos chamados de Componentes Principais, através de operações matemáticas lineares;
- Análise da Matriz de Covariância entre todas as bandas, calculando os autovalores, isto é, o comprimento dos eixos das componentes principais de uma imagem que são medidos em unidade de variância, definindo a contribuição de cada banda original para uma determinada CP, numa combinação aditiva e linear;
  - A 1a. CP é semelhante a uma vista pancromática da cena
- Realce por Decorrelação: visa o realce da distribuição das cores, através da eliminação da correlação entre as bandas; só pode ser

aplicado sobre um triplete de bandas, ao contrário da CP “tradicional” que é normalmente aplicada sobre todas as bandas.

A terceira e última técnica de Transformações Multiespectrais avaliada foi a **Transformação RGB → IHS**. O objetivo desta técnica é mapear o sistema de cores RGB para o sistema IHS, controlando melhor a formação de cores de acordo com a percepção do SVH.

De fato, segundo CRÓSTA (1993), quando descreve as propriedades de cor de um objeto em uma imagem, normalmente o olho humano não distingue a proporção de azul, verde e vermelho presentes, como no sistema computacional associado ao monitor de vídeo, e sim, avalia a intensidade (I), a cor ou matiz (H) e a saturação (S), onde:

- A **intensidade** ou brilho significa a medida de energia total envolvida em todos os comprimentos de onda, sendo, assim, responsável pela sensação de brilho dessa energia incidente sobre o olho;
- O **matiz** ou cor de um objeto traz a medida do comprimento de onda médio da luz que se reflete ou se emite, definindo, portanto, a cor do objeto;
- A **saturação** ou pureza expressa o intervalo de comprimento de onda ao redor do comprimento de onda médio, no qual a energia é refletida ou transmitida. Um alto valor de saturação resulta em uma cor espectralmente pura, ao passo que um baixo valor indica uma mistura de comprimentos de onda que irá produzir tons pastéis (apagados).

A técnica consiste em calcular a intensidade, o matiz e a saturação de três bandas espectrais, depois processar a componente I, aplicando um realce de contraste e, finalmente, fazer a reversão para o sistema RGB para que possa, então, ser visualizado por um monitor de vídeo de microcomputador.

Das três técnicas de Transformações Multiespectrais avaliadas nesta pesquisa, a que apresentou resultados práticos mais significativos do ponto de vista de melhoria da extração de informações espectro-temporais foi a de NDVI, principalmente quando aplicada a técnica de razão entre bandas para detecção de mudança no padrão e cobertura vegetal

no período observado. Assim, pela importância desta informação como indicador de processo de desertificação (MATALLO, 1999; ACCIOLY *et alli*, 2001; ARAÚJO *et alli*, 2002; SAMPAIO & SAMPAIO, 2002), optou-se por considerar, efetivamente, os resultados desta técnica de PDI como um dos elementos de suporte à identificação e localização de áreas degradadas na região em estudo, onde, associado a outros resultados a serem discutidos adiante, poderá validar em gabinete o conjunto de dados que, numa linguagem de programação de álgebra espacial, permitirá mapear os processos de desertificação instalados em Xingó.

Para, então, compor este conjunto de dados a ser utilizado na análise espacial dos processos de desertificação em Xingó, utilizou-se a técnica de **Classificação Supervisionada** que, segundo CRÓSTA (1993), trata-se do processo de extração de informações em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos. Assim, os métodos de classificação são usados para mapear áreas da superfície terrestre que apresentam um mesmo significado em imagens digitais.

Como já abordado no Capítulo 3, cada imagem é formada por um conjunto de *pixel*, com suas coordenadas x,y e um atributo espectral L “que representa a radiância de um alvo no intervalo de comprimento de onda de uma banda espectral”. Portanto, pode-se afirmar que cada *pixel* de uma banda possui uma correspondência espacial com um outro *pixel*, em todas as outras bandas, ou seja, para uma imagem de K bandas, existem K níveis de cinza associados à cada *pixel*, sendo um para cada banda espectral (INPE, 2001). A este conjunto de características espectrais de um *pixel* denomina-se de “atributos espectrais”.

Nesta pesquisa, utilizou-se o método de classificação “*pixel-a-pixel*” que identifica regiões homogêneas a partir da informação espectral isolada de cada *pixel*, fazendo, ainda, uso da teoria de probabilidade por métodos estatísticos. Assim, o resultado da classificação digital é apresentado por classes espectrais (áreas que possuem características espectrais semelhantes), considerando-se a relação entre a resposta espectral dos alvos de interesse na pesquisa e as classes a serem mapeadas. De fato, tem-se como resultado final de um processo de classificação uma única imagem digital composta por um mapa de *pixels* classificados, representados, neste caso, por cores.

No processo de classificação, um grande número de NC's é transformado num pequeno número de classes temáticas. Como existem regiões na imagem em que se tem conhecimento da realidade de campo, através de pesquisas realizadas desde março de 2000 no Laboratório de Geoprocessamento INPE/Xingó, a Classificação Supervisionada pode ser empregada, tendo-se o cuidado de identificar nas imagens diversas áreas de treinamento representativas e homogêneas de cada classe de interesse na pesquisa, porém observando a inclusão de toda a variabilidade espectral dos alvos em estudo.

Foram definidas seis classes temáticas a serem mapeadas pelo método:

- Área urbana
- Corpos d'Água
- Caatinga Arbórea
- Caatinga Arbustiva
- Pasto/cultivo
- Solo exposto

Para cada classe foram identificadas doze amostras em cada uma das três datas, fazendo um subtotal de setenta e duas amostras para cada data e um total de duzentas e dezesseis amostras. Cada conjunto de doze amostras produziu uma Matriz de Erro que foi analisada isoladamente, sendo refeita algumas vezes até atingir um desempenho geral  $\geq 95\%$  para cada data pesquisada. Isto garantiu a qualidade das amostras para a posterior classificação.

Embora as classificações tenham sido realizadas sobre as bandas espectrais originais, cada amostra foi avaliada visualmente sobre as diversas técnicas de PDI testadas anteriormente, objetivando-se a confirmação da homogeneidade e exatidão da amostra em relação à classe temática a qual pertencia. A matriz de erro de classificação apresenta a distribuição de porcentagem de *pixels* classificados correta e erroneamente; as colunas representam o total percentual por classe.

O classificador utilizado foi o de MAXVER, pois este considera a ponderação das distâncias entre as médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos, onde um conjunto de amostras de trei-

namento define o diagrama de dispersão das classes e suas distribuições de probabilidade, considerando a distribuição de probabilidade normal para cada classe do treinamento.

Ao considerar, por exemplo, duas classes com distribuição de probabilidade distinta de um *pixel* pertencer a uma classe ou a outra dependendo de sua posição em relação a esta distribuição, o *pixel* que se situar na região onde as duas classes se sobrepõem estão sujeitos à definição de limiares de aceitação do classificador – um critério de decisão do usuário. Os limites de classificação são definidos a partir de pontos de mesma probabilidade de classificação de uma e de outra classe. Assim, por exemplo, um *pixel* localizado numa região sombreada, apesar de pertencer à classe 2, será classificado como classe 1, pelo limite de aceitação estabelecido. Portanto, objetivando a diminuição da confusão entre as classes, ou seja, uma redução desta sobreposição entre as distribuições de probabilidades das classes, diversas aquisições de amostras significativas de alvos distintos foram adquiridas, bem como as avaliações das matrizes de classificação dessas amostras.

Esta avaliação concluiu que o conjunto de amostras foi bastante satisfatório, atingindo uma média de 96% de exatidão para a maioria das classes identificadas nas imagens. Como limiar de aceitação, adotou-se o valor de 100% para uma completa classificação de todos os *pixels* na imagem.

Assim, foram realizadas as classificações supervisionadas nas três datas de imagem da pesquisa: 1989, 1995 e 2003, obtendo-se o mapeamento temático temporal da área de estudo, conforme ilustram as Figuras 5, 6 e 7, respectivamente.

