

**MODELAGEM DA EXPANSÃO URBANA FUTURA COMO
SUPORTE AO PLANEJAMENTO E AO ORDENAMENTO
TERRITORIAL PARA A CIDADE JOÃO PESSOA – PB**

Por

Paula Isabella De Oliveira Rocha

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2023

**MODELAGEM DA EXPANSÃO URBANA FUTURA COMO
SUPORTE AO PLANEJAMENTO E AO ORDENAMENTO
TERRITORIAL PARA A CIDADE JOÃO PESSOA – PB**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Paula Isabella De Oliveira Rocha

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2023

**Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

R672m Rocha, Paula Isabella de Oliveira.

Modelagem da expansão urbana futura como suporte ao planejamento e ao ordenamento territorial para a cidade João Pessoa - PB / Paula Isabella de Oliveira Rocha. - João Pessoa, 2023.

80 f. : il.

Orientação: Richarde Marques da Silva.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Planejamento urbano. 2. Índices espetrais. 3. Crescimento urbano. 4. Engenharia civil. I. Silva, Richarde Marques da. II. Título.

UFPB/BC

CDU 711.4(043)

**"MODELAGEM DA EXPANSÃO URBANA FUTURA COMO SUPORTE AO
PLANEJAMENTO E AO ORDENAMENTO TERRITORIAL PARA A CIDADE JOÃO PESSOA –
PB"**

PAULA ISABELLA DE OLIVEIRA ROCHA
Dissertação aprovada em 27 de fevereiro de 2023.

Período Letivo: 2022.2



Prof. Dr. Richard Marques da Silva – UFPB
Orientador



Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho – UFPB
Examinador Interno



Profa. Dra. Rochele Sheila Vasconcelos – UESC
Examinadora Externa

Dedico este trabalho a todos os meus predecessores cujo conhecimento guiou a construção deste;

E a todos meus sucessores cuja contribuição apenas enriquecerá o mesmo.

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, com que se sintam humildes.” Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. Richarde Marques da Silva, pelo aconselhamento, pela paciência, pelo engrandecimento, pela compreensão e pelo estímulo que me forneceu no processo de realização desta pesquisa, e principalmente, pela seriedade e pelo comprometimento que investe no papel de educador.

Aos meus pais amorosos, Vera Solange de Oliveira Farias e Vicente de Paula Teixeira Rocha, exemplos de caráter e esforço, eternos estudiosos, e de quem a ajuda foi indispensável para a conclusão desta pesquisa.

Aos meus irmãos, Aline Maria de Oliveira Rocha e Caio Arlindo de Oliveira Rocha, e aos demais parentes das famílias Oliveira Farias e Teixeira Rocha, pela vida compartilhada e pelo apoio prestado.

Aos amigos que direta ou indiretamente me ajudaram nesta jornada, sempre se fazendo presente para ouvir desabafos e dar conselhos. Em especial, às meninas que estão comigo desde o colégio, Aninha, Ariadne, Bel, Lara e Malu, e aos amigos do UMDSU e agregados, Luiza, Pedrão, Felipe, Malu, Pedro Henrique, Nara, Bomba, Camila, Naka, Juliano, Agatha, Lewis, Deco, ao pessoal do Nô Comum, e tantos outros.

Ao professor Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes, atual coordenador do PPGECAM, e à professora Dra. Solange Maria Leder, ex-coordenadora do PPGECAM, cujas gestões marcaram minha passagem pelo mestrado, pelo constante empenho em garantir a evolução do programa e em defender os interesses de seus alunos.

A todos os meus mestres e professores, de colégio, da graduação, e da pós-graduação, cujo ensinamento me formou e me trouxe até aqui.

À Universidade Federal da Paraíba, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECAM, pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

À ex-Presidenta Dilma Rousseff e ao Conselho Nacional de Conhecimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela oportunidade de realização de intercâmbio pelo programa Ciência sem Fronteiras, que não só me ajudou a expandir horizontes, mas também me despertou o interesse pela área de desenvolvimento urbano.

Ainda ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo analisar o crescimento urbano no município de João Pessoa a partir da década de 1990, e estimar cenários futuros de sua expansão para os anos de 2030, 2035 e 2040. A metodologia foi realizada em duas etapas. A primeira etapa consistiu na análise das mudanças da expansão urbana baseada nos índices *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI), processados na plataforma *Google Earth Engine*. Para o cálculo desses dois índices, foram usadas imagens dos satélites Landsat 5, 7 e 8 dos anos 1990, 1992, 2000, 2001, 2006, 2010 e 2016, disponíveis na plataforma USGS GloVis. A segunda etapa consistiu na classificação do uso e ocupação do solo e na modelagem futura da expansão urbana usando o software *Land Change Modeler* (LCM). Para essa etapa foram escolhidas três das imagens mais recentes (2001 (t_1), 2006 (t_2) e 2018 (t_3)). A classificação do uso e ocupação do solo foi realizada usando o método supervisionado de máxima verossimilhança. Utilizou-se as imagens dos anos t_1 e t_2 para identificar os padrões de mudança de cobertura do solo, e assim gerar o potencial de transição entre essas coberturas. Em seguida, realizou-se a estimativa da cobertura do solo no período t_3 , e posteriormente a validação e calibração do modelo produzido. Após essa etapa foi possível estimar o uso e ocupação do solo do município de João Pessoa para os anos de 2030, 2035 e 2040. Os resultados obtidos apontam para um aumento de 445% de área construída entre os anos de 1990 e 2016. Além disso, observou-se que as parcelas de área indicativas de vegetação, tanto as de vigor vegetativo médio como as densas e de alto vigor sofreram diminuição, indicando degradação ambiental em detrimento do crescimento urbano. A comparação entre o crescimento urbano identificado e a lei de macrozoneamento do município indicou eficácia satisfatória dos instrumentos de planejamento urbano. Pode-se concluir que o processo de modelagem de cenários futuros apresentou duas tendências: (a) a primeira tendência considerou maior potencial de transição nas áreas limítrofes entre uma classe de cobertura do solo e outra, concentrando o crescimento próximo ao centro urbano, desconsiderando o surgimento de aglomerados urbanos em áreas mais periféricas, e (b) a segunda tendência revelou um crescimento urbano mais acelerado do que de fato ocorreu, resultando no esgotamento de áreas de vegetação passíveis de transição antes do ano 2040.

PALAVRAS-CHAVE: Planejamento urbano; índices espectrais; modelo LCM; NDVI; NDBI; crescimento urbano.

ABSTRACT

This research aims to analyze urban growth from the 1990s onwards and estimate future expansion scenarios for the years 2030, 2035 and 2040, in the municipality of João Pessoa-PB. The methodology was carried out in two stages. The first stage consisted of analyzing changes in urban expansion based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Built-up Index (NDBI), processed on the Google Earth Engine platform. To calculate these two indices, images from the Landsat 5, 7 and 8 satellites from the years 1990, 1992, 2000, 2001, 2006, 2010 and 2016, available on the USGS GloVis platform, were used. The second stage consisted of the classification of land use and land cover of the city, and the modeling of future urban expansion using the Land Change Modeler (LCM) software. For this stage, three of the most recent images were chosen (2001 (t_1), 2006 (t_2) and 2018 (t_3)). The classification of land use and land cover was carried out using the supervised method of maximum likelihood. Images from years t_1 and t_2 were used to identify patterns of land cover change, and thus generate the transition potential between these covers. Then, the land cover was estimated in the period t_3 , followed by the validation and calibration of the model produced. After this step, it was possible to estimate the land use and land cover in the municipality of João Pessoa for the years 2030, 2035 and 2040. The results pointed to an increase of 445% in the built-up area between the years 1990 and 2016. Also, it was observed that the plots of area indicative of vegetation, both those with medium and high vegetative vigor, suffered a decrease, indicating environmental degradation to the detriment of urban growth. The comparison between the identified urban growth and the municipality's macrozoning law indicated satisfactory effectiveness of the urban planning instruments. It can be concluded that the process of modeling future scenarios presented two trends: (a) the first trend considered greater transition potential in bordering areas between one land cover class and another, concentrating growth close to the urban center, disregarding the emergence of urban agglomerations in more peripheral areas, and (b) the second trend revealed faster urban growth than actually occurred, resulting in the depletion of areas of vegetation that could be transitioned before the year 2040.

KEYWORDS: Urban planning; spectral indices; LCM model; NDVI; NDBI; urban growth.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	<i>Objetivo Geral:.....</i>	15
1.1.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	EXPANSÃO DA CIDADE E PLANEJAMENTO URBANO	16
2.2	FUNDAMENTOS DO SENSORIAMENTO REMOTO.....	18
2.2.1	<i>Índices espectrais</i>	20
2.3	MODELAGEM DE CENÁRIOS URBANOS	21
3	CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	24
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	24
3.2	PROCESSO DE EXPANSÃO URBANA DA CIDADE DE JOÃO PESSOA ...	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	ANÁLISE DA EVOLUÇÃO HISTÓRICA ENTRE 1990 E 2020 DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	35
4.1.1	<i>Análise e escolha das imagens</i>	35
4.1.2	<i>Cálculo dos índices de vegetação e de área construída.....</i>	37
4.1.3	<i>Cálculo das áreas de vegetação e de área construída</i>	39
4.1.3.1	<i>Cálculo da área construída por macrozona.....</i>	39
4.2	MODELAGEM DE CENÁRIOS FUTUROS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	40
4.2.1	<i>Classificação das imagens</i>	41
4.2.2	<i>Previsão do potencial de transição</i>	42
4.2.2.1	<i>Análise das transições do uso e ocupação do solo entre t₁ e t₂.....</i>	42
4.2.2.2	<i>Definição das transições a serem modeladas.....</i>	43
4.2.2.3	<i>Teste e seleção das variáveis explanatórias</i>	43
4.2.2.4	<i>Modelagem do potencial de transição usando Rede Neural Multi-Layer Perceptron</i>	45
4.2.2.5	<i>Modelagem do potencial de transição usando Regressão Logística.....</i>	46
4.2.3	<i>Simulações e validação do modelo.....</i>	47
4.2.3.1	<i>Cadeias de Markov</i>	48
4.2.3.2	<i>Inclusão de fatores de incentivo ou restrições às mudanças.....</i>	48
4.2.3.3	<i>Validação do modelo de simulação de mudanças do uso e ocupação do solo</i>	49

4.2.3.4	Modelagem de cenários futuros de uso e ocupação do solo.....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1	ANÁLISE DA EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS ÍNDICES ESPECTRAIS ENTRE 1990 E 2016	
		51
5.2	MODELAGEM DE CENÁRIOS FUTUROS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	57
5.2.1	<i>Classificação de uso e ocupação do solo para t_1, t_2 e t_3</i>	57
5.2.2	<i>Análise nas mudanças do uso e ocupação do solo entre t_1 e t_2.....</i>	61
5.2.3	<i>Seleção das variáveis explanatórias.....</i>	62
5.2.4	<i>Modelagem do potencial de transição e matriz de probabilidade de transição em t_3 (2018)</i>	65
5.2.5	<i>Simulação e validação do uso e ocupação do solo em t_3 (2018)</i>	66
5.2.6	<i>Simulação de cenários de uso e ocupação do solo para 2030, 2040 e 2050..</i>	69
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
	REFERÊNCIAS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização geográfica da cidade de João Pessoa no estado da Paraíba, e do estado no Brasil.	24
Figura 2 - Macrozoneamento do município de João Pessoa.	26
Figura 3 - Divisão dos bairros do município de João Pessoa.	27
Figura 4 - Imagem Landsat com tamanho e quantidade aceitável de nuvens.	36
Figura 5 - Imagem Landsat com tamanho inaceitável de nuvens.	36
Figura 6 - Imagem Landsat com quantidade inaceitável de nuvens.....	37
Figura 7 - Fluxograma da metodologia utilizada no processo de modelagem de uso e ocupação do solo para o município de João Pessoa	41
Figura 8 - Evolução histórica do uso e ocupação do solo no município de João Pessoa por índice espectral entre 1990 e 2016	52
Figura 9 - Mapa da evolução da área construída na cidade de João Pessoa.....	55
Figura 10 - Evolução da área construída por macrozona entre 1990 e 2016	56
Figura 11 - Mapa de cobertura do solo para o município de João Pessoa em 2001.....	58
Figura 12 - Mapa de cobertura do solo para o município de João Pessoa em 2006.....	59
Figura 13 - Mapa de cobertura do solo para o município de João Pessoa em 2018.....	60
Figura 14 - Ganhos e perdas na cobertura do solo entre 2001 e 2006 para o município de João Pessoa.....	61
Figura 15 - Mapa de mudanças de classe de cobertura do solo entre 2001 e 2006.....	62
Figura 16 - Potencial de transição da cobertura do solo usando os métodos (a) RNMLP e (b) RL	65
Figura 17 - Mapa de simulação da cobertura do solo em 2018 pelos métodos a) RNMLP e b) RL (Fonte: Autoria própria)	67
Figura 18 - Validação da cobertura do solo simulado para 2018 pelos métodos (a) RNMLP e (b) RL.....	68
Figura 19 - Simulação de cobertura do solo pelo método RNMLP para os anos (a) 2030, (b) 2035, e (c) 2040	70
Figura 20 - Simulação de cobertura do solo pelo método RL para os anos (a) 2030, (b) 2035, e (c) 2040.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Causas do crescimento urbano	16
Tabela 2 - População e domicílio da zona sul de João Pessoa.	28
Tabela 3 - População e domicílio da zona leste de João Pessoa.....	29
Tabela 4 - População e domicílio da zona oeste de João Pessoa.....	29
Tabela 5 - População e domicílio da zona norte de João Pessoa.....	30
Tabela 6 - Data e origem das imagens adotadas.....	35
Tabela 7 – Áreas de vegetação e construídas estimadas para a cidade de João Pessoa.	51
Tabela 8 - Área construída estimada por zonas para a cidade de João Pessoa.....	56
Tabela 9 - Cobertura do solo para a cidade de João Pessoa em t_1 , t_2 e t_3	60
Tabela 10 - Resultados do teste de V de Cramer para as variáveis explanatórias.....	63
Tabela 11 - Resultados de taxa de acurácia pelo método RNMLP para os modelos estudados (simplificado).....	64
Tabela 12 - Matriz de probabilidade de transição da cobertura do solo de t_2 para t_3	66
Tabela 13 - Resultados obtidos na validação dos modelos.	67
Tabela 14 - Cobertura do solo simulado para a cidade de João Pessoa em 2018.....	68

1 INTRODUÇÃO

A organização espacial exprime as complexas configurações sociais, assim como as desigualdades sócioterritoriais. Do ponto de vista da gestão urbana, significa considerar o território como uma unidade de planejamento e avaliação das políticas públicas, sendo base para organização dos serviços, programas, projetos e benefícios (SPOSATI *et al.*, 2009). A análise histórica das mudanças na cobertura do solo urbano e a modelagem futura de cenários urbanos são importantes ferramentas de subsídio ao planejamento urbano e o ordenamento territorial. Assim, o planejamento urbano e o ordenamento territorial se fazem necessários para o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e com maior capacidade de atender às necessidades de seus habitantes. Na inexistência de um planejamento urbano eficaz, o crescimento das cidades pode ocorrer de forma acelerada e/ou desordenada, podendo resultar em efeitos prejudiciais para a sociedade e para o meio ambiente.

A análise histórica das mudanças do uso e ocupação do solo em ambiente urbano permite a investigação dos efeitos da urbanização sobre o ambiente natural e sobre o bem-estar da sociedade de diversas maneiras e sob a ótica de várias perspectivas. É possível avaliar o avanço das áreas construídas sobre os ecossistemas, bem como suas consequências; mensurar se a implantação de infraestrutura e equipamentos urbanos é proporcional ao crescimento da área construída; observar se a quantidade, o tamanho e a disposição de áreas arborizadas, parques e outros espaços públicos são adequados para o atendimento da população; entre outros (BONAMENTE e SOUZA, 2012; BHATTA, 2014; NAGENDRA *et al.*, 2013).

As alterações no uso e ocupação do solo podem trazer efeitos indesejados também no microclima urbano. As áreas verdes nesses espaços são responsáveis por promover resfriamento na escala local, enquanto o aumento de áreas construídas causa a emissão de uma maior quantidade de calor, além de impor barreiras à circulação do vento (FROTA e SCHIFFER, 2001). Portanto, a diminuição de áreas verdes e o crescimento da área construída resultam na amplificação do desconforto térmico na escala urbana.

Uma opção para mitigar os efeitos negativos do crescimento urbano é predizer de que forma este irá ocorrer, de tal modo que se possam aplicar ações preventivas. Assim, a modelagem futura de cenários urbanos se torna uma importante ferramenta de subsídio ao planejamento urbano e ao ordenamento territorial.

Atualmente, existem diversas técnicas consolidadas de modelagem urbana, dentre elas, as mais utilizadas empregam o uso de modelos de autômatos celulares (FURTADO e van DELDEN, 2011; ROSSETTI, 2011; ROCHA, 2012; PAULA NETO, 2019; SANTOS, 2019; KHAWALDAH, FARHAN, ALZBOUN, 2020; MANSOUR, AL-BELUSHI, AL-AWADHI, 2020; MOHAMED e WORKU, 2020; BARROS, ANDRADE, SOUZA JÚNIOR, 2022; NUGRAHA *et al.*, 2022). Este tipo de estudo é realizado em países do mundo todo, sendo bastante utilizado em países em crescimento, como Bangladesh (SHUBHO e ISLAM, 2020), Jordânia (KHAWALDAH, FARHAN, ALZBOUN, 2020), Índia (BOSE e CHOWDHURY, 2020), Etiópia (MOHAMED e WORKU, 2020), Omã (MANSOUR, AL-BELUSHI, AL-AWADHI, 2020), Egito (BADWI, EL_BARMELGY, EL-DIN OUF, 2022), dentre outros.

No Brasil, a modelagem urbana tem sido realizada para cidades como Feira de Santana-BA, Goiânia-GO, e para a Região Metropolitana de São Paulo (SANTOS, 2019; PAULA NETO, 2019; MASSABKI *et al.*, 2017). Porém, para a cidade de João Pessoa-PB, apesar de já existirem alguns estudos relacionados a alterações e impactos do uso e ocupação do solo (SOBREIRA *et al.*, 2011; SOUZA, 2014; SOUZA *et al.*, 2016; LACERDA *et al.*, 2021), e a identificação de potencialidades e restrições de áreas dedicadas à ocupação urbana (NASCIMENTO, LIMA, SANTOS 2009), ainda não foram realizadas pesquisas destinadas à previsão de cenários futuros de uso e ocupação do solo visando o suporte ao planejamento e ao ordenamento territorial para essa cidade a fim de adequar a qualidade de vida da população frente às mudanças climáticas e ao crescimento urbano.

A cidade de João Pessoa, apesar de não poder ser cientificamente conceituada como uma metrópole, foi classificada com nível alto de integração intra-aglomerado no processo de hierarquização e identificação dos espaços urbanos realizado pelo Observatório das Metrópoles (RIBEIRO *et al.*, 2009). De acordo com Maior e Cândido (2014), os seus bairros apresentam diversificação socioeconômica da população, de forma característica à segregação sócioterritorial, estando a população de nível socioeconômico mais baixo implantada em áreas periféricas ao centro urbano ou sujeitas a riscos ambientais, como desmoronamentos, escorregamentos e enchentes.

Diante do exposto, o presente trabalho se propõe a contribuir para o aumento de informações científicas disponíveis sobre João Pessoa, focando no aspecto da cobertura do solo, a qual é identificável a partir de imagens de satélites. Além disso, se dispõe também a servir como subsídio para a tomada de decisões por parte dos gestores da cidade.

Nesse sentido, esta pesquisa constituiu-se do diagnóstico e caracterização das áreas que vêm sofrendo as consequências da expansão urbana, bem como na proposição de cenários urbanos futuros para a cidade de João Pessoa-PB.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral:

Analisar o crescimento urbano e estimar cenários futuros de expansão para os anos de 2030, 2035 e 2040, no município de João Pessoa-PB.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a evolução da degradação da cobertura vegetal e a expansão da área construída a partir do estudo de mudanças de uso e ocupação do solo para o município de João Pessoa entre 1990 e 2020.
- Verificar a eficácia de instrumentos de planejamento e ordenamento urbano do município de João Pessoa no direcionamento do crescimento da cidade.
- Simular cenários futuros do uso e ocupação do solo para o município de João Pessoa para os anos de 2030, 2035 e 2040.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Expansão da cidade e planejamento urbano

Muito se fala nas consequências da expansão urbana e da urbanização, podendo estas serem positivas ou negativas. Os impactos negativos, porém, são geralmente mais destacados porque, no processo de crescimento urbano desordenado e descontrolado, os impactos negativos superam os positivos (BHATTA, 2010).

Deste modo, Massabki *et al.* (2017) associam a centros urbanos os seguintes efeitos negativos: desconforto térmico, poluição atmosférica e dos recursos hídricos, alteração do ciclo hidrológico, saneamento básico deficiente, frequentes inundações, além de aspectos sociais como falta de atendimento de qualidade nos serviços de educação, saúde, transporte, baixa oferta de emprego e precárias condições de moradia. Assim, o crescimento desordenado das cidades gera danos ao meio ambiente e favorece as desigualdades sociais e econômicas.

O estudo dos fatores de impulsão do crescimento urbano também é interessante, pois a identificação das causas permite um maior controle da velocidade de expansão. Nesse sentido, Bhatta (2010) lista diversas causas do crescimento urbano, algumas delas apresentadas na Tabela 1, que podem resultar em crescimento compacto ou disperso.

Tabela 1 - Causas do crescimento urbano

Causas do crescimento urbano	Crescimento compacto	Crescimento disperso
Crescimento da população	x	x
Independência de decisão		x
Crescimento econômico	x	x
Industrialização	x	x
Especulação		x
Disputas legais		x
Geografia física		x
Custos habitacionais		x
Demanda por moradias espaçosas	x	x
Transporte	x	x
Infraestrutura viária		x
Residências unifamiliares		x
Políticas públicas de desenvolvimento		x
Planejamento ausente ou falho		x
Lotes de ampla dimensão		x

Fonte: Adaptado de Bhatta (2010).

Destaca-se que, em países desenvolvidos, o processo de urbanização é desencadeado principalmente pela industrialização, enquanto, para países em desenvolvimento, é impulsionado também por fatores demográficos, como altas taxas de natalidade e êxodo rural (DERIBEW, 2020).

O crescimento urbano e o processo de urbanização podem ser estudados sob a perspectiva das alterações do uso e da ocupação do solo: à medida que a cidade se expande e novas demandas socioespaciais surgem, parcelas do solo que anteriormente estavam desocupadas ou cobertas por vegetação, por exemplo, passam a atender novos tipos de uso e ocupação.

Ressalta-se a importância de diferenciar os conceitos de uso do solo e de ocupação do solo. Do ponto de vista urbanístico nacional, Ferrari (2004) afirma que o uso do solo é o resultado, num espaço, das diferentes funções que asseguram a realização da vida humana na cidade, cada função ocupando o solo diferentemente. Por outro lado, estudos urbanos internacionais geralmente associam uso do solo à cobertura do solo. Daudze (2004) define a cobertura do solo como sendo “as características físicas ou biofísicas ou o estado da superfície da Terra e de sua subsuperfície [...]”, podendo a cobertura ser natural ou artificial, enquanto o uso do solo é definido como o uso ou gerenciamento intencional, realizado por seres humanos, na cobertura do solo.

Na realização do planejamento urbano, as imposições de regras contidas em Planos Reguladores ordenam o crescimento da cidade, bem como aplicam permissões e restrições no uso e na ocupação do solo. Dentre os dispositivos legais de controle de uso e ocupação do solo, destaca-se o Estatuto da Cidade (BRASIL, 2008), que dispõe sobre os diversos instrumentos políticos de gestão do território urbano. O Estatuto determina que o instrumento básico da política de desenvolvimento e expansão urbana é o Plano Diretor, obrigatório para todas as cidades com mais de vinte mil habitantes, devendo este ser aprovado por lei municipal e revisado a cada dez anos (BRASIL, 2008).

A lei de zoneamento municipal também é um instrumento legal de grande interesse para os planejadores urbanos. De acordo com Braga (2001), esta lei tem duas escalas de aplicabilidade. A primeira escala é o macrozoneamento, que delimita as zonas urbanas, de expansão urbana, rural e macrozonas especiais. A segunda escala é o zoneamento de uso e ocupação do solo urbano, sendo aplicada para cada macrozona urbana, porém sem aplicação para a zona rural. Todavia, esse autor (op. cit.) aponta para as críticas realizadas ao zoneamento urbano, devido a sua ineficácia e a seus efeitos negativos, uma vez que impulsiona processos de segregação socioespacial e especulação imobiliária.

2.2 Fundamentos do sensoriamento remoto

De acordo com Bhatta (2010), o sensoriamento remoto significa observações da terra com sensores colocados acima da sua superfície. Portanto, não há contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto. O autor (*op. cit.*) afirma ainda que, o sensoriamento remoto é uma ferramenta ou técnica que usa sensores sofisticados para medir a quantidade de energia eletromagnética existente num objeto ou área geográfica a partir de certa distância e então, extrair informações valiosas usando algoritmos estatísticos ou matemáticos. Esses sensores são materializados em câmeras ou radares que usam energia artificial ou natural, que captam a resposta espectral dos alvos na superfície terrestre. As imagens de sensoriamento remoto são obtidas em diversos níveis de aquisição quanto ao posicionamento do sensor (terrestre, aéreo e espacial), que usam sensores óptico-eletrônicos. Esses sensores podem coletar imagens de baixa, alta, e altíssimas resoluções espaciais, capazes de captar objetos de pequenas áreas ou de uma região extensa.

Os dados provenientes do sensoriamento remoto são recursos inestimáveis para mapear áreas construídas, pois fornecem uma visão de objetos espaciais na superfície terrestre. Além disso, o sensoriamento remoto orbital pode disponibilizar séries temporais de mapeamento de fenômenos físicos, que ajudam no monitoramento ambiental e no planejamento urbano, bem como na compreensão da expansão urbana ao longo do tempo (XU, 2008; GRIFFITHS *et al.*, 2010).

Nessa perspectiva, a utilização de técnicas do sensoriamento remoto permite a extração de informações do espaço geográfico, e dependendo da resolução espacial da imagem, podem ser obtidos dados com alto grau de detalhamento, no que tange às dimensões ou à resposta espectral dos objetos (vegetação, água, edificações e outras características da cobertura do solo), o que torna possível analisar e monitorar as modificações do uso e ocupação do solo, bem como a expansão urbana (BATHI, 2014).

O sensoriamento remoto permite ainda o mapeamento de elementos da paisagem por meio de cálculos matemáticos usando bandas espectrais das imagens de satélites. Uma grande variedade de informações como casas, apartamentos, indústrias, ruas, rodovias e áreas de lazer intercaladas com espaços vegetais naturais, podem ser obtidos, o que torna o processo de mapeamento e dos objetos espaciais nas imagens muito complexo (GARCIA e PEREZ, 2016).

Várias técnicas vêm sendo formuladas com a finalidade de classificar o uso e ocupação do solo, podendo ser agrupadas em duas categorias genéricas. A primeira baseia-

se na classificação de imagens de entrada que abrangem amplamente métodos de classificação baseados em pixels e objetos (GUINDON, ZHANG, DILLABAUGH, 2004; CLEVE *et al.*, 2008), enquanto o segundo tipo envolve a segmentação direta das imagens através de índices espectrais (ZHA, GAO, NI, 2003; ZHANG *et al.*, 2005; KNIGHT *et al.*, 2006). O processo de classificação de imagens consiste em identificar determinados elementos nela presentes, associando cada um de seus pixels a uma determinada classe preestabelecida (FITZ, 2008; SILVA, 2014). Assim, esta ferramenta de sensoriamento remoto se torna bastante útil no mapeamento do uso e ocupação do solo.

Existem diferentes métodos de classificação de imagens (como análise de imagem baseada em objeto – OBIA, classificação supervisionada, classificação não-supervisionada, redes neurais artificiais, Random Forest, e classificação baseada no conhecimento), e diferentes tipos de classificação de imagens (por pixels e classificação por regiões) (SILVA, 2014). Dentre os métodos de classificação mais usados, pode-se destacar a classificação supervisionada e a classificação não-supervisionada, descritas por Fitz (2008):

- A classificação supervisionada faz uso da capacidade interpretativa do usuário, que deverá determinar parâmetros nos quais a classificação irá se basear. Deste modo, este método demanda que o usuário possua conhecimento prévio da área de trabalho. Na classificação supervisionada, exemplos de métodos que podem ser utilizados são os métodos do paralelepípedo, da distância mínima, da máxima verossimilhança, dentre outros.
- Na classificação não supervisionada, quem estabelece os padrões e parâmetros para a classificação é o próprio software, que utiliza clusters, que são automaticamente identificados pela máquina e classificados a partir de comparações espectrais entre si. É normalmente utilizado quando o usuário não tem conhecimento da área de trabalho, o que gera um grau de incerteza quanto ao produto obtido.

Dentro desse contexto, a utilização de índices espectrais para caracterização do uso da cobertura do solo se torna cada vez mais frequente, devido a sua proposta de identificar determinadas características dos alvos de forma automatizada e precisa.

2.2.1 Índices espectrais

Há uma grande variedade de índices que foram desenvolvidos para a extração de características de interesse das imagens de satélites. Os cálculos desses índices baseiam-se nas propriedades específicas dessas características, em termos de forte absorção ou reflexão em diferentes bandas espectrais de imagens multiespectrais (BHATTI, 2014).

O *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI), ou Índice da Diferença Normalizada de Área Construída (IDNAC), tem como objetivo o mapeamento de áreas urbanas, sendo usado para discriminar áreas construídas de outros objetos, como vegetação, solo exposto e água (ZHA, GAO, NI, 2003). Pode ser calculado como a razão entre a diferença das refletividades das bandas do infravermelho médio e do próximo pela soma dessas refletividades.

O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), ou Índice de Diferença Normalizada de Vegetação (IDNV), foi introduzido por Rouse *et al.* (1973) e vem sendo amplamente empregado para mapear, quantificar e estimar a condição da cobertura vegetal. Pode ser calculado como a razão entre a diferença das refletividades das bandas no infravermelho próximo e do vermelho pela soma dessas refletividades (ROUSE *et al.*, 1973). O *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), que é uma adaptação do NDVI, é utilizado em estudos do comportamento da vegetação onde há uma influência grande do solo (GARCIA e PEREZ, 2016). No entanto, o SAVI possui limitações de uso, pois requer a aplicação de um fator de ajuste que deve ser previamente conhecido.

Os índices de vegetação realçam o comportamento espectral da vegetação e correlacionam o vigor vegetativo, a porcentagem de cobertura do solo, a atividade fotossintética e a produtividade. Isto permite distinguir a vegetação nativa das áreas com uso agropecuário, facilitando o planejamento e direcionamento das políticas públicas e privadas relacionadas ao manejo e conservação do solo e da água (LIMA *et al.* 2013).

Existem outros índices espectrais calculados usando álgebra de mapas, como o *Normalized Difference Snow Index* (NDSI) e o *Normalized Difference Water Index* (NDWI), cada um deles com um propósito específico, a saber identificação de corpos hídricos e neve, respectivamente. Nesta pesquisa, foram utilizados os índices NDBI e NDVI para analisar a alteração recente do uso do solo na cidade de João Pessoa.

Segundo Gao *et al.* (2003), o NDBI pode alcançar precisão de até 92% no mapeamento de áreas edificadas, desde que seja combinado com o NDVI. Desta forma, os

autores (*op. cit.*) demonstram que, para as imagens derivadas de NDBI e NDVI, os valores dos índices, quando positivos, representam áreas construídas e vegetação, respectivamente.

É importante ressaltar que várias pesquisas têm sido realizadas utilizando os índices espectrais nas mais diversas aplicações ambientais (mapeamento de bacias hidrográficas, monitoramento de áreas vegetais e da expansão agrícola, caracterização de rochas carbonáticas, expansão urbana, desertificação ambiental, ocupação e uso do solo). Alguns autores utilizam um ou mais índices espectrais para análise com a decorrente comparação entre os resultados obtidos para eles (LIMA *et al.*, 2013; BATHI, 2014; GUHAA *et al.*, 2018; KARANAM, 2018; LIMA *et al.*, 2019; Silva et al. 2019; ZHANG, 2020; FITZ, 2020; TRINDADE *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022).

Chaves *et al.* (2012) utilizaram índices espectrais para diagnosticar e mapear a cobertura e do uso do solo da bacia hidrográfica do Açude Soledade, no estado da Paraíba. Os autores concluíram que os níveis de degradação da biomassa da vegetação lenhosa da caatinga na bacia hidrográfica do Açude de Soledade são de 73% e 78,6%, para estimativas obtidas pelos índices NDVI e SAVI, respectivamente.

Zha *et al.* (2003) propuseram um método baseado no índice espectral NDBI para automatizar o processo de mapeamento de áreas construídas e aplicaram para mapear terrenos urbanos na cidade de Nanjing, na porção leste da China. Os resultados indicaram que o índice, com uma precisão de 92,6%, pode ser usado para atingir o objetivo de mapeamento de forma confiável.

Rodrigues *et al.* (2022) utilizaram imagens de satélites passivos e índices espectrais para identificar as modificações ocorridas entre os anos de 2008 e 2018 na comunidade Linha Gaúcha, localizada no município de Novo Progresso, no Estado do Pará. Esses autores analisaram a expansão urbana em torno da comunidade em um raio de 50 km, a intensa modificação no uso e ocupação do solo e a supressão da cobertura vegetal no período analisado.

2.3 Modelagem de cenários urbanos

A modelagem de cenários urbanos é uma técnicas promissora e muito importante par ao planejamento urbano e tomadores de decisão. Batty (2009) define modelos urbanos como sendo representações de funções e processos que geram estrutura espacial urbana, em termos de uso do solo, população, emprego e transporte, permitindo o teste de teorias, além da geração de previsões de padrões futuros. Bhatta (2010) acrescenta que esta

definição permite inferir que modelos urbanos são essencialmente simulações computacionais, que propiciam ambientes digitais para testar as consequências de políticas de planejamento sobre a forma da cidade.

Liu (2009) afirma que uma das características fundamentais dos modelos é sua atitude seletiva quanto às informações utilizadas em sua constituição, sendo os modelos então apenas uma aproximação da realidade. A autora (*op. cit.*) complementa que simplificações são necessárias de modo a permitir que os modelos sejam de fácil compreensão e possam ser utilizados em tomadas de decisões.

Quanto aos tipos de modelos urbanos, Bhatta (2010) relata que existem diferentes classificações possíveis, optando, porém, por classificar os modelos em teóricos, de dinâmica urbana de nível agregado, baseados na ciência da complexidade, e de uso do solo e transporte baseado em regras.

Modelos teóricos são baseados na matemática e na física, sendo usados na tentativa de criar teorias gerais sobre processos urbanos. Comumente, esses modelos explicam processos em uma única cidade durante certo período, possuindo, portanto, pouca aplicabilidade prática para o planejamento e tomada de decisão.

Os modelos de dinâmica urbana de nível agregado são realizados em nível macro, porém foram pouco aplicados de forma empírica. Dinâmicas urbanas são definidas como sendo representações de mudanças na estrutura espacial urbana ao longo do tempo, incorporando uma variedade de processos que ocorrem na cidade.

A ciência da complexidade estuda propriedades comuns de sistemas complexos, que por sua vez analisa como as relações entre as partes influenciam o comportamento coletivo, sendo os sistemas urbanos considerados como um tipo de sistema complexo. Considera-se que, para abordar os problemas de planejamento urbano, focar apenas na estrutura física da cidade não é suficiente, sendo necessário considerar também fatores econômicos, sociais e ambientais. Os modelos baseados na ciência da complexidade podem ser sub-classificados em:

- Modelos de dinâmica baseada em células: foram desenvolvidos a partir de ideias de ciência da complexidade fundamentadas em autômatos celulares. Esses modelos são capazes de manipular grandes quantidades de dados, cobrindo várias áreas do estudo, e indicando o alcance dos possíveis impactos, sendo adequado para aplicação em estudos urbanos.

- Modelos baseados em agentes: são embasados na representação de objetos e populações no nível elementar, refletindo os comportamentos destes objetos através do tempo e do espaço. Estes modelos têm foco nas propriedades emergentes das ações de agentes móveis, que representam grandes atores no desenvolvimento da cidade. As suas maiores vantagens são a dinamicidade e a abordagem comportamental, podendo se estender tanto para o lado da demanda como para o lado da oferta dentro do processo de desenvolvimento.
- Modelos baseados em redes neurais artificiais: são modelos matemáticos ou computacionais que tentam simular a estrutura e os aspectos funcionais de redes neurais naturais. Na maioria dos casos, redes neurais artificiais são sistemas adaptativos que mudam sua estrutura de acordo com informações internas e externas.
- Modelos baseados em geometria fractal: sua aplicação na modelagem urbana é fundamentada na noção de que objetos espaciais planejados possuem características fractais. Estes modelos não se ocupam com os processos, mas apenas com a aplicação de padrões de fractal na modelagem urbana, sendo, portanto, considerados inadequados para a análise de crescimento urbano.

Por fim, os modelos de uso do solo e transporte baseados em regras focam primariamente na forma como a população e os empregos se locam em espaços urbanos, de forma consistente com as interações espaciais entre os diferentes locais destas atividades. Estes modelos geralmente simulam a cidade de forma estática, sem considerar as dinâmicas urbanas. Assim, não podem ser aplicados de forma efetiva na modelagem de crescimento urbano.

3 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A área objeto de estudo desta pesquisa é o município de João Pessoa, localizado no estado da Paraíba, na região Nordeste do Brasil. Com uma população estