A Degradação ambiental em Xingó: uma Visão sinótica numa Perspectiva espectro-temporal

Admilson P. Pacheco (admilpp@ufpe.br)
Neison Cabral Ferreira Freire (neisonfreire@ibest.com.br)
Utaiguara da Nóbrega Borges (utaiguara@yahoo.com.br)

Universidade Federal de Pernambuco
Depto. de Engenharia Cartográfica
Rua Acad. Hélio Ramos, s/n – Cid. Universitária – Recife - PE

RESUMO : Este artigo aborda o desenvolvimento de uma nova metodologia para a pesquisa sobre a desertificação no semi-árido nordestino, ao processar, e extrair dados espectrais captados pelos sensores remotos a bordo de satélites de observação da Terra. Com a geração de mapas 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, 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.

Palavras chaves: Sensoriamento Remoto, Desertificação, Semi-árido.

ABSTRACT : This article approaches the development of a new methodology for the research on the Savanna in the semi-arid Northeasterner, when processing, and to extract ghastly data captured by the sensor ones remote on board satellites of observation of the Earth. With the generation of maps in temporary series correlate, embracing the period from 1989 to 2003, for the study area chosen: the closer six municipal districts to the lake of the Hydroelectric Plant of Xingó, in Low San Francisco, he/she hopes to contribute with the several research lines on the theme, always dynamic and evolutionary on all the aspects, unintentionally with that to contain the discussion on the methods of analysis of this area of the specific knowledge, but, before, to bring a new vision, an approach space-storm with the use of the technologies of the available geoinformação so that one can shimmer a better and more promising future for the country today and the one tomorrow.

Key word: Remote Sensing, Savanna, Half-arid.

1 INTRODUÇÃO

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 multidiscipinaridade, 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.

2 MATERIAIS

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.

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[4] 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[5], verificou-se a disponibilidade de datas para a cena/órbita 215/067 com cobertura de nuvens <10% para toda a cena.

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+.

---

4 *Do inglês,* path / row.

5 *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.*

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.

2.2 Equipamentos

Foi utilizado um microcomputador tipo *notebook*, com memória RAM de 512 Mb, *clock* de 500 Mhz, *drive* CD-RW, *floppy-disk* 1.44 Mb, 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.

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.

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*.

3 METODOLOGIA

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.

3.2 Processamento dos Dados

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.

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 e Equalização; Filtragem Linear: Realce de Imagem TM e 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[6].

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.

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.
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, a partir das bandas originais de uma imagem multiespectral, gerar novas bandas descorrelacionadas, isto é, sem redundâncias entre si. Trata-se, portanto, de uma técnica de realce que reduz ou remove esta redundância espectral.

---

6 *De uma mesma localização geográfica, porém de épocas distintas.*

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 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).

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. Os resultados desta técnica podem ser vistos na.

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.

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 e 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 ≥ 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 porcentual 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 treinamento 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.

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 (Figuras 01, 02 e 03).