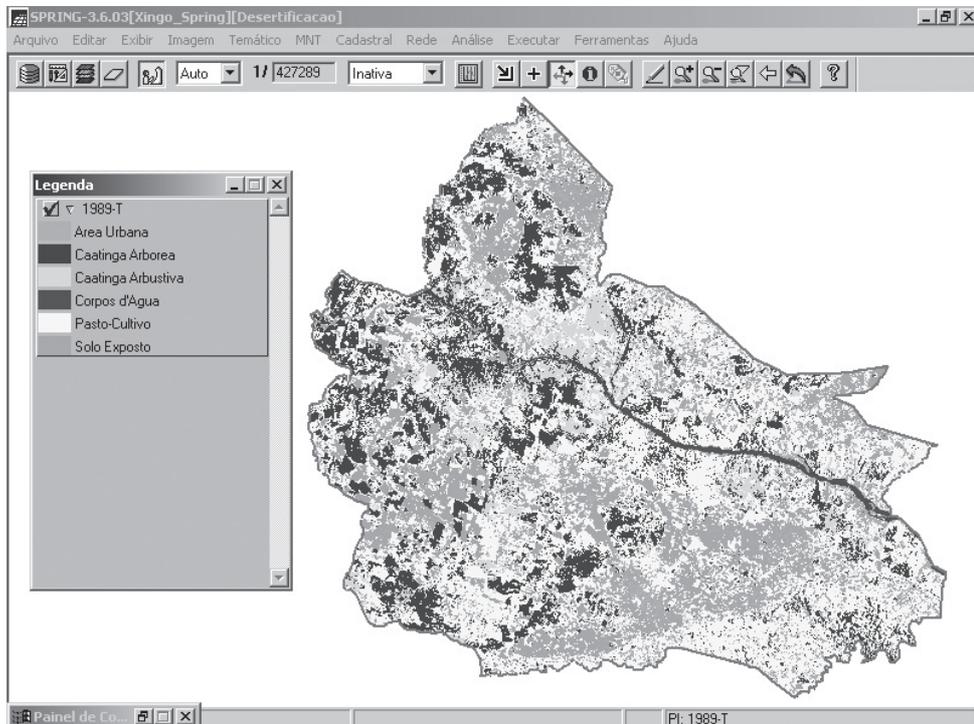


Figura 5 – Mapeamento temático obtido a partir de Classificação Supervisionada na imagem de 11/03/89, identificando as classes de interesse.

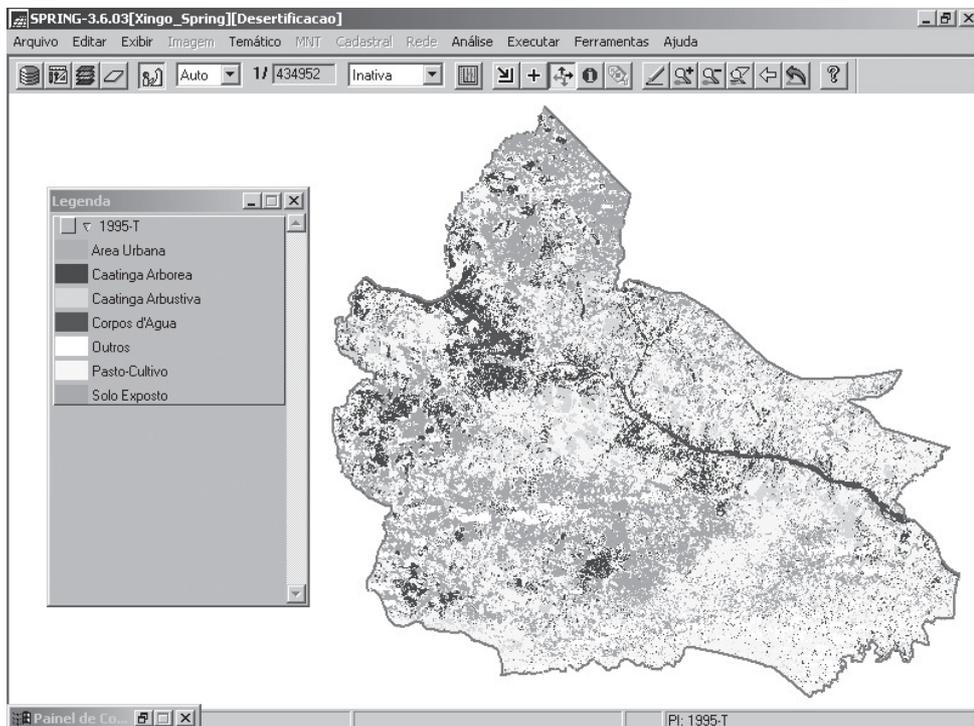


Figura 6 – Mapeamento temático obtido a partir de Classificação Supervisionada na imagem de 06/10/95, onde se observa uma discreta presença de nuvens na área.

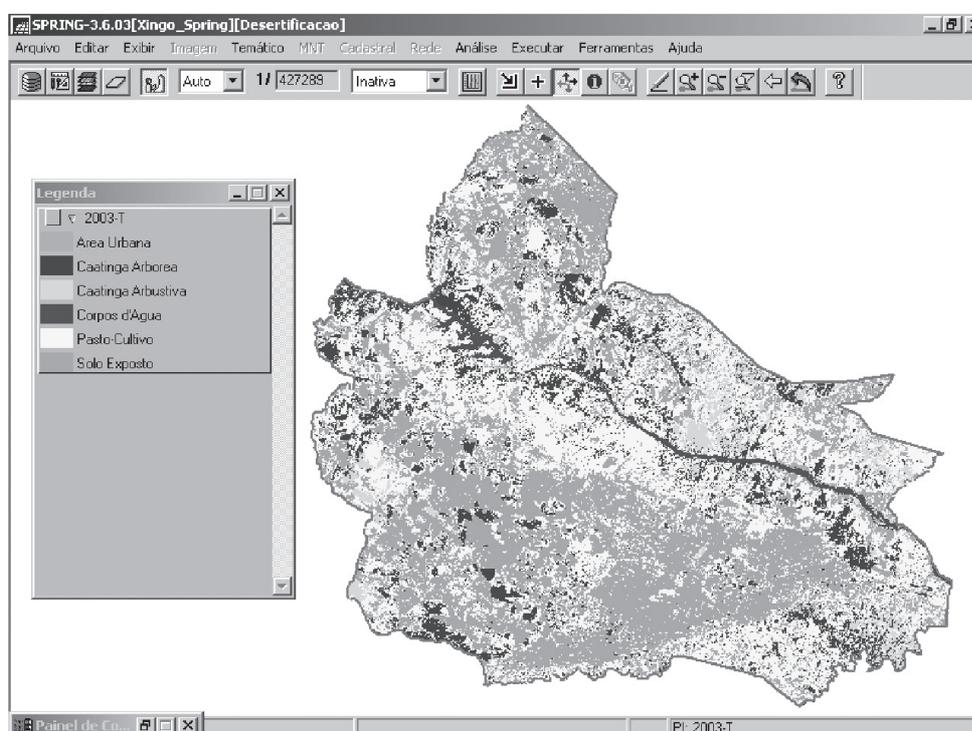


Figura 7 – Mapeamento temático obtido a partir de Classificação Supervisionada na imagem de 05/01/03.

As classes foram quantificadas em termos de área e processadas através de planilha eletrônica (Figura 8). Ao analisar os dados gráficos, destaca-se o avanço de solo exposto nas classes de caatinga – um notável indicador de desertificação na área de estudo.

Para compreender com maior precisão e acurácia a localização espacial dos processos de desertificação, foi elaborada uma Análise Espacial, a partir do desenvolvimento de um aplicativo em LEGAL, implementado no Spring.

A estrutura de uma programação em LEGAL exige as seguintes etapas:

- Declarações de variáveis (no caso, as imagens classificadas e a imagem-síntese a ser gerada);
- Instanciações<sup>10</sup> de variáveis (basicamente, quem são estas variáveis no sistema e seus parâmetros operacionais);

<sup>10</sup> Identificação dos dados no sistema em relação às variáveis antes declaradas.

