

EVOLUÇÃO URBANA E VULNERABILIDADE DOS AQUIFÉROS SUPERIORES NO MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA – PB

Urban Sprawl and the Groundwater Vulnerability in the City of João Pessoa – PB – Brazil

Leonardo Figueiredo de Meneses¹
Tarciso Cabral da Silva²
Elaine Cristina Teixeira Pedrosa de Figueiredo³
Renata de Araújo Rafael⁴

¹ **Universidade Federal da Paraíba – UFPB**
Departamento de Engenharia e Meio Ambiente – Campus IV
Rua da Mangueira s/n, Centro, Rio Tinto/ PB, Brasil, 58.297-000
lfmeneses@hotmail.com

² **Universidade Federal da Paraíba – UFPB**
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana
Campus Universitário I - CT, 36, Cidade Universitária, João Pessoa/ PB, Brasil, 58.059-900
tarcisocabral@yahoo.com.br

³ **Universidade Federal da Paraíba – UFPB**
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana
Rua João Câmara, 85, Treze de Maio, João Pessoa/ PB, Brasil, 58.025-100
pedrosa.elaine@hotmail.com

⁴ **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB**
Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Geoprocessamento
Rua Alfredo Ferreira Rocha, 719, Mangabeira 1, João Pessoa/ PB, Brasil
renatarafael_@hotmail.com

RESUMO

O processo de urbanização gera diversos problemas que afetam diretamente a qualidade ambiental das cidades. A cidade de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba, apesar de não ser uma grande metrópole, tem passado por uma profunda mudança em seu tecido urbano. O presente trabalho apresenta a evolução espacial da área urbana de João Pessoa entre os anos de 1990 e 2006, através da utilização de imagens de satélite de média resolução. Em paralelo, realizou-se o mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos superiores no município baseado no modelo DRASTIC, que usa fatores hidrogeológicos para determinar a vulnerabilidade de um aquífero, e foi realizada a comparação entre as áreas de expansão urbana e as áreas vulneráveis dos aquíferos. Para o tratamento e integração dos dados foi utilizado um Sistema de Informações Geográficas e, após o cruzamento dos mapas, foram quantificados os percentuais de cada classe de vulnerabilidade ocupadas pela urbanização. Os resultados obtidos apontam para a necessidade urgente de um ordenamento do uso da terra em áreas onde a expansão imobiliária está em grande crescimento, como no caso da região litorânea do município.

Palavras chaves: Evolução Urbana, Vulnerabilidade de Aquíferos, Sistema de Informação Geográfica.

ABSTRACT

The urbanization process has generated several problems that affect directly the environmental quality of the cities. The City of João Pessoa, capital of the State of Paraíba, despite it is not a big metropolis, it has passed for a deep change in its urban material. The present work shows the space evolution of the urban area of the City of João Pessoa through the

satellite images of middle resolution, in the period that represents the years of 1990 until 2006. In parallel, there was the mapping of the vulnerability of upper aquifers in the county based on the DRASTIC model, which uses hydrogeological factors to determine the index of vulnerability of an aquifer, and the comparison was made between areas of urban sprawl and the vulnerable areas. The obtained results indicate the urgent need of land use arrangement in areas where real state spread is increasing, as it is the case of city coastal areas.

Keywords: Urban Sprawl, Groundwater Vulnerability, Geographic Information System.

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização e a concentração populacional nas cidades têm gerado diversos problemas que afetam diretamente a qualidade ambiental das mesmas. Inundações, erosão e assoreamento de reservatórios e cursos d'água são consequências do uso inadequado da terra (PACHÊCO e RIBAS, 1998), que terminam por influenciar na qualidade de vida da população residente.

Outro grave problema diz respeito à manutenção da qualidade da água de mananciais visando sua utilização para consumo humano e para o equilíbrio ecológico. A incapacidade da gestão municipal em oferecer e implantar a infraestrutura básica (saneamento, abastecimento de água) para gerenciamento de efluentes domésticos e industriais compromete a qualidade dos corpos d'água intra-urbanos ou que interceptam áreas urbanas ou industriais, no Brasil, tomando o índice de qualidade de suas águas inferior ao adequado ao consumo humano ou ao equilíbrio ecológico.

A contaminação dos cursos d'água tem obrigado a busca por fontes de captação cada vez mais distantes dos centros urbanos, de forma a obter água de melhor qualidade. Entretanto, esta alternativa ao tempo em que reduz custos com processos de tratamento, encarece o custo final ao consumidor devido ao processo de adução.

Outra alternativa é a exploração de águas subterrâneas para abastecimento ou complementação do fornecimento de água nos núcleos urbanos, opção esta que vem registrando um expressivo incremento nos últimos anos, a ponto de vários núcleos urbanos serem abastecidos de forma exclusiva ou complementar por esta fonte. A principal vantagem, neste caso, é que o custo com tratamentos específicos é bastante reduzido uma vez que, geralmente, a qualidade das águas subterrâneas é melhor que das águas superficiais.

A dinâmica das cidades tem sido motivo de diversos estudos, particularmente aqueles voltados ao planejamento e ordenamento do uso da terra, buscando-se identificar os vetores de crescimento urbano e o impacto do mesmo sobre as componentes ambientais locais e regionais. O crescimento das cidades sem a observância da capacidade de suporte do ambiente pode comprometer o equilíbrio ambiental e, conseqüentemente, implicar na redução da qualidade de vida da população residente.

Deve-se, portanto, priorizar estudos

integrados entre os componentes ambientais e os componentes sócio-econômicos de forma a estabelecer limites de ocupação que permitam a manutenção da qualidade ambiental nos centros urbanos.

Sendo assim, este estudo tem como objetivo analisar a tendência de crescimento da área urbana do município de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba, no período que compreende os anos de 1990 até 2006, verificando seu direcionamento espacial e o correlacionando com a vulnerabilidade dos aquíferos superiores presentes no município.

De acordo com Lobo Ferreira e Cabral (1991), a vulnerabilidade natural de um aquífero deve ser entendida como a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente em função apenas das características intrínsecas do aquífero, diferenciando-se de risco de poluição por esta última se relacionar também com a existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo alterando a qualidade das águas subterrâneas (LOBO FERREIRA, 1998).

O mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos apresenta-se útil na medida em que pode auxiliar na alocação de recursos e na priorização das diversas atividades de monitoramento ambiental. Dentre as metodologias existentes para determinação da vulnerabilidade de aquíferos, Tucci e Cabral (2003), indicam o Índice GOD e o DRASTIC como os mais utilizados no Brasil. Para a presente pesquisa optou-se pela utilização do modelo DRASTIC (ALLER *et al.*, 1985), uma vez que o mesmo tem a vantagem de utilizar um conjunto maior de parâmetros que o modelo GOD.

O modelo DRASTIC baseia-se no pressuposto de que o contaminante é introduzido à superfície do terreno, e não diretamente no aquífero, deslocando-se com a mesma mobilidade da água, verticalmente, até alcançar o aquífero. O índice é calculado com base na ponderação de parâmetros hidrogeológicos. Quanto maior o valor do índice DRASTIC, maior deverá ser a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, entretanto, segundo Kohnke (2002), um valor baixo do índice não significa que não possa ocorrer contaminação, apenas que a mesma será menos provável e menor que em outras áreas.

Após o cálculo do índice, elabora-se o mapa da vulnerabilidade de cada um dos fatores e, em seguida, através da integração de todos eles, gera-se o mapa síntese da vulnerabilidade geral do aquífero.

Para a execução da pesquisa, utilizou-se de técnicas de sensoriamento remoto para identificação

Mangue, ao longo dos rios até onde se faz sentir o fluxo e refluxo das marés.

Para este estudo, o conjunto litológico mais importante é constituído pela Formação Barreiras e pelos depósitos Quaternários, uma vez que é nestes sedimentos que se encontram os aquíferos em análise, que são definidos como superiores, ou seja, aqueles que se apresentam sob ação direta da gravidade e encontram-se na formação sedimentar mais superficial, conseqüentemente, mais sujeitos aos riscos de contaminação. Sendo assim, cabem alguns comentários sobre tais depósitos.

- Formação Barreiras: possui uma espessura aproximada de 70 a 80 metros e apresenta-se aflorante em todo o litoral paraibano. Constitui-se basicamente de sedimentos areno-argilosos, mal selecionados. Tal constituição propicia o acúmulo de água em subsuperfície, nos espaços vazios entre os grãos que compõem a rocha. A Formação Barreiras ocupa quase a totalidade do território do município de João Pessoa, sendo responsável pela sustentação do relevo tabular, característico da região em estudo e adjacências. Na área de estudo, o topo desta Formação apresenta altitudes variando entre 20 e 100 metros.
- Depósitos Quaternários: compreendem os depósitos de mangue, constituídos de sedimentos pelíticos, inconsolidados e inexpressivos como aquíferos, não tendo sido considerados para efeitos desta pesquisa; terraços marinhos, constituídos, basicamente, por areias quartzosas de granulação média a grossa; e aluviões, localizados nas bacias fluviais e constituídos de areias siltsosas, as quais, por suas características de boa porosidade e permeabilidade, apresentam grande possibilidade de infiltração de água. Os aquíferos nas aluviões e terraços marinhos são do tipo livre, ou seja, estão submetidos à pressão atmosférica, tendo, como limite superior a superfície freática (FEITOSA e MANOEL FILHO, 1997) e dependem, para sua recarga, da infiltração das águas das chuvas.

Neste estudo foram analisados os aquíferos que se apresentam nas camadas menos profundas do subsolo, ou seja, nos casos em que os aquíferos dos sedimentos de praia e aluviões encontrarem-se localizados sobrepostos ao aquífero da Formação Barreiras, a vulnerabilidade estabelecida será referente ao aquífero mais superficial. Esta restrição está relacionada com a metodologia adotada, uma vez que não se torna possível analisar, ao mesmo tempo, dois aquíferos que ocupem a mesma posição vertical.

3. METODOLOGIA

Este trabalho divide-se em duas etapas: avaliação da evolução urbana e mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos superiores no município. Nos dois casos optou-se por utilizar o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – SPRING (CÂMARA *et al.*, 1996), em sua versão 4.3.3, para a integração dos dados e processamento das imagens de satélite.

Para a primeira etapa, foram utilizadas imagens do satélite Landsat 5, sensor TM, dos anos de 1990, 2001 e 2006, órbita/ponto 214/65, obtidas diretamente do sítio eletrônico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Tais cenas foram selecionadas por apresentarem baixa cobertura de nuvens sobre a área de estudo e por compreenderem um intervalo temporal representativo para a evolução do município.

Como o estudo envolve uma análise multi-temporal, tornou-se necessário realizar o registro das imagens, ou seja, uma transformação geométrica para relacionar as coordenadas da imagem (linha e coluna) com coordenadas geográficas (latitude e longitude) de um mapa base (CRÓSTA, 1992). Essa transformação elimina distorções existentes na imagem, geradas durante o processo de aquisição da imagem por parte do sensor orbital, além de possibilitar a realização da comparação entre alvos presentes em mais de uma imagem.

A imagem de 2001 foi registrada utilizando-se uma base cartográfica cadastral do município, através da opção de registro em tela do SPRING. A preferência por registrar primeiramente a imagem de 2001 se deve ao fato de que a base cartográfica utilizada como referência foi elaborada em 1998, possibilitando, assim, uma maior correlação entre os elementos presentes na imagem e na carta e propiciando um melhor resultado do processo de correção. Para esta imagem, o erro obtido no registro foi de 0,5 *pixel*.

As imagens de 1990 e de 2006 foram registradas com base na correção aplicada à imagem de 2001, tendo sido adotados, em todos os casos, polinômios de 2º grau e o interpolador vizinho mais próximo. Esta opção minimiza a alteração dos níveis de cinza dos pixels da imagem após a reamostragem dos mesmos, preservando, portanto as características originais da cena, no que se refere à informação de reflectância dos alvos. Os erros obtidos foram de 0,33 pixels e 0,28 *pixels*, para os dados de 1990 e 2006, respectivamente.

Para a identificação das áreas urbanas presentes nas imagens optou-se, primeiramente, pela realização de uma classificação digital supervisionada, que consiste na identificação, por parte do usuário, de grupos de pixels (amostras) pertencentes às classes desejadas e no enquadramento automático, por parte do computador, dos demais pixels da imagem atribuindo-os a uma daquelas classes, baseando-se em regras estatísticas (CRÓSTA, 1992). Entretanto, este

procedimento não se mostrou satisfatório uma vez que o comportamento espectral da área urbanizada assemelha-se com as áreas de solo exposto presentes tanto na área urbana quanto na área rural (Figura 3). Tal fato já foi documentado por Liu (2006), que indica

a utilização de técnicas de análise de textura e reflectância espectral para delimitação das classes de uso da terra urbana como uma técnica mais eficaz nestes casos.

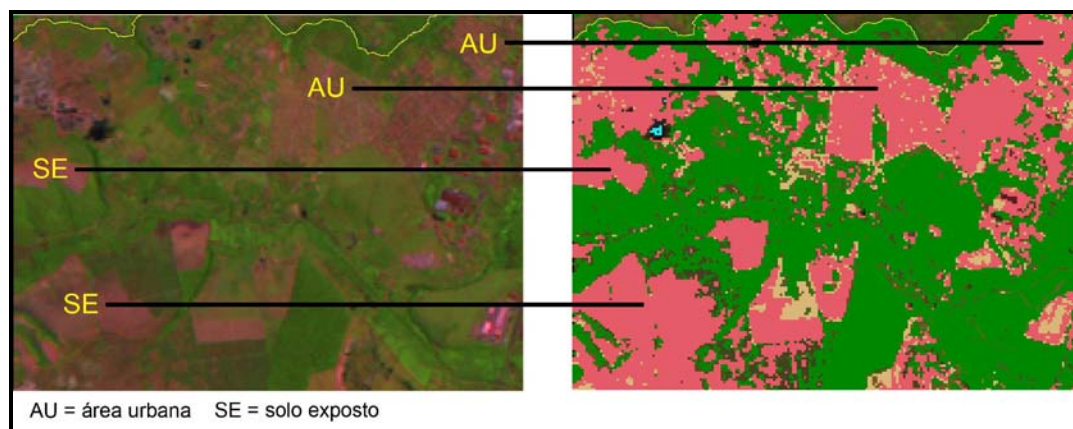


Fig. 3 – Exemplo de confusão entre alvos distintos devido ao seu comportamento espectral (à esquerda composição colorida e à direita imagem classificada por processo automático)

A fim de evitar erros de análise advindos da confusão entre os alvos, passou-se então a realizar a classificação das imagens através de interpretação visual, que se baseia na utilização dos elementos da interpretação de imagens: tonalidade, cor, textura, forma e estrutura (SOARES FILHO, 2000) para definir áreas homogêneas.

A identificação das áreas urbanas foi realizada sobre composições coloridas obtidas com as bandas 5, 4 e 3 aplicadas aos canais RGB, respectivamente. Através da edição vetorial foram mapeadas as áreas urbanas, gerando-se um mapa para cada uma das épocas estudadas.

Após a finalização do mapeamento foram quantificadas as áreas e realizou-se a avaliação da expansão urbana do município, verificando-se os vetores de expansão e as principais alterações ocorridas ao longo dos últimos anos.

A segunda etapa consistiu da caracterização da vulnerabilidade dos aquíferos. Para isso, primeiramente realizou-se uma vasta pesquisa bibliográfica visando reunir as informações necessárias à elaboração dos mapas de cada um dos parâmetros do índice DRASTIC.

O índice é calculado com base no somatório dos produtos dos valores relativos pelos pesos de cada um dos sete parâmetros hidrogeológicos utilizados, conforme apresentado na Equação 1.

$$\text{Índice DRASTIC} = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw \quad (1)$$

Onde:

D = profundidade da zona não-saturada

R = recarga do aquífero

A = material do aquífero

S = tipo de solo

T = topografia

I = material da zona não-saturada

C = condutividade hidráulica

Os valores “r” relacionam-se com as condições locais de cada parâmetro, variando entre 1 e 10, sendo que, quanto maior o valor, maior a vulnerabilidade. Os valores “w” correspondem à importância relativa de cada fator na quantificação da vulnerabilidade do aquífero, podendo variar entre 1 e 5.

Para a produção dos mapas de cada parâmetro, foram compilados os mapas de geologia, solos, altimetria e rede hidrográfica do município; e elaborado um mapa de pluviosidade, com base em informações de três estações climatológicas distribuídas na região. Além dessas informações, foram obtidas também as características de condutividade hidráulica e calculados os valores de recarga dos aquíferos em estudo.

O parâmetro condutividade hidráulica foi definido levando-se em consideração a diferenciação existente entre o compartimento localizado na planície marinha, as áreas de aluviões e a porção do município localizada sobre os Tabuleiros Litorâneos. Para a planície marinha, estabeleceu-se o valor de condutividade hidráulica de 12,27 m/d, definido por Vieira et al (2003) em estudo realizado no bairro do Bessa, litoral norte de João Pessoa. Já para a região dos Tabuleiros, adotou-se o valor de 2,94 m/d, proposto por Costa et al (2003). Tendo em vista a não identificação de trabalhos de definição da condutividade hidráulica para as áreas de aluvião do município e levando-se em consideração que o valor da condutividade para a Planície Marinha ficou bastante próximo ao limite inferior de uma das classes de vulnerabilidade, optou-se por enquadrar às áreas de aluvião em uma classe intermediária entre as Planícies Marinhas e os

Tabuleiros.

As Tabelas de 1 a 7 apresentam os valores dos pesos e índices definidos nesta pesquisa para cada um dos parâmetros utilizados no modelo DRASTIC.

Tab. 1 – Peso e índices relativos para o parâmetro D

Profundidade da zona não-saturada		
Intervalo (m)	Índice	DrDw
Peso = 5		
< 1,5	10	50
4,6 – 9,1	7	35
9,1 – 15,2	5	25
15,2 – 22,9	3	15
22,9 – 30,5	2	10
> 30,5	1	5

Tab. 2 – Peso e índices para o parâmetro R

RECARGA DO AQUÍFERO		
Intervalo (mm/ ano)	Índice	RrRw
Peso = 4		
102 - 178	6	24
178 - 254	8	32
> 254	9	36

Tab. 3 – Peso e índices para o parâmetro A

MATERIAL DO AQUÍFERO		
Tipo	Índice	ArAw
Peso = 3		
Formação Barreiras	6	18
Planície Marinha e aluviões	8	24

Tab. 4 – Peso e índices para o parâmetro S

SOLO		
Constituição	Índice	SrSw
Peso = 2		
Argissolos	3	6
Neossolos flúvicos	5	10
Latossolos	8	16
Neossolos quartzarênicos	10	20

Todos estes dados foram padronizados, armazenados e analisados no SIG e, através da utilização da linguagem LEGAL, do SPRING, foram geradas superfícies contínuas em forma de grade regular para cada um dos sete parâmetros DRASTIC que, em seguida, foram somados, originando a grade numérica do índice. A última etapa foi, então, a

elaboração de um mapa temático baseado na grade numérica do índice, utilizando-se a ferramenta “Fatiamento” do SPRING, onde foram estabelecidos os intervalos das classes de vulnerabilidade e gerado o mapa temático da vulnerabilidade dos aquíferos livres superiores no município de João Pessoa.

Tab. 5 – Peso e índices para o parâmetro T

TOPOGRAFIA		
Intervalo (percentual de declividade)	Índices	Tr Tw
Peso = 1		
< 2	10	10
2-6	9	9
6-12	5	5
12-18	3	3
> 18	1	1

Tab. 6 – Peso e índices para o parâmetro I

MATERIAL DA ZONA VADOSA		
Constituição	Índice	IrIw
Peso = 5		
Formação Barreiras	6	30
Planície Fluvial (aluvião)	8	40
Planície Marinha	10	50

Tab. 7 – Peso e índices para o parâmetro C

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA		
Intervalo (m/d)	Índice	CrCw
Peso = 3		
< 4,1	1	3
4,1 – 12,2	2	6
12,2 – 28,5	4	12

Os detalhes sobre a produção dos mapas de vulnerabilidade podem ser observados na pesquisa realizada por Meneses (2007), onde pode-se verificar cada um dos mapas dos parâmetros DRASTIC, juntamente com os mapas base utilizados para produzi-los.

A última etapa executada nesta pesquisa foi a realização da sobreposição dos mapas das áreas urbanas ao de vulnerabilidade e a utilização da operação de tabulação cruzada para quantificar o avanço da urbanização sobre as áreas mais vulneráveis dos aquíferos.