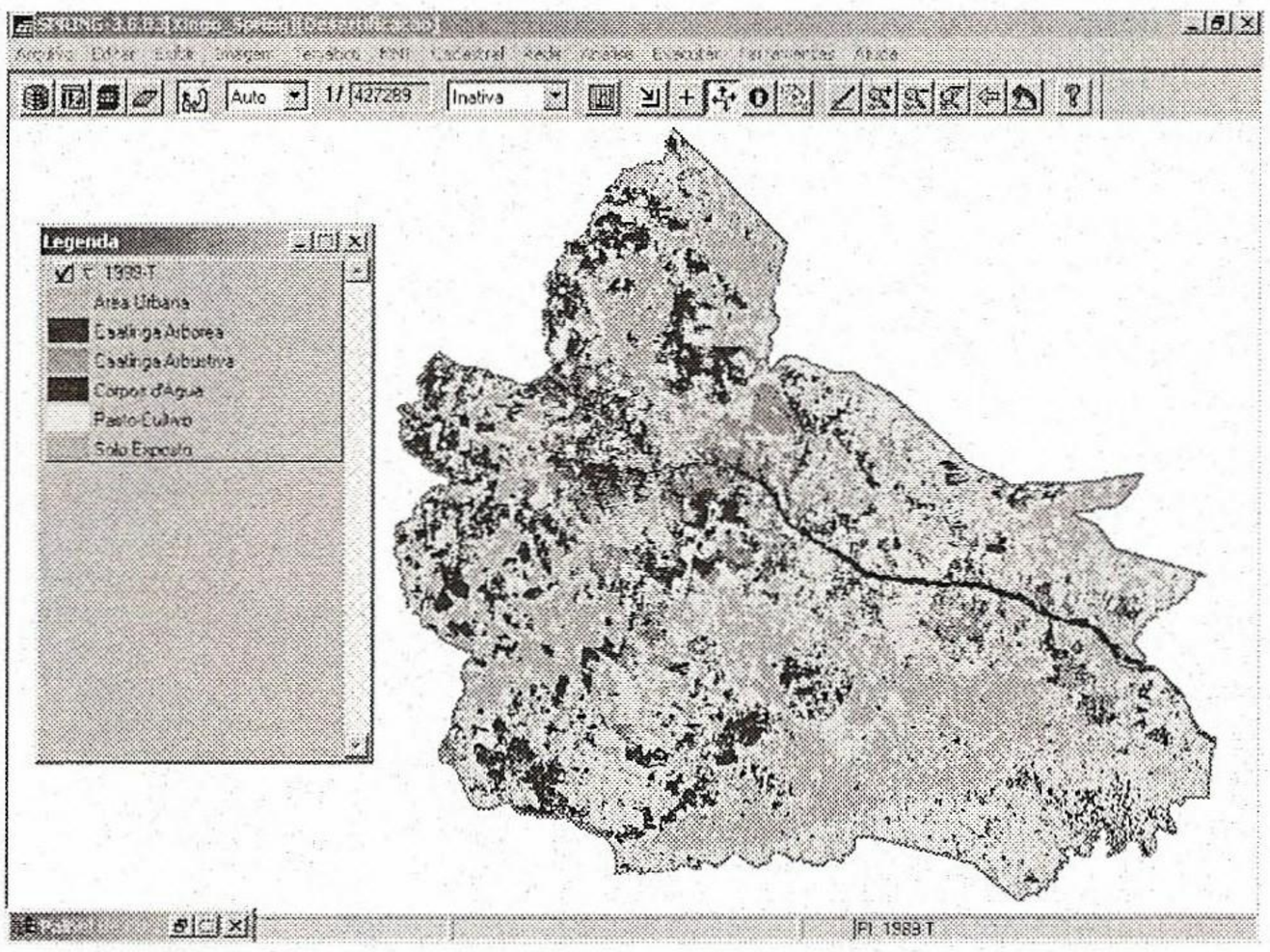

Figura 01 – Mapeamento temático obtido a partir de Classificação Supervisionada na imagem de 11/03/89, identificando as classes de interesse.

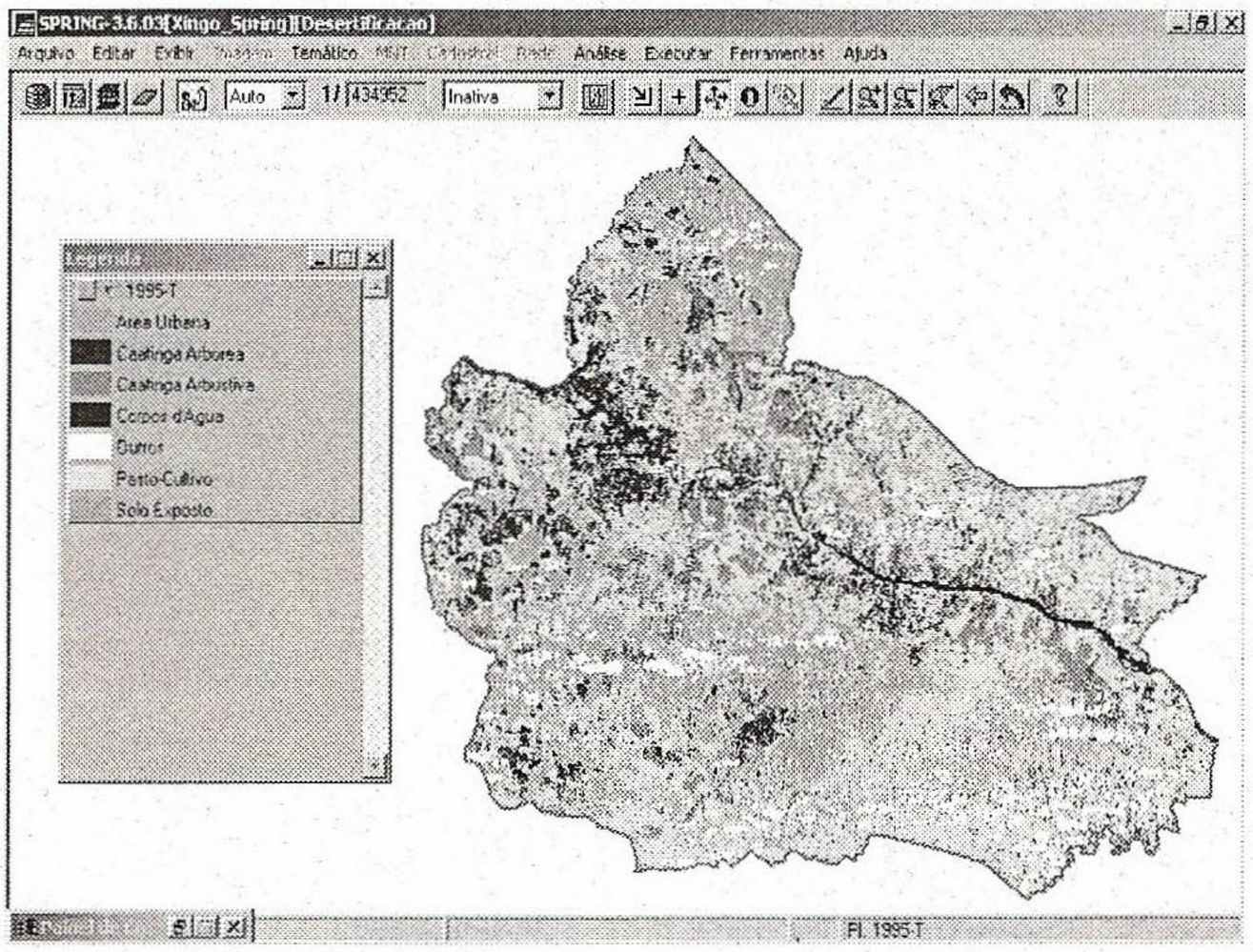

Figura 02 – Mapeamento temático obtido a partir de Classificação Supervisionada na imagem de 06/10/95, onde se observa uma discreta presença de nuvens na área.

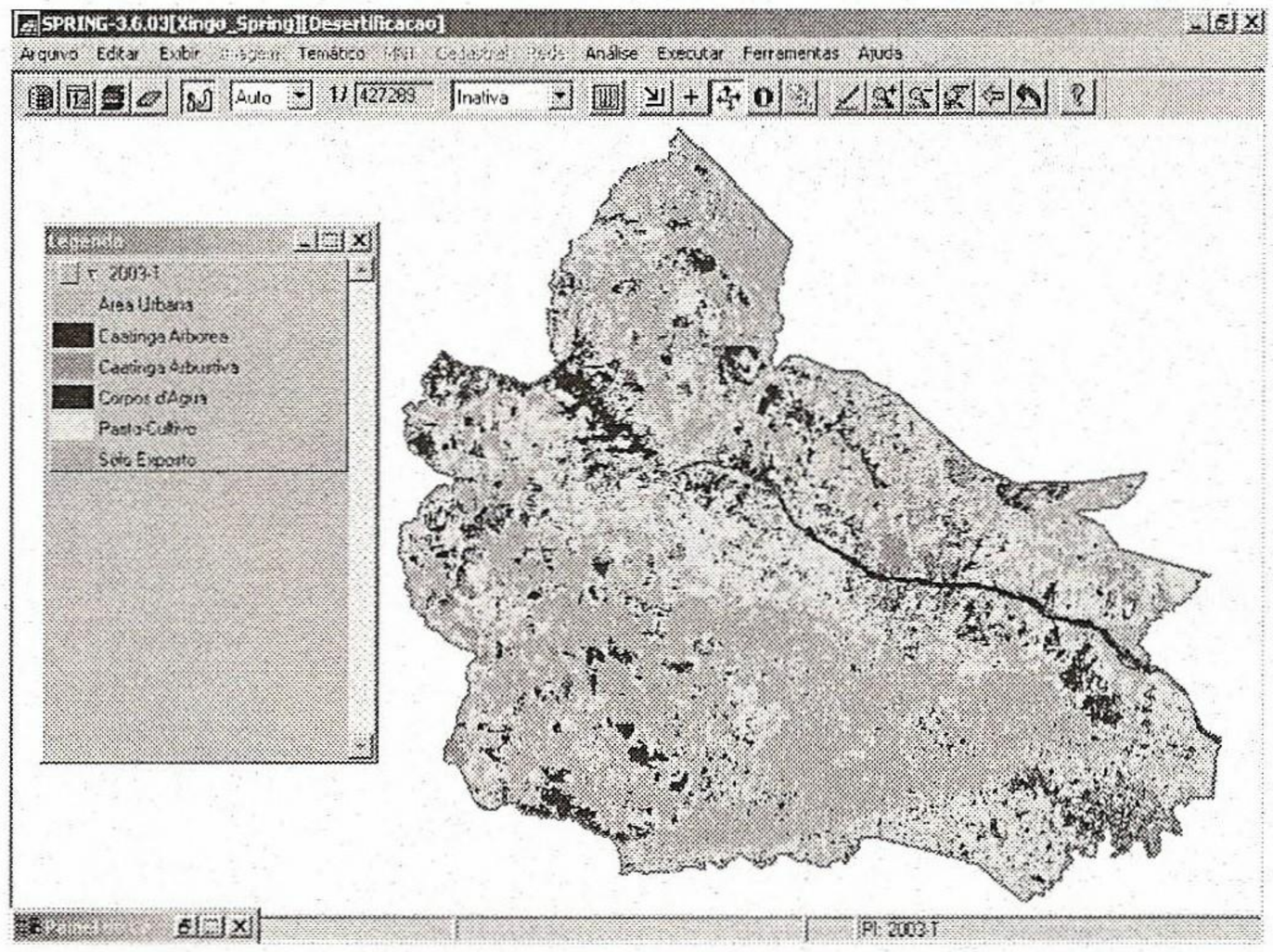

Figura 03 – Mapeamento temático obtido a partir de Classificação Supervisionada na imagem de 05/01/03.

4 CONCLUSÕES

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

5 REFERÊCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ARAÚJO, A.; SANTOS, M.; MEUNIER, I.; RODAL, M. **Desertificação e Seca.** Recife: Gráfica e Editora do Nordeste Ltda., 2002. 63 p.

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

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

INPE. **Tutorial do Spring**. São José dos Campos, SP: INPE, 2001. 305 p. (Apostila).

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

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

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.

MOREIRA, M. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação.** 2ª. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2003. 307 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.

SAMPAIO, E.; SAMPAIO, Y. **Desertificação.** Recife, PE: Editora Universitária UFPE, 2002. 85 p.