- Operações de álgebra de mapas (quais são as operações espaciais a serem efetuadas com as variáveis anteriormente declaradas);
- Comandos de controle.

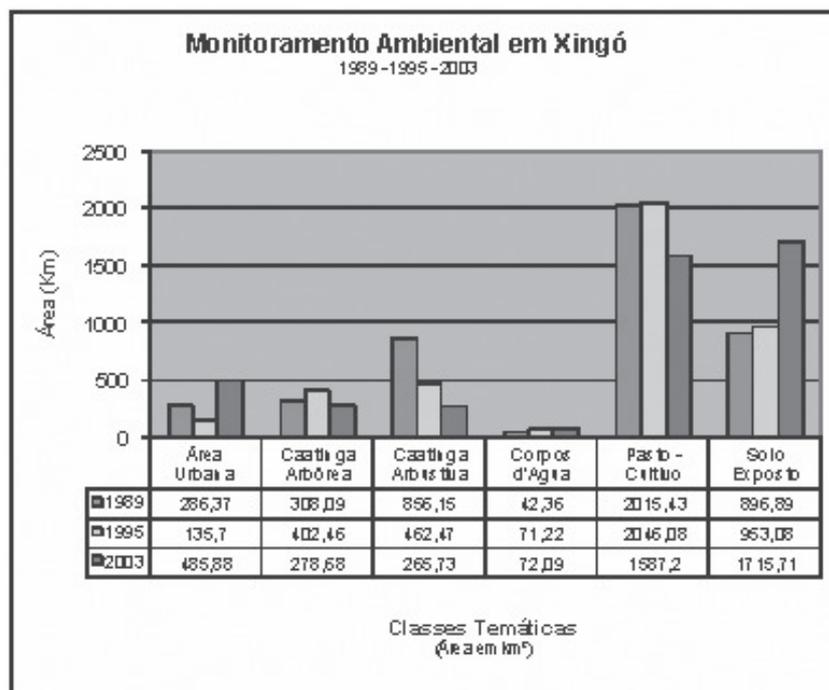


Figura 8 – Quantificação das classes temáticas em 1989, 1995 e 2003.

O fluxograma da programação desenvolvida em LEGAL foi baseado nos dados de entrada, o processamento em LEGAL e a saída gráfica da Análise Espacial.

Tem-se como objetivo avaliar o comportamento espacial dos alvos ao longo do período observado, especialmente com relação aos indicadores de desertificação, neste caso, a diminuição da cobertura vegetal de caatinga e o avanço de solo exposto. De fato, para efeito desta análise-síntese da grave situação ambiental em Xingó, considerou para a programação em LEGAL que:

- Áreas que sempre permaneceram como “Solo exposto” nas três datas são consideradas áreas “Em processo de desertificação” (na legenda, “Desertificada”), e aparecem na cor mais escura na imagem-síntese;

- São consideradas “Áreas degradadas” (na legenda, “Degradada”), aparecendo na cor cinza, idem:
  - Áreas que eram cobertas por vegetação de caatinga em 1989 e/ou 1995 e em 2003 tornou-se “Solo exposto”;
  - Áreas que em 1989 e/ou 1995 eram cobertas por “Caatinga arbórea” e em 2003 tornou-se “Caatinga Arbustiva”, pois isto indica perda de biomassa, certamente por atividades ilegais de extração de madeira;
  - Áreas que em 1989 e/ou 1995 eram urbanas, pasto ou cultivo e em 2003 transformaram-se em “Solo Exposto”;
- Houve algumas poucas recuperações de caatinga no período, sendo todas essas áreas enquadradas na respectiva classificação identificada em 2003;
- Algumas áreas permaneceram com as mesmas classes no período em estudo, sem alterações em seu padrão de cobertura.

#### 4.3.3 Mapeamento Temático

Para complementar a análise, foi desenvolvido um **SIG** a partir dos dados da malha de setores censitários rurais (IBGE, 2003), associados aos dados dos Censos de 1991 e 2001. Objetivou-se, assim, associar mais um importante indicador de desertificação ao processo de análise, neste caso, os dados demográficos, especificamente a Densidade Populacional por Setor censitário Rural (VASCONCELOS SOBRINHO, 1978; MATALLO, 1999; SAMPAIO & SAMPAIO, 2002).

Os dados descritivos dos censos foram modelados num banco de dados MS-Acess, onde cada setor censitário foi associado, como chave-primária espacial, ao seu respectivo polígono na base cartográfica digital importada do *AutoCAD Map*.

Esta base, além de uma geometria de polígonos fechados, continha um código específico para cada setor censitário, na forma de texto e inserido dentro do seu respectivo polígono. A este identificador chama-se de centróide topológico que, além de conter os vínculos aos respectivos registros no banco de dados, também contém os vínculos às tabelas topológicas do sistema *Spring*. Uma topologia de polígono foi criada no *Auto-*

*CAD Map* para a obtenção das áreas dos setores censitários rurais. Uma consulta (*query*) foi, então, realizada para obter-se uma tabela que relacionasse o código do setor censitário com sua respectiva área topológica, no formato \*.TXT. Depois, este arquivo digital foi importado no banco de dados MS-Access e uma nova consulta foi feita, cruzando-se os dados de SETOR, ÁREA, POPULAÇÃO e DENSIDADE POPULACIONAL.

Uma vez realizada a ligação dos centróides aos seus respectivos registros no banco de dados, realizou-se um mapeamento temático sobre População Total nestes setores, analisando o comportamento demográfico em relação ao Censo 2000. Utilizando-se dos conceitos de Estatística Espacial, objetivou-se caracterizar a densidade demográfica, procurando descrever a variação espacial da população na área de estudo.

Segundo CÂMARA (2000), “a distribuição de eventos cuja localização está associada a áreas (delimitadas por polígonos) não dispõe de sua localização exata, mas sim de um valor agregado por área”. Assim, o objetivo da análise será determinar a existência de um padrão espacial nos valores observados.

A primeira análise foi realizada agregando os dados por quantis, divididos em três classes, de tal forma que cada classe tenha aproximadamente o mesmo número de valores.

Entretanto, uma forma simples e útil de explorar a variação espacial dos dados é calcular a média dos valores dos vizinhos, produzindo uma primeira aproximação da variabilidade espacial, “pois a operação tende a produzir uma superfície menos descontínua que os dados originais” (FONSECA, 2000), sendo os setores censitários rurais influenciados pelo valor de seus vizinhos.

Assim, utilizou-se o método da IMOV, que é uma técnica que explora o valor médio  $\mu_i$  do atributo na região de estudo, fornecendo uma visão das grandes tendências do fenômeno em estudo, neste caso, uma forte densidade populacional em algumas regiões periféricas ao lago da UHE Xingó, caracterizando núcleos de pressão demográfica circundando a UHE Xingó.

Concluindo o processamento dos dados e objetivando inferir um indicador social no estudo sobre as áreas desertificadas em Xingó, conforme analisado no Capítulo 2, este mapa temático de densidade populacio-

nal por média móvel foi, então, cruzado com o mapa temático da imagem-síntese produzido sobre as classificações supervisionadas das imagens de 1989, 1995 e 2003. Para fazer esta Análise Espacial, que é a síntese deste estudo ao identificar **áreas de risco à desertificação** (Apêndice), um novo algoritmo em LEGAL foi desenvolvido para este cruzamento de dados, considerando-se que:

- Áreas onde na imagem-síntese das classificações estão identificadas como “Em processo de desertificação” (ou “Desertificadas”) e no mapa temático de População indica “Alto Crescimento” demográfico no período, ou áreas onde na imagem-síntese das classificações estão identificadas como “Em processo de desertificação” e no mapa temático de População indica “Médio Crescimento” demográfico no período, ou eram áreas “Degradadas” e com densidade populacional média, foram consideradas áreas de risco **“Muito Grave”** do ponto de vista da desertificação, e foram assinaladas na cor mais escura;
- Áreas onde na imagem-síntese das classificações estão identificadas como “Degradadas” e no mapa temático de População indica médio crescimento demográfico no período, foram consideradas áreas de risco **“Grave”** do ponto de vista da desertificação, e foram assinaladas na cor cinza escuro;
- Áreas onde na imagem-síntese das classificações estão identificadas como “Degradadas” e no mapa temático de População indica baixo crescimento demográfico no período, foram consideradas áreas **“Especiais”**, sujeitas à atenção e foram assinaladas na cor cinza claro;
- Outras áreas com situação estável ou em recuperação, foram assinaladas na cor branca.

#### 4.4 Resultados Obtidos

Muitos foram os resultados ao longo da experimentação laboratorial desta pesquisa. A quantidade de informações processadas atingiram um espaço em disco rígido de 9,3 Gb e estão agora disponíveis para a pesquisa científica sobre o tema.

Enfim, após o processamento dos dados, constatou-se, no período 1989 - 2003:

- Aumento de 91,3% de solo exposto;
- Diminuição de áreas agropastoris de 21,2%;
- Diminuição de caatinga arbórea de 9,7%;
- Diminuição de caatinga arbustiva de 68,7%;
- Aumento de áreas urbanas ou antropizadas de 70%.

Observa-se uma forte correlação entre os dados de solo exposto e áreas agropastoris no período estudado. Ao aumento de solo exposto, corresponde uma diminuição das áreas agrícolas ou de pastagem. Por outro lado, à diminuição da cobertura vegetal natural da caatinga, observa-se, também, o aumento das áreas de solo exposto na Região de Xingó. De fato, não há uma correlação entre o desmatamento e aumento das áreas agropastoris.

Das classes naturais, a caatinga arbustiva foi a que regrediu em termos de área. Isso se explica, principalmente, pelo seu porte lenhoso e conseqüente disponibilidade energética para as populações rurais, além da necessidade de novas áreas agrícolas em substituição àquelas já exauridas por técnicas de cultivo inadequadas ao semi-árido ou mesmo pela expansão das fronteiras de pastagens extensivas.

Entretanto, os resultados obtidos na classe de caatinga arbustiva indicam uma possível sobreposição com a classe de pasto-cultivo, devido às semelhantes respostas espectrais dos alvos observados, ou seja, em ambas as classes têm-se uma vegetação caracterizada por arbustos e estrato herbáceo, com porte médio de 2 m e diâmetro a altura do peito não ultrapassando a 10 cm. Algumas árvores jovens alcançam até 3 m de altura como *Cnidosculus quercifolius* Pohl. e *Aspidosperma pyriformium* associadas aos cactos *Pilosocereus gounellei* (Weber) Byles & Rowley, *P. piauhyensis* (Gürke) Byles & Rowley. Os arbustos predominantes da área são: *Caesalpinia pyramidalis*, *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill., *Melochia tomentosa*, *Sida galheirensis* e *Croton rhamnifolius*, entremeados com cactos das espécies *Opuntia palmadora* K. Schum. e *O. inamoema* Britton & Rose. Por outro lado, nas áreas de pastagens, observa-se uma vegetação herbácea e alguns arbustos intercalados que florescem no período chuvoso.

As ervas predominantes nos meses chuvosos (de maio a agosto/2002) foram *Centratherum punctatum*, *Heliotropium angiospermum* Murray, *Chamaecrista repens* (Vogel) Irwin & Barneby, *Evolvulus sp.*, *Crotalaria holosericea* Nees & Mart., *Sida ciliaris* L., *Richardia grandiflora* (Cham. & Schltdl.) e *Boerhavia coccinea* Mill. Alguns arbustos que floriram neste período foram *Indigofera suffruticosa*, *Stylosanthes viscosa*, *Melochia tomentosa* e *Sida galheirensis*. As espécies arbóreas encontradas no local foram indivíduos de *Tabebuia aurea*, *\*Spondias tuberosa*, *Prosopis juliflora* (SW.) DC. e *\*Zyziphus joazeiro* (FREIRE et alli, 2003).

Na área, pratica-se a pecuária extensiva de gado bovino, caprino e ovino. Também se pode constatar o corte contínuo e a queima das leiras (galho e folhas da vegetação ruderal), para o preparo do solo e plantio de feijão e milho, no período chuvoso. Então, conclui-se que para um melhor discernimento entre estas classes um novo sensor com maior resolução espectral precisaria ser avaliado, situação esta não foi considerada no âmbito deste estudo. A verdade terrestre foi avaliada a partir de seis expedições ao campo, onde 52 pontos pré-determinados em gabinete foram atingidos com o uso de receptor GPS, no processo de validação da pesquisa.

As áreas urbanas tiveram uma expressão territorial em 1989, devido principalmente às obras de construção da UHE Xingó. A diminuição verificada em 1995 deve-se à conclusão destas obras e depressão econômica diretamente relacionada. A recuperação das áreas urbanas torna-se evidente na classificação de 2003, com um aumento excepcional de 258% em relação ao ano de 1995. Entretanto, convém observar que a classe como um todo não representa mais que 11% da área total de estudo, evidenciando, mais uma vez, o caráter eminentemente rural desses municípios.

O Apêndice ilustra o Mapa-Síntese desta pesquisa, baseado em todo o embasamento teórico sobre os temas de Desertificação, Sensoriamento Remoto e SIG aplicados ao Monitoramento Ambiental utilizados nesta pesquisa, além da experimentação laboratorial. Este mapa sintetiza e registra as **áreas de risco à desertificação** na área de estudo.



## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Energia e pobreza: a dualidade intrínseca de Xingó – uma discussão

A UHE Xingó gera cerca de  $\frac{1}{3}$  da energia elétrica consumida na Região Nordeste do Brasil. Entretanto, ao gerar energia a partir deste notável recurso natural que é o rio São Francisco, alimentando o desenvolvimento dos longínquos centros urbanos das capitais, de fato, nada, ou quase nada, foi acrescentado em termos de melhoria nas condições de vida para as populações que habitam a região, ou mesmo para o meio ambiente. Ao contrário, fica evidente, neste estudo, um grave quadro de degradação ambiental na região, motivado pelas mais diversas causas, intimamente relacionadas.

Algo está errado neste modelo. Não faz sentido que a exploração deste poderoso capital natural não tenha revertido em nenhum benefício realmente significativo para estas populações, a não ser um crescente e avassalador quadro de degradação ambiental e, o que é pior, especialmente nas circunvizinhanças da represa.

Teoricamente, a partir da construção e funcionamento da UHE Xingó em 1996, estes municípios deveriam ser os maiores beneficiários desta mega construção – orgulho da engenharia nacional ao aproveitar o cânion natural do Rio São Francisco – e, com suas próprias rochas, represar as já escassas águas do São Francisco a um custo financeiro relativamente baixo para este tipo de empreendimento. Neste aspecto, cabe notar que a própria criação do lago já representou um grande impacto ambiental devido as áreas de vegetação e fauna inundadas. Mas foram as ações antrópicas, ao longo dos últimos 13 anos, que trouxeram para a região este quadro desolador aqui apresentado.

Portanto, o que se questiona é: quais são as vantagens significativas da geração de energia elétrica para a região? Os indicadores de

desenvolvimento humano continuam os mais baixos do país, os núcleos urbanos não registram um crescimento ordenado, mas sim a instalação de bolsões de pobreza e de exclusão social alimentados pela histórica estrutura latifundiária própria da região, combinado com o quadro generalizado de degradação ambiental e o conseqüente declínio da atividade econômica. Os repasses de *royalties* da CHESF restringem-se a Piranhas/AL com 20% e Canindé do São Francisco/SE com 80%, sob valores legais muito abaixo das reais necessidades destes municípios. Mesmo as ações localizadas e verticais do Instituto Xingó não trouxeram nenhum avanço significativo para estas populações, embora caiba registrar o espírito de luta, a seriedade com o trato social junto às comunidades carentes e o esforço coletivo de todos os que fazem o IX.