4. RESULTADOS

Através dos procedimentos apresentados,

foram gerados três mapas temáticos indicativos das áreas urbanas do município nos anos de 1990, 2001 e 2006, estando os mesmos representados na Figura 4

que corresponde à síntese da evolução urbana no período estudado.

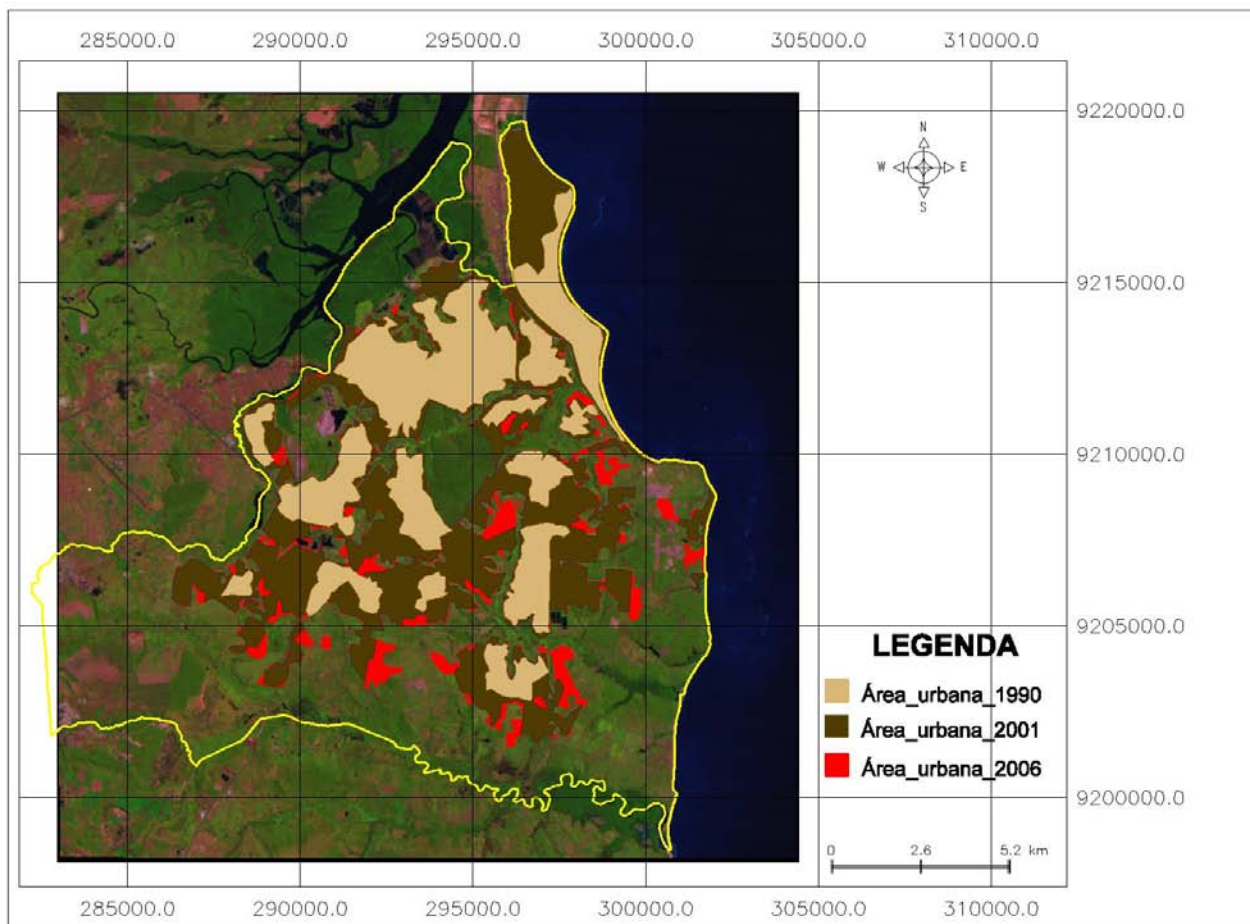


Fig. 4 – Evolução da área urbana de João Pessoa entre 1990 e 2006.

Com base na análise do mapa, verifica-se uma intensa alteração na cobertura da terra, devido a uma expressiva expansão urbana sofrida no município durante o intervalo temporal estudado. A Tabela 8

apresenta esta evolução através da comparação da área urbana ao longo dos anos estudados e o percentual em relação à área total do município.

Tab. 8 – Evolução das áreas urbanas do município de João Pessoa.

Ano	Área Urbana (km ²)	Percentual do Município (%)
1990	36,887198	17,48
2001	79,783030	37,81
2006	86,782942	41,13

Percebe-se que entre os anos de 1990 e 2001, a taxa de crescimento da área urbana foi de 1,85% ao ano, aproximadamente, enquanto que entre 2001 e 2006 esta taxa ficou em torno de 0,66% ao ano. Salienta-se que tais valores dizem respeito à comparação entre as datas estudadas, podendo ter ocorrido flutuações dentro dos intervalos.

Pode-se explicar esta diferença pelo fato de que, no primeiro período (1990-2001) o crescimento foi mais espalhado, ocorrendo uma maior ocupação das áreas livres no município (Figura 5). Neste caso, os principais vetores de expansão se concentraram no

litoral norte do município (Figura 6) e no setor centro-sul (Figura 7), tendo ocorrido a substituição de áreas de solo exposto e de vegetação por áreas edificadas.

Já no período entre 2001 e 2006 (Figura 8), percebe-se que a ocupação das áreas livres teve seu ritmo reduzido (expansão urbana), não significando, entretanto, que a evolução do setor imobiliário tenha seguido esta tendência. Ocorre que nos últimos anos tem-se observado uma tendência da substituição do padrão horizontal das edificações (casas) por um padrão de verticalização (edifícios), em especial na região litorânea e na Zona Sul do município devido,

especialmente, à excessiva valorização do solo urbano

nestes setores.

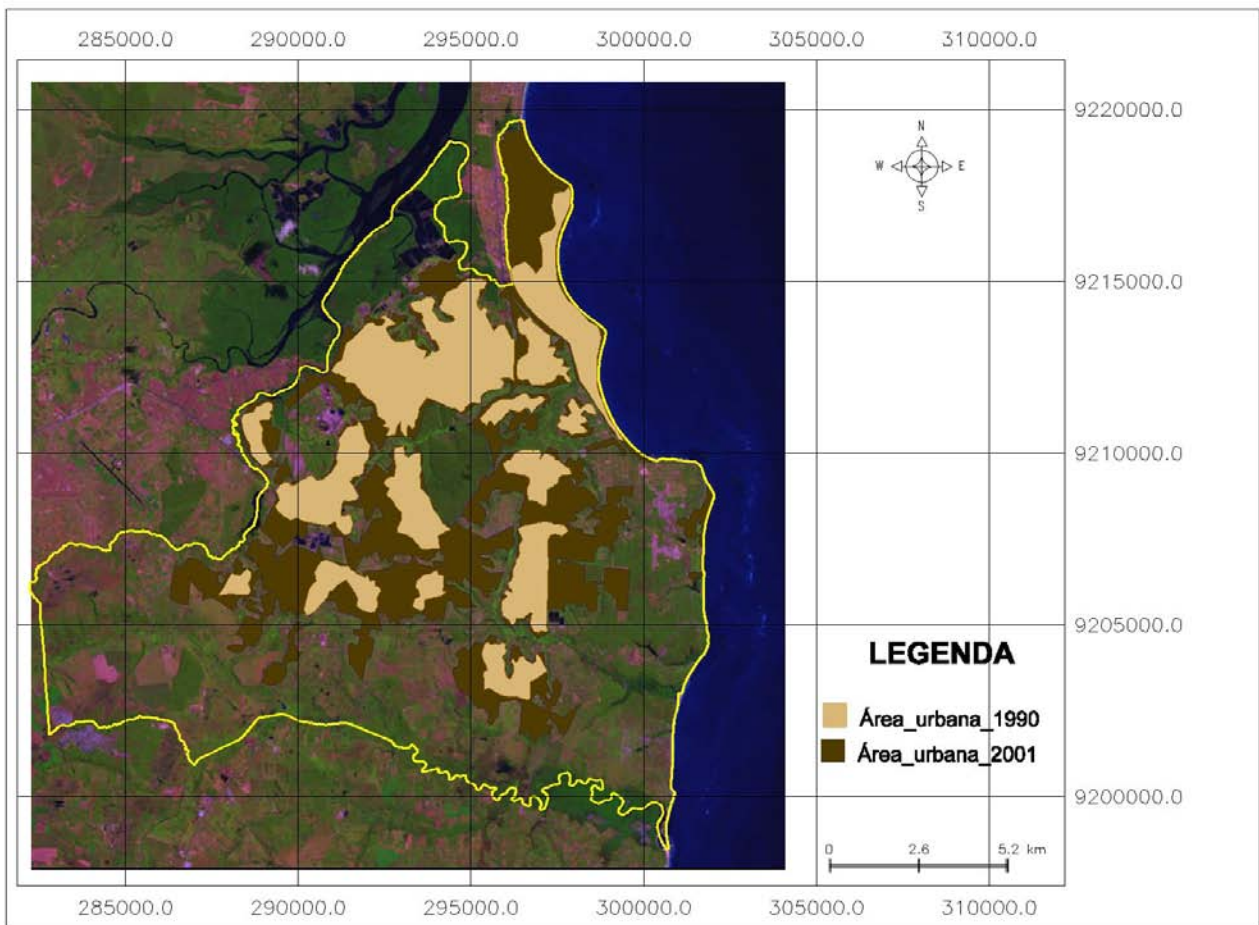


Fig. 5 – Evolução da área urbana de João Pessoa entre 1990 e 2001.

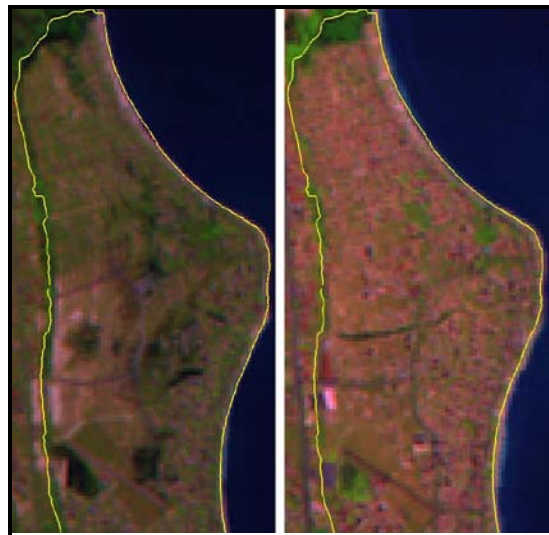


Fig. 6 – Evolução urbana entre os anos de 1990 (esquerda) e 2001 (direita) nos bairros do litoral norte.



Fig. 7 – Evolução urbana entre os anos de 1990 (esquerda) e 2001 (direita) nos bairros do setor centro-sul do município.

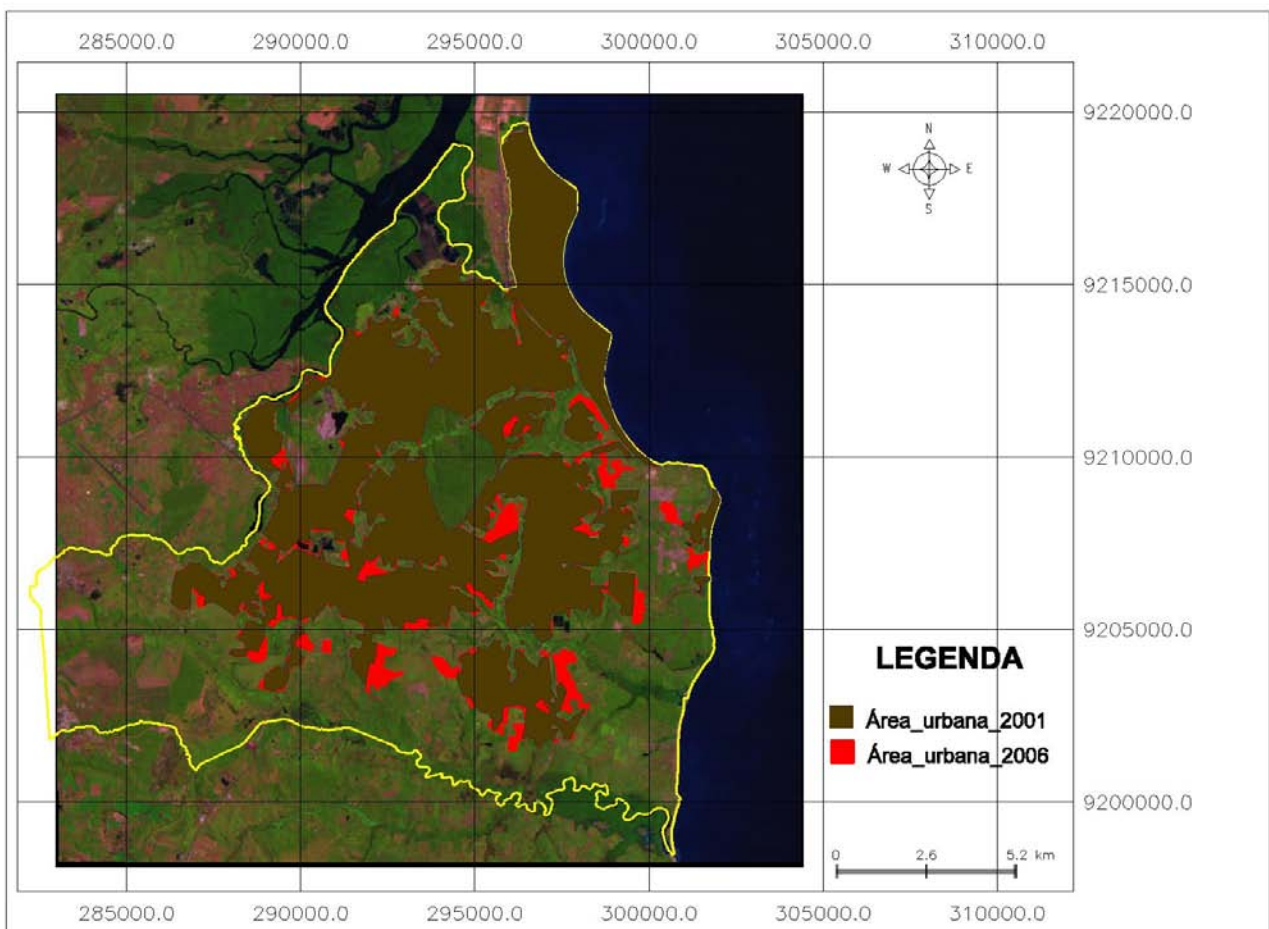


Fig. 8 – Evolução da área urbana de João Pessoa entre 2001 e 2006.

Esta tendência pode ser observada nos resultados do trabalho desenvolvido por Aranha *et al.* (2008) para o bairro de Tambaú, localizado na região litorânea de João Pessoa. Neste trabalho foi analisada a evolução temporal da verticalização no referido bairro entre os anos de 1998 e 2008, tendo-se verificado que a quantidade de edifícios na área aumentou em 66,37% na última década. A figura 9 apresenta o mapa gerado na citada pesquisa e que indica a evolução espacial da verticalização no bairro pesquisado.

O ritmo acelerado de urbanização do município dificulta o planejamento do uso da terra, influenciando a ocupação de áreas inadequadas para tal e a incompatibilidade de usos. Juntamente com a expansão urbana ocorre também a concentração populacional e, conseqüentemente, uma maior demanda por serviços como abastecimento de água e saneamento básico.

No caso do abastecimento de água a solução adotada por grande parte dos novos edifícios e

condomínios horizontais é a perfuração de poços o que, associado à vulnerabilidade natural do ambiente, potencializa o risco da ocorrência de contaminação dos

aquíferos, podendo inviabilizá-los como fonte de água para abastecimento humano.



Fig. 9 – Evolução do processo de verticalização das edificações do bairro de Tambaú, litoral do município de João Pessoa/ PB (Fonte: Aranha *et al.*, 2008).

Além do risco à contaminação por águas servidas das residências e estabelecimentos comerciais, pode ocorrer ainda a intrusão salina no aquífero devido à uma eventual extração excessiva.

Com base no mapa de vulnerabilidade produzido, pode-se compartimentar o município de João Pessoa em três setores básicos: áreas planas de cotas baixas (entre zero e 5 metros, aproximadamente), representadas pela Planície Marinha, pelas áreas de aluviões e pelos mangues; áreas planas de cotas mais elevadas (entre 20 e 70 metros, aproximadamente), localizadas na Superfície dos Tabuleiros Litorâneos; e áreas de encostas, representando a interface entre as áreas baixas e as elevadas. As áreas de mangue e onde ocorrem afloramentos de rochas calcárias foram excluídas do cálculo geral das classes de vulnerabilidade do município, uma vez que neles não há disponibilidade hídrica que justifique sua exploração.

O índice DRASTIC para o município variou entre 76 e 223 e foi dividido em quatro classes de vulnerabilidade, variando de baixa a muito elevada, conforme se apresenta na Tabela 2.

Observou-se que predominam, no município, as classes de vulnerabilidade baixa e moderada (Tabela 3) devido à influência da Superfície dos Tabuleiros, que se apresenta como um compartimento quase que

homogêneo em relação à variáveis como tipo de solo, litologia e declividade. A síntese dos mapas individuais elaborados apresenta-se na forma de um novo mapa temático, apresentado na figura 10.

Tab. 2 - Classes de vulnerabilidade e índices DRASTIC para João Pessoa.

Vulnerabilidade	Índice DRASTIC
Muito Elevada	184 – 223
Elevada	148 – 184
Moderada	112 – 148
Baixa	76 – 112

Tab. 3 - Áreas do município por classe de vulnerabilidade.

Classe	Área (km ²)	Percentual (%)
Muito Elevada	12,28	5,89
Elevada	18,08	8,67
Moderada	68,30	32,75
Baixa	89,09	42,72
Mangue	14,86	7,12
Fm Gramame	5,94	2,85
Total	208,55	100,00

As áreas mais vulneráveis são aquelas onde predominam condições de forte infiltração devido,

principalmente, à textura dos solos que, sendo mais arenosos, apresentam maior quantidade de vazios. Estas áreas localizam-se quase que totalmente na Planície Marinha e nas aluviões às margens dos cursos d'água.

Outra característica definidora das áreas de maior vulnerabilidade é a proximidade do nível freático em relação à superfície do terreno, o que torna o aquífero altamente propício à contaminação.

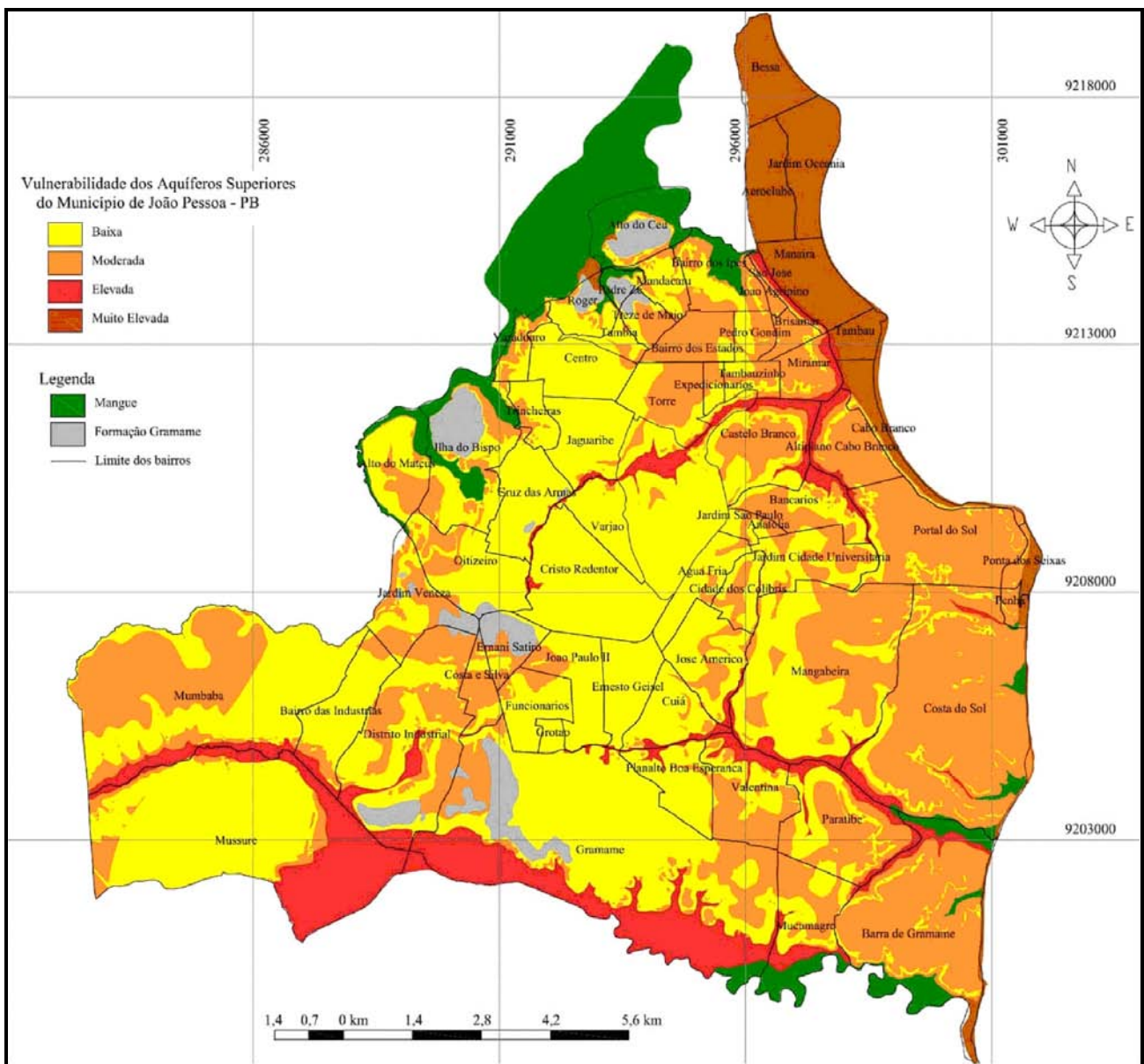


Fig. 10 - Vulnerabilidade dos aquíferos superiores no município de João Pessoa, baseado no modelo DRASTIC (Fonte: Meneses, 2007).

As áreas menos vulneráveis, por sua vez, distribuem-se nas encostas, fato este devido especialmente ao fator declividade do terreno, que propicia um maior escoamento superficial, em detrimento da infiltração das águas de chuva, dificultando a percolação de elementos contaminantes.

A vulnerabilidade menos acentuada nas áreas tabulares pode ser justificada pelo fato da profundidade da zona não-saturada nesta região ser bem mais expressiva do que no restante do município. Levando-se em consideração que o peso deste parâmetro é elevado, a pontuação final atribuída à vulnerabilidade das áreas mais altas, com nível do aquífero mais

profundo, será bem menor que nas áreas onde o aquífero está próximo à superfície, como é o caso das áreas de planície.

Realizando-se o cruzamento dos mapas da evolução urbana e do mapa de vulnerabilidade dos aquíferos superiores do município, pode-se verificar o nível de pressão que este elemento vem sofrendo. A figura 10 apresenta a sobreposição dos mapas das áreas urbanas nos anos de 1990 e de 2006 ao mapa de vulnerabilidade elaborado por Meneses (2007).

A Tabela 4 apresenta o resultado da tabulação cruzada realizada entre os mapas de vulnerabilidade e de áreas urbanas de 1990 e 2006, e representa a relação

entre a quantidade de área urbana por índice de vulnerabilidade, ao tempo em que apresenta a evolução

percentual da área urbana sobre cada classe.

Tab. 4 – Quantificação da evolução das áreas urbanas entre 1990 e 2006 em relação aos níveis de vulnerabilidade.

Índice de vulnerabilidade	Área urbana em 1990 (km ²)	Área urbana em 2006 (km ²)	Evolução % da área urbanizada
Baixa	19,7651	43,3178	219,16
Moderada	11,8048	29,6213	250,92
Elevada	0,0483	0,4731	979,50
Muito Elevada	4,8845	10,7428	219,93

Verifica-se pela análise da Tabela 4 que houve um crescimento expressivo sobre todas as classes, entretanto, na classe de vulnerabilidade elevada esse crescimento foi o mais representativo, alcançando o patamar de quase 980% de ocupação por área urbana. Neste caso, cabe salientar que, a área ocupada em 2006 sobre esta classe é relativamente pequena se comparada com o total do município e a expressiva expansão percentual se deve à pequena área ocupada inicialmente sobre a classe.

Outra informação interessante sobre as áreas de vulnerabilidade elevada é que elas se concentram basicamente nos fundos de vales, constituindo-se de áreas de mais difícil ocupação por atividades urbanas.

A distribuição espacial destas áreas no município também contribuiu para uma ocupação ainda pequena, haja vista que grande parte dessa área se concentra na região sul do município, onde ainda predominam as atividades rurais.

O avanço sobre as áreas de vulnerabilidade muito elevada também é bastante representativo, tendo dobrado no intervalo de 16 anos. Tal fato é bastante alarmante, uma vez que, analisando-se a figura 11, percebe-se que a expansão urbana ocorrida no período estudado englobou praticamente 100% da área de vulnerabilidade muito elevada, restando, no município, apenas cerca de 1,54 km² dessa classe sem ocupação urbana.

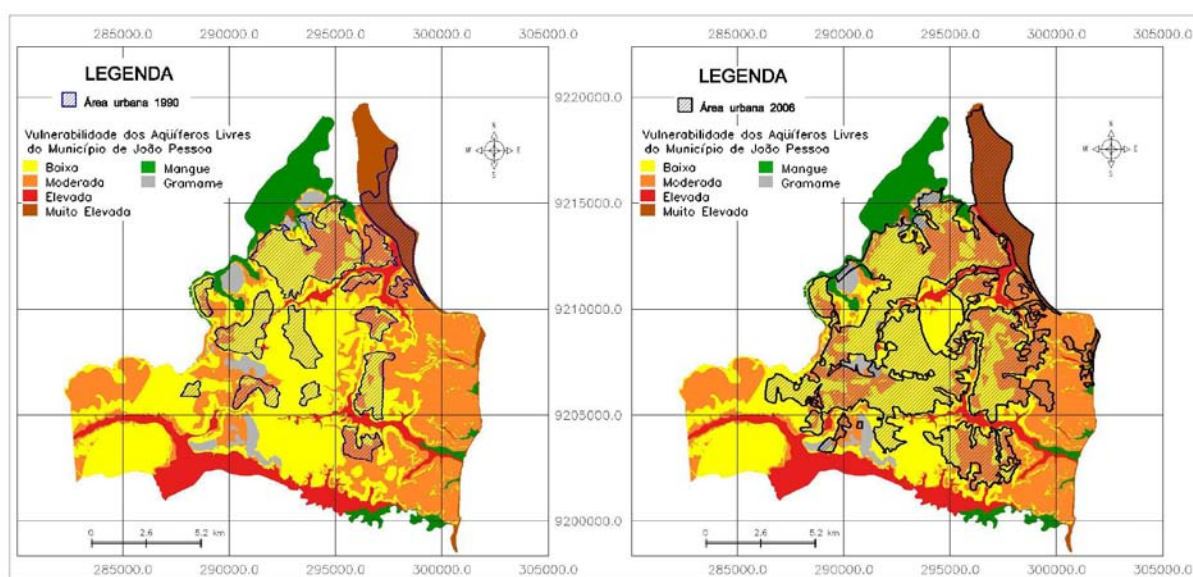


Fig. 11 – Comparação entre evolução urbana e vulnerabilidade dos aquíferos superiores (Adaptado de Meneses, 2007).

Ainda que o somatório das áreas urbanas sobre vulnerabilidade elevada e muito elevada, corresponda a apenas 13% do total de área urbana, deve-se considerar que nestes setores a ocupação deveria ser mais restritiva, o que não vem ocorrendo, como fica explícito nos dados da Tabela 4.

Todos esses elementos apenas comprovam o total desequilíbrio entre a conservação dos recursos naturais e o avanço urbano no município, podendo representar graves riscos à manutenção da qualidade ambiental local e regional.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se que a expansão urbana no município de João Pessoa tem se dado sem uma integração com estudos que envolvam a avaliação de variáveis como vulnerabilidades naturais e capacidade de suporte do meio.

As áreas de vulnerabilidade elevada e muito elevada dos aquíferos superiores foram alvo de expressiva ocupação urbana nas duas últimas décadas. Uma questão preocupante no caso das áreas onde a vulnerabilidade é maior é que estas coincidem, em sua

maioria, com as áreas que nos últimos anos vem sendo alvo da expansão imobiliária e da verticalização, o que ocasiona uma maior demanda por serviços como abastecimento de água e saneamento básico, uma vez que a concentração populacional se acentua.

Como a demanda cresce em maior proporção do que a velocidade com que as concessionárias de serviços públicos as atende, a população busca, por meios próprios, alternativas para suprir tais necessidades. No caso do abastecimento de água, a solução adotada na maioria das vezes é a perfuração de poços e a solução para saneamento quase sempre é o uso de sistemas de fossa e sumidouro. Ambas as soluções podem ser extremamente prejudiciais às águas subterrâneas quando mal projetadas, pois podem acarretar o transporte de contaminantes para o aquífero, inviabilizando o uso de suas águas para o consumo humano.

A alteração do uso e cobertura da terra implica, em última instância, na alteração de diversos componentes ambientais que, em desequilíbrio, afetam a qualidade ambiental do município, comprometendo a conservação dos recursos naturais.

Entende-se que os órgãos responsáveis pela gestão do uso da terra devem levar em consideração, quando de suas tarefas de planejamento, tais elementos, neste caso em relação aos recursos hídricos subterrâneos, de forma a não comprometê-los como fonte alternativa para uso futuro.

A utilização de técnicas de tratamento digital de imagens e de sensoriamento remoto possibilitou a alteração do contraste das imagens de modo a facilitar a diferenciação dos alvos pesquisados, bem como a caracterização da evolução da área urbana do município.

A substituição do procedimento de classificação digital pela interpretação visual mostrou-se eficiente, especialmente devido à experiência e conhecimento prévio da realidade de campo, que contribuíram positivamente para uma correta interpretação das imagens.

Por fim, almeja-se que os resultados obtidos nesta pesquisa possam ser utilizados pelos gestores do ambiente urbano como ferramenta de planejamento a médio e longo prazo, de modo que possa ser alcançado o ideal do desenvolvimento sustentável.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil através de concessão de bolsa do Fundo Setorial CT-Hidro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLER, L.; LEHR, J. H.; PETTY, R. **DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. U.S. EPA, 1985. Robert S. Kerr Environmental Research

Laboratory, Ada, OK, EPA/600/2-85/0108, 163p.

ARANHA, T. R. B. T.; RAFAEL, R. A.; MENESES, L. F. Análise Temporal do Processo de Verticalização no Bairro de Tambaú - João Pessoa - PB, através de Técnicas de Geoprocessamento. In: Anais do IV Geonordeste, Aracaju, 2008. **Anais...** 2008.

CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, Dordrecht, Holanda, v. 15, n. 6, p. 13-22, 1996.

COSTA, W.D.; SANTOS, M.A.V.; COSTA FILHO, W. D.; CAVALCANTI, D.J. Monitoramento dos Aquíferos Costeiros de Pernambuco na Região do Recife. In: CABRAL, J.J.S.P.; LOBO FERREIRA, J.P.C.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; e COSTA, W.D.. (Org.). **Água subterrânea: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2003, v. , p. 365-392.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, 1992. 170p.

FEITOSA, F. A. C. MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, 1997. 387p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades@. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso realizado em 06 de novembro de 2008.

KOHNKE, M. W. Vulnerabilidade de aquíferos. In: ABAS Informa – Boletim Informativo da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, n. 126, 2002. Disponível em: <<http://www.abas.org.br/abasinforma/126/>>. Acesso realizado em 17 de novembro de 2007.

LA VIERI, J.R.; LA VIERI, M. B. F. Evolução Urbana de João Pessoa Pós-60. In: GONÇALVES, R.C.; LA VIERI, M. B. F.; LA VIERI, J.R.; RABAY, G. A **Questão Urbana na Paraíba**. João Pessoa: Editora da UFPB, 1999. p. 39-65.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2006. 881p.

LOBO FERREIRA, J. P. C. Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 4, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 1998.

LOBO FERREIRA, J. P. C.; CABRAL, M. Proposal for an operational definition of vulnerability for the

European Community's atlas of groundwater resources. In: Meeting of the European Institute for Water. **Anais...** Bruxelas: Groundwater Work Group, 1991.

MENESES, L. F. **Avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos superiores no município de João Pessoa/PB, através do modelo DRASTIC.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana/Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2007. 85p.

PACHÊCO, A. P.; RIBAS, N. S. Sensoriamento Remoto Aplicado ao Uso da Terra. *Geodésica online*, v. 4, n. 1, p. 34-48, 1998.

PARAÍBA. Secretaria da Educação. **Atlas geográfico da Paraíba.** João Pessoa: Grafset, 1985.

PREFEITURA MUNICIPAL DE JOÃO PESSOA. Disponível em: <<http://www.joaopessoa.pb.gov.br>>. Acesso realizado em 25 de outubro de 2008.

SOARES FILHO, B. S. **Interpretação de Imagens da Terra.** Apostila do Curso de Especialização em Geoprocessamento. Belo Horizonte: UFMG, 2000.

TUCCI, C. E. M.; CABRAL, J. J. S. P. **Qualidade da água subterrânea.** Porto Alegre: IPH/UFRGS; Recife: CT/UFPE, 2003. 53 p.

TUMA, L.S.R. **Mapeamento geotécnico da Grande João Pessoa - PB.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

VIEIRA, L.J.S.; BARBOSA, J.M.S.G; RÊGO, J.C.; ALBUQUERQUE, J.P.T. Influência do aquífero freático sobre a drenagem superficial Estudo de caso. In: **XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2003.