Este estudo documentou e comprovou cientificamente que o quadro é adverso sob os mais diversos aspectos: ambiental, social e econômico. De fato, os municípios em estudo precisam cada vez mais de repasses financeiros dos Estados e da União para suprir suas demandas sociais emergenciais, num ciclo vicioso de dependência econômica e política, onde as secas agravam a situação, mas não representam, por si só, a causa eloqüente do grave quadro ambiental aqui registrado.

De fato, tristemente se concluiu que a energia que gera riqueza para o Nordeste não traz desenvolvimento sustentável para as comunidades carentes mais próximas à UHE Xingó, mas sim um quadro geral de consumo devastador dos limitados recursos naturais da caatinga, em ritmo de destruição perigosamente exponencial. Certamente um limite de carga no ecossistema da região está muito próximo de ocorrer.

## **5.2 1989 – 2003: o recrudescimento dos indicadores ambientais nas áreas desertificadas**

Numa visão geral, o estudo concluiu que no período observado, 1989 a 2003, a Região de Xingó sofreu uma contínua, sistemática e devastadora degradação ambiental. De fato, sob todos os aspectos, o ecossistema Caatinga foi bastante atingido pelo desmatamento, especialmente onde apresentava espécies comercialmente mais rentáveis, ora para com-

por a matriz energética das populações sertanejas, ora para a construção civil ou para a conquista de novas áreas de pastagem extensiva.

Esta demanda antrópica pelos recursos naturais num meio ambiente de frágil equilíbrio entre seus múltiplos agentes e ao mesmo tempo de lenta recuperação, propiciou o surgimento de extensas áreas degradadas, diminuição de áreas agrícolas e de pastagens e o conseqüente recrudescimento de indicadores sociais, estes fartamente divulgados pela imprensa nacional. Neste contexto, as condições climáticas, geomorfológicas e sócio-culturais da região favoreceram o surgimento de processos desertificatórios significativos na região.

A **desertização** tem causas naturais, elaboradas ao longo de séculos pelas forças da natureza. Mas a **desertificação** tem causas eminentemente antrópicas, em ritmo crescente, como foi constatado neste estudo. Isto ficou muito evidente nestes 13 anos estudados – um período muito curto para os desígnios da natureza provocarem tamanho desastre ambiental.

Neste aspecto, a perda de biodiversidade, por exemplo, está registrada essencialmente pela diminuição da classe caatinga arbustiva. Em 11/03/89, esta classe ocupava uma área de 856,15 km<sup>2</sup>, sendo reduzida para 265,73 km<sup>2</sup> em 05/01/03, ou seja, uma diminuição de 69% no período, isto considerando que as condições pluviométricas mantiveram-se dentro dos padrões esperados para o clima semi-árido, alternando os períodos chuvosos com os secos. O porte lenhoso e seu potencial energético, a necessidade de novas áreas para as atividades agropastoris, ou às vezes em substituição àquelas já degradadas, e a retirada de plantas medicinais são as principais causas do desmatamento nesta classe.

Os dados também mostraram que em 11/03/89 a já preocupante extensão de solo exposto – portanto improdutivo do ponto de vista social, econômico e ambiental – representava 20% da área total de estudo. Em 05/01/03, a mesma classe já passava para 39%, piorando a situação. Esse preocupante aumento desta classe foi conquistado principalmente de áreas agrícolas ou de pastagem (44%), ou seja, áreas que em 11/03/89 eram economicamente produtivas e em 05/01/03 estão totalmente improdutivas. Cerca de 11% do solo exposto classificado na data de 2003

também foi conquistado da caatinga, mostrando a fragilidade deste ecossistema quando sumária e sistematicamente desmatado.

Considerando os 4.405,29 km<sup>2</sup> da área de estudo, a análise-síntese mostrou que cerca de 215 km<sup>2</sup> nos seis municípios mais próximos à UHE Xingó apresentam problemas muito graves com relação à desertificação em janeiro de 2003. No total, cerca de 985,44 km<sup>2</sup> têm problemas ambientais significativos relacionados à desertificação, ou seja, 22,37% da área de estudo estão relacionados com algum processo de desertificação, necessitando de atenção urgente por parte do Governo e da sociedade.

Convém registrar o aspecto conservador da análise ao considerar, por exemplo, que as áreas consideradas “Gravíssimas” teriam que necessariamente apresentar solo exposto nas imagens de 1989, 1995 e 2003, além de estarem situadas num limiar de alta densidade demográfica para a região. Portanto, não bastou a imagem mais recente (05/01/03) apresentar extensas áreas degradadas, pois se inferiu ao modelo de análise espacial outras variáveis ambientais e demográficas, permitindo à pesquisa científica sobre o tema vislumbrar novas oportunidades de incorporar outros dados que possam ter uma representatividade espacial.

Um aspecto importante a concluir diz respeito à comprovação em campo dos resultados obtidos a partir das técnicas de Processamento Digital de Imagens em Sensoriamento Remoto utilizadas ao longo do estudo. Embora não seja nenhuma novidade na literatura sobre o tema, não se registrou nenhum outro estudo que enfocasse especificamente a Região de Xingó no contexto dos processos desertificatórios, conciliando dados espectrais oriundos de imagens satelitais com dados demográficos ao nível do micro dado representado pelos setores censitários rurais. Pode-se, assim, afirmar que a pesquisa foi favorecida pela publicação desses dados em 2003 pelo IBGE.

Enfim, o estudo concluiu claramente que o modelo econômico em uso não é sustentável na Região de Xingó. Pelo contrário, exige-se de toda a sociedade uma mudança na forma de pensar e agir sobre o semi-árido nordestino e sua viabilidade agro-ecológica. Muitas experiências, algumas novas e outras nem tanto, têm demonstrado o potencial e a viabilidade geoambiental do semi-árido brasileiro, como vem mostrando diversas e recorrentes reportagens na imprensa.

Como dito anteriormente, só o binômio Ciência & Tecnologia tem as reais condições para viabilizar uma solução ambientalmente sustentável para estas comunidades carentes do sertão, sem comprometer as gerações futuras ou, como se está evidenciando neste estudo, até mesmo a atual geração.

Acredita-se que este estudo atingiu plenamente seus objetivos ao propor não apenas um método, mas sim uma metodologia transdisciplinar que integra dados georreferenciados numa aplicação prática de suporte a decisões estratégicas para o semi-árido brasileiro ao identificar e localizar o fenômeno da desertificação na Região de Xingó. Caberá à sociedade e, mais especificamente, à academia, continuar este trabalho.

Enfim, esta pesquisa destacou as seguintes conclusões:

- As ações antrópicas nos últimos 13 anos trouxeram um grave desequilíbrio ambiental na região
- Entre 1989 e 2003 houve um recrudescimento dos indicadores ambientais na área de estudo, com especial degradação da vegetação Caatinga
- Desertização versus Desertificação: o primeiro conceito refere-se às causas naturais, ao passo que o segundo, à ação antrópica – daí a opção pelo segundo termo nesta pesquisa
- Os sistemas de produção agropecuária em uso não são ambientalmente sustentáveis na Região de Xingó
- Há uma dualidade intrínseca em Xingó: riqueza energética versus pobreza humana
- A validação em campo confirmou a eficiência das tecnologias de Sensoriamento Remoto e SIG na identificação, quantificação e localização das áreas de risco
- A contribuição à pesquisa científica sobre o tema da desertificação está evidenciada pelo método controlado que integra diversos tipos de dados geoespaciais numa análise espaço-temporal
- Aquisição de 10Gb de dados georreferenciados disponibilizados aos estudantes, professores, pesquisadores e instituições públicas.

## REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, L.; OLIVEIRA, M.; DA SILVA, F.; BURGOS, N. **Avaliação de Mudanças no Albedo do Núcleo de Desertificação do Seridó através de Imagens do Landsat TM**. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Foz do Iguaçu, 2001, p. 549-556. Anais.
- ACCIOLY, L.; PACHÊCO, A.; COSTA, T.; LOPES, O.; OLIVEIRA, M. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/LANDSAT. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, vol. 6, n. 3, p. 492-498, 2002.
- ADAMI, M.; PINHEIRO, E.; MOREIRA, M. **Aplicações de Diferentes Algoritmos para a Classificação de Imagens ETM+/LANDSAT-7 no Mapeamento Agrícola**. São José dos Campos, SP: INPE, 2002. 41 p.
- AMORIM, A.; BRANDÃO, R.; MATTOS, J.; FREIRE, N. **Projeto Geoturismo Xingó**. Canindé de São Francisco, SE: Instituto Xingó, 2001. 196 p.
- AMORIM, A.; GAMA, H.; MATTOS, J.; FREIRE, N. **Atlas Xingó**. Canindé de São Francisco, SE: Instituto Xingó, 2002. 64 p.
- ANDRADE, M.C. **A Problemática da Seca**. Recife, PE: Líber Gráfica e Editora, 1999. 94p.
- ANDRADE-LIMA, D. **Um pouco de ecologia para o Nordeste**. Recife, PE: UFPE, 1972.
- \_\_\_\_\_. **The caatingas dominium**. In: Revista Brasileira de Botânica, n. 4, p. 149-153, 1981.
- ARAÚJO, A.; SANTOS, M.; MEUNIER, I.; RODAL, M. **Desertificação e Seca**. Recife: Gráfica e Editora do Nordeste Ltda., 2002. 63 p.
- ARONOF, S. **Geographic information system: a Management Perspective**. Canadá: WDL Publications, 1989.
- ASSIS, J. S. **Biogeografia e Conservação da Biodiversidade**. Maceió, AL: Catavento, 2000. 199 p.
- \_\_\_\_\_. **Desertificação em Alagoas (Análise Físico-Ambiental Preliminar)**. Maceió, AL: UFAL, 2002. Apostila.

- AURÉLIO. **Novo Dicionário Básico da Língua Portuguesa**. Folha de São Paulo, Editora Nova Fronteira: Rio de Janeiro, 1988. 689 p.
- AYALA, R.; BECERRA, A; IRIBARNE, L. F.; BOSCH, A. DÍAZ, J.R. **GIS System as a Decision Support Tool for Agricultural Planning in Arid Zones os Spain**. In: GEOMÁTICA, Vol. 51, N° 6, 1997, pp. 234 a 255.
- BANON, G.J.F.; BARREIRA, J. **Bases da Morfologia Matemática para a Análise de Imagens Binárias**. UFPE, Recife, 1994.
- BARROS, I.; SAMPAIO, E. **Phenology of Caatinga Species at Serra Talhada, PE, Northeastern Brazil**. Revista Biotropica, n. 29(1), 1997. p. 57-68.
- BAUTISTA, H. P. **Espécies Arbóreas da Caatinga: sua importância econômica**. In: Simpósio sobre a Caatinga e sua Exploração Racional. Feira de Santana, BA: 1988. 215 p.
- BONHAM-CARTER, G.F. **Geographic information system for geocientists: modelling with GIS**. Ottawa: Pergamon. 398 p. (Computer Methods in the Geosciences, 13).
- BRASIL, GOVERNO DO. **Desertificação – III Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente; Prática Gráfica e Editora, 1999. 23 p.
- \_\_\_\_\_. **Diretrizes para a Política Nacional de Controle da Desertificação – projeto BRA 93/036**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 1998.
- \_\_\_\_\_. **Desertificação**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2003. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/redesert/desertbr.html>>. Acesso em 19/09/03.
- \_\_\_\_\_. **Mapa de Susceptibilidade à Desertificação**. Brasília, DF: 1998b. 95 p.
- BRITO, E. (Coordenação Geral). **Mapeamento Cultural dos Municípios do Vale do Rio São Francisco no Estado de Alagoas**. Maceió: Ministério da Cultura, 2000. 182 p.

- BURROUGH, P.A. ***Principles of geographical information systems for land resources assessment***. Oxford: Oxford University Press, 1986. 194p. (monographs on Soil and resources Survey, 12).
- CALHEIROS, S. **Turismo versus Agricultura no Litoral Meridional Alagoano**. Rio de Janeiro, RJ, 2000. 255 p. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CÂMARA, G. **Epistemologia do Geoprocessamento**. São José dos Campos, SP: INPE, 2001.
- CÂMARA, G. **Geoprocessamento: Teoria e Aplicações**. São José dos Campos, SP: INPE, 2000. Disponível em <<http://dpi.inpe.br/gilberto/livro>>. (Apostila).
- CARVALHO, V. **Abordagem multiescala para o monitoramento de indicadores do processo de desertificação**. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Foz do Iguaçu, 2001, p. 1539-1551. Anais.
- CAVALCANTE, E. (Organizador). **Desenvolvimento Regional e Sustentabilidade**. Maceió: Catavento, 1999. 139 p.
- CARNAP, R.; GARDNER, M. **Introduction to the Philosophy of Science**. Dover Publications, London: 1995.
- CHESF. **A história do Rio São Francisco**. Recife, PE: CHESF, 2001. Disponível em <<http://www.chesf.gov.br>>. Acesso em 11/10/03.
- \_\_\_\_\_. **Inventário Turístico da Região dos Lagos do Rio São Francisco**. Recife, PE: CHESF, 1995.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 1a. Ed. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 1999. 215 p.
- COLWELL, R.N. **Manual of Remote Sensing**. Falls Church, Virginia : American Society of Photogrammetry, 1983.
- COSTA, T.; ACCIOLY, L.; OLIVEIRA, M.; BURGOS, N.; SILVA, F. **Mapeamento da Fitomassa da Caatinga do Núcleo de Desertificação do Seridó, pelo Índice de Área de Planta (IAP) e o Índice de Vegetação da**

**Diferença Normalizada (NDVI), obtido com dados do Sensor Landsat 7 TM.** In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Foz do Iguaçu, 2001, p. 1563-1573. Anais.

CRÓSTA, A. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1993. 170 p.

CUÉLLAR, J. (Organizador). **Nossa diversidade criadora.** Campinas, SP: Papirus; Brasília, DF: UNESCO, 1997. 416 p.

DIETERICH, H. **Novo Guia para a Pesquisa Científica.** Blumenau, SC: Editora da FURB, 1999. 263 p.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília, DF: 1999. 412 p.

ERDAS Field Guide. 5a. ed. – Atlanta : ERDAS Inc., 1999.

FAO. **Desertification.** Disponível em <<http://www.fao.org/desertification/default.asp?lang=en>>. Acesso em 12/10/03.

FATORGIS. **O que é Geoprocessamento?... E o que isto tem a ver com você?** Curitiba: Sagres Editora, 2000. Disponível em <<http://www.fatorgis.com.br>>. Acesso em 05/11/02.

FERREIRA, D. G.; MELO, H. P.; NETO, F. R. R.; NASCIMENTO, P. J. S.; RODRIGUES, V. A **Desertificação no Nordeste do Brasil: Diagnóstico e Perspectivas.** In: Conferência Nacional e Seminário Latino-Americano da Desertificação. Fortaleza, 1994.

FLORENZANO, T. **Imagens de satélite para estudos ambientais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97 p.

FOLHA ON LINE. **ONU discute desertificação e seca durante reunião em Cuba.** Disponível em <<http://www.folhaonline.com.br>>. Acesso em 18/09/2003.

FONSECA, L.; LOPES, E.; YAMAGUCHI, F.; VINHAS, L. **Processamento Digital de Imagens.** São José dos Campos, SP: INPE, 2000. (Apostila).

FRANCO, A. **Por que precisamos de Desenvolvimento Local, Integrado e Sustentável.** Brasília: Ágora, 2000.

- FREIRE, N.; MOURA, D.; PEREIRA, E.; SCHLINDWEIN, C.; PACHÊCO, A. **Classificação de Fitofisionomias no Entorno da Usina Hidrelétrica de Xingó, segundo Níveis de Degradação obtidos através do Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Recife, PE: UFPE, 2003. (no prelo.)
- FRIEDEL, H. **As grandes leis da biosfera**. São Paulo, SP: EDUSP, 1999. 479 p.
- GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento das observações: aplicações geodésicas**. Curitiba, PR: UFPR, 1994.
- GOLD, C.M., CASSAULT, P. **An Event-Driven Approach to Spatio-Temporal Mapping**. In: GEOMÁTICA, Vol. 50, N° 4, 1996, pp. 415 a 424.
- GOLDCHILD, M.F. **Geographical information systems in undergraduate geography: a contemporary dilemma**. In: The Operational Geographer, n. 8, 1985. p. 34-38.
- HAZELTON, N. W. **Temporal Aspects of Map and Mapping: Some Implications**. In: Surveying and Land Information Systems, Vol. 57, N° 1, 1997, pp. 42 a 54.
- IBAMA. **Desertificação no Brasil**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2003. Disponível em <<http://www.ibama.gov.br>>. Acesso em 22/09/03.
- INPE. **Divisão de Geração de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Disponível em <<http://www.inpe.br/dgi>>. Acesso em 10/10/03.
- INPE. **Tutorial do Spring**. São José dos Campos, SP: INPE, 2001. 305 p. (Apostila).
- \_\_\_\_\_. **Divisão de Geração de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Site da Internet. Disponível em <<http://www.inpe.br/dgi>>. Acesso em 05/10/03.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 1991 Agregado por Setores Censitários – Vol. 2 Região Nordeste**. Rio de Janeiro: IBGE, 2003. 1 CD-ROM

\_\_\_\_\_. **Censo Demográfico 2000 Agregado por Setor Censitário dos resultados do universo – Vol. 3 Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia.** 2a. Edição. Rio de Janeiro: IBGE, 2003. 1 CD-ROM

\_\_\_\_\_. **Malha de Setor Censitário Rural Digital do Brasil – Situação 2000 – Vol. 3.** Rio de Janeiro: IBGE, 2003. 1 CD-ROM

\_\_\_\_\_. **Base de Informações Municipais 4.** Rio de Janeiro: IBGE, 2003. 1 CD-ROM

\_\_\_\_\_. **Mapa da Série Brasil-Geográfico. Escala 1:5.000.000, Sistema de Projeção Policônica.** Rio de Janeiro: IBGE, 1997. 1 CD-ROM

INSTITUTO XINGÓ. **Relatório de Atividades do Geoxingó.** Canindé de São Francisco, SE: IX, 2002.

JENSEN, J.R. ***Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective.*** Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall, 1999.

JESUS, P. & SOARES, G. **Estruturação de um serviço de apoio às atividades econômico-produtivas no âmbito do Programa Xingó.** Recife, PE: UFRPE, 2000. (Relatório Técnico.)

JORNAL DO COMMERCI0. **Nada brota no solo salino de Cabrobó.** Recife, PE: 14/11/99, Caderno Especial.

\_\_\_\_\_. **Seca, devastação e abandono.** Recife, PE: 10/11/02. 1o. Caderno.

KATO, M.T. (coord.). **Diagnóstico das Condições Sanitárias e Ambientais na Área de Xingó.** Recife, PE: Departamento de Engenharia Civil/ Grupo de Saneamento Ambiental, UFPE, 1999. 155 p.

KAZMIERCZAK, M. **Uso de Dados AVHRR/NOAA GAC para Análise da Sazonalidade da Caatinga.** Fortaleza, CE: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 1996.

\_\_\_\_\_. **Desenvolvimento de um Algoritmo para Modelar a Suscetibilidade de Desertificação no Nordeste Brasileiro: Algoritmo**

- ISD.** In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Foz do Iguaçu, 2001, p. 1675-1691. Anais.
- LANDSAT 5 TM. Cena 215; Órbita: 067; Data de passagem: 11/03/1989. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002. Imagem de Satélite. Bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.
- \_\_\_\_\_. Cena 215; Órbita: 067; Data de passagem: 06/10/1995. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002. Imagem de Satélite. Bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.
- LANDSAT 7 ETM+. Cena 215; Órbita: 067; Data de passagem: 05/01/2003. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002. Imagem de Satélite. Bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.
- LIN, H.; CHOI, S.K. ***A Multi-window Approach for 4-D Spatio-Temporal Information Visualization***. In: GEOMÁTICA, Vol. 50, N° 3, 1996, pp. 261 a 267.
- LINS, M.; ALBUQUERQUE, C. **Tecnologias para reduzir a pobreza no semi-árido**. Salvador, BA: UFBA, 2001.
- LOCH, C. **Topografia contemporânea**. Florianópolis, SC: UFSC, 1995.
- MALDONADO, F. **Rotação Espectral Controlada como alternativa em Análise por Componentes Principais para detecção de mudanças em regiões do semi-árido**. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Foz do Iguaçu, 2001, p. 627-630. Anais.
- MATALLO, H. **A Desertificação no Mundo e no Brasil**. In: SCHENKEL, C. S. & MATALLO, H. (org.). **Desertificação**. Brasília, DF: UNESCO, 1999. p. 9-25.
- MENDONÇA, A. **Pão de Açúcar História e Efemérides**. Pão de Açúcar, AL: Prefeitura Municipal de Pão-de-Açúcar, 1974.
- MENESES, P.; MADEIRA NETTO, J. (Organizadores). **Sensoriamento Remoto – Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília: Editora UnB, 2001. 262 p.
- MOREIRA, M. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 2a. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2003. 307 p.

- MORIN, E. **Os Sete Saberes Necessários à Educação do Futuro**. São Paulo: Cortez; Brasília, DF: UNESCO, 2000. 118 p.
- \_\_\_\_\_. **Saberes Globais e Saberes Locais**. Rio de Janeiro: Garamond, 2000. 76 p.
- MOURA, D. **Riqueza e Abundância de Abelhas em Diferentes Estágios de Degradação da Caatinga como Indicadores Ambientais no Entorno da Usina Hidrelétrica de Xingó**. Dissertação de Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais. Recife, PE: UFPE, Departamento de Geografia, 2003.
- NOVO, E. **Sensoriamento Remoto – Princípios e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 293 p.
- OLIVEIRA, S.; BARRETO, M. LEITE, F. CARVALHO, G. **Degradação Ambiental e Susceptibilidade à Desertificação na Região do Médio Jaguaribe – CE**. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Belo Horizonte, 2003, p. 1315-1322. Anais.
- PERAZZO, G.M; KATO, M.T.; FLORENCIO, L.. **Avaliação do Saneamento Ambiental em 29 Municípios na Região do Semi-Árido, Nordeste do Brasil**. In: XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Anais. Cancún, México, 2002.
- PONZONI, F.J. **Comportamento Espectral da Vegetação**. In: MENESES, P. R., NETTO, J. S. M. SENSORIAMENTO REMOTO – REFLECTÂNCIA DOS ALVOS NATURAIS. Brasília, DF: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 262p.
- RAMALHO FILHO, R. (Organização). **Sustentabilidade do Desenvolvimento**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1998. 150 p.
- REIS, J. **Desertificação no Nordeste**. Recife, PE: SUDENE, 1988. 40 p.
- REIS, M. **Conservação dos Ecossistemas do Nordeste Brasileiro**. In: Simpósio sobre Caatinga e sua Exploração Racional. Feira de Santana, BA: EMBRAPA-DDT, 1984. 361 p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.; CORRÊA, G. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 3a. ed. – Viçosa : NEPUT, 1999.

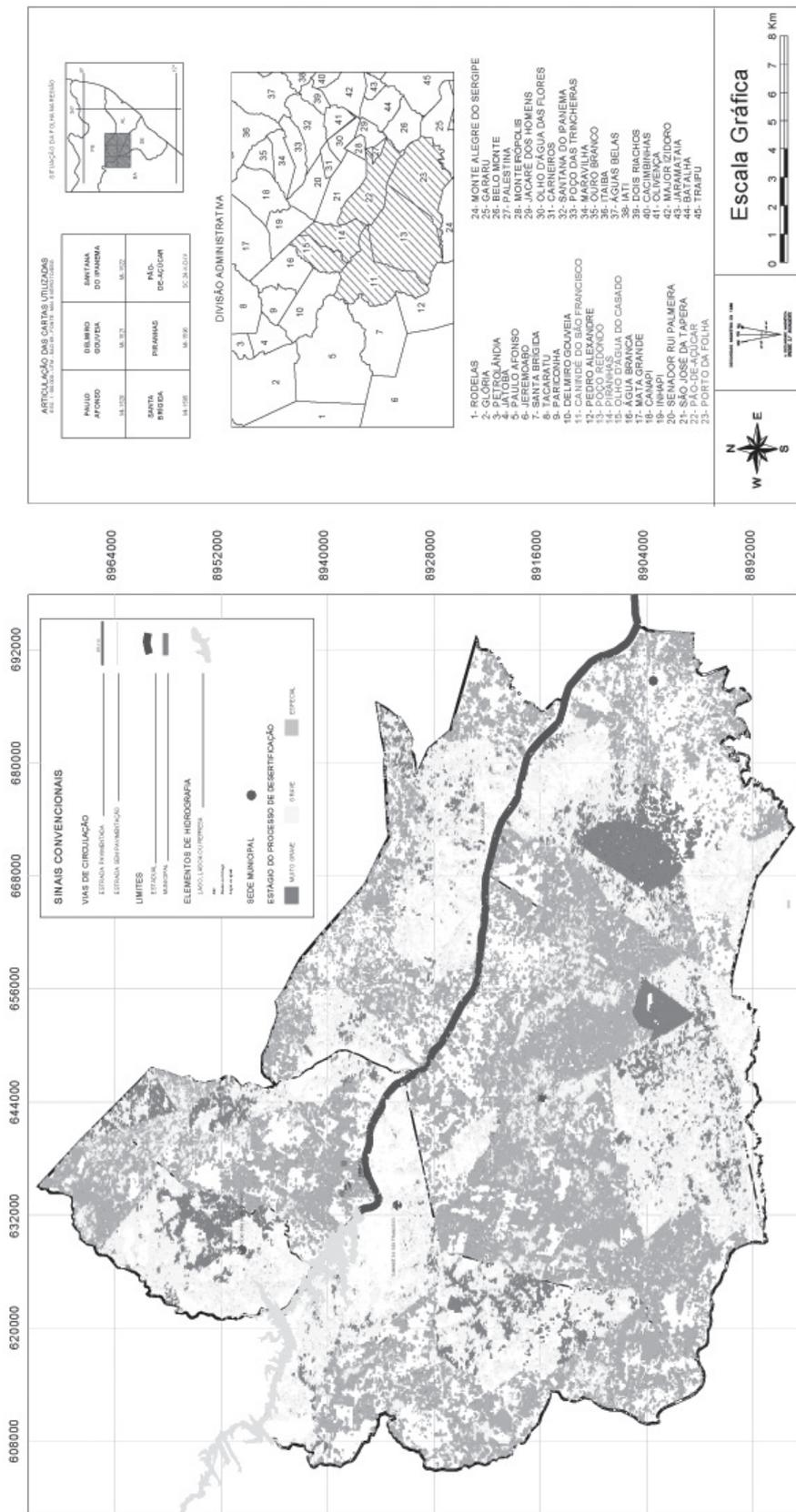
- RODRIGUES, V.; MATALLO Jr., H; LINHARES, M. C.; GALVÃO, A. L. C.; GORGÔNIO, A. S. **Avaliação do Quadro da Desertificação no Nordeste: Diagnóstico e Perspectivas**. In: Conferência Internacional sobre Impactos de Variações Climáticas e Desenvolvimento Sustentável em Regiões Semi-áridas. Fortaleza, 1992.
- ROMÃO, V. **Geodésia**. (Apostila). Recife, PE: UFPE, 2002.
- SACHS, I. **Estratégias de Transição para o Século XXI**. São Paulo: Studio Nobel, 1993. 103 p.
- \_\_\_\_\_. **Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2000. 96 p.
- SAMPAIO, E.; SAMPAIO, Y. **Desertificação**. Recife, PE: Editora Universitária UFPE, 2002. 85 p.
- SANTOS, A. **Geodésia Elementar: princípios de posicionamento global – GPS**. Recife, PE: Editora da UFPE, 2001.
- SANTOS, A.; ANDRADE, J. **Nova Geografia de Sergipe**. Aracaju, SE: Secretaria do Estado da Educação do Esporte e Lazer, Universidade Federal de Sergipe, 1998. 148 p.
- SEABRA, G. **Pesquisa Científica: o Método em Questão**. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília, 2001. 124 p.
- SISTEMAS DE INFORMACIÓN AMBIENTAL EN LOS PROGRAMAS DE ACCIÓN NACIONAL PARA LA LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN*. PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. New York, EUA, 1999.
- SOUZA, C. **Análise multitemporal da cobertura vegetal para detecção de mudanças no município de Cedro-PE**. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Belo Horizonte, 2003, p. 2907-2912. *Anais*.
- STAR, J.; ESTES, J. **Geographic Information Systems: An Introduction**. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall, 1990.

- SUDENE. Levantamento Exploratório de Solos do Estado de Alagoas. Recife: SUDENE, 1975. 523 p.
- \_\_\_\_\_. **Levantamento Exploratório de Solos do Estado de Sergipe**. Recife: SUDENE, 1975. 505 p.
- \_\_\_\_\_. **Processos de Desertificação no Nordeste**. Recife, PE: Ministério do Interior, 1983.
- SUITS, G.H. *Manual of Remote Sensing*. Falls Church, Virginia : American Society of Photogrammetry, 1983.
- THOMSON, R.C., RICHARDSON, D.E. *Generalization, Temporal GIS and Map Revision*. In: GEOMÁTICA, Vol. 50, N° 4, 1996, pp. 441 a 448.
- TORGE, W. *Geodesy*. 2a. ed. New York: De Gruyter, 1991. 264 p.
- UNESCO. Desertificação. Brasília, DF: UNESCO, 1999.
- VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Metodologia para Identificação de Processos de Desertificação – Manual de Indicadores**. Recife, PE: SUDENE, 1978. 18 p.
- VIANA, M.; RODRIGUES, M. **Um Índice Interdisciplinar de Propensão à Desertificação (IPD): Instrumento de Planejamento**. Fortaleza, CE: Revista Econômica do Nordeste, v. 30, n. 3, p. 264-294, jul.-set., 1999.
- VIEIRA, P.; RIBEIRO, M.; FRANCO, R.; CORDEIRO, R. (Organizadores). **Desenvolvimento e Meio Ambiente no Brasil – A Contribuição de Ignacy Sachs**. Porto Alegre: Pallotti; Florianópolis: APED, 1998. 448 p.
- XINGÓ, I. **O que é o Instituto Xingó**. Canindé de São Francisco, SE: Instituto Xingó, 2003. 56 p.
- XINGÓ, P. **Uma proposta estruturante no semi-árido nordestino**. Canindé do São Francisco, SE: CHESF, 1996.



APÊNDICE

Mapa Temático das Áreas de Risco à Desertificação na Região de Xingó







## DESERTIFICAÇÃO: Análise e Mapeamento

### **FORMATO**

15,5 x 22 cm

### **TIPOGRAFIA**

Calibri

### **PAPEL**

Capa em Triplex 250 g/m<sup>2</sup>

Miolo em Offset 75g/m<sup>2</sup>

Montado e impresso na oficina gráfica da

**Editora**  
**Universitária**  **UFPE**

Rua Acadêmico Hélio Ramos, 20 | Várzea,

Recife - PE CEP: 50.740-530

Fones: (0xx81) 2126.8397 | 2126.8930 | Fax: (0xx81) 2126.8395

[www.ufpe.br/edufpe](http://www.ufpe.br/edufpe) | [edufpe@nlink.com.br](mailto:edufpe@nlink.com.br) | [editora@ufpe.br](mailto:editora@ufpe.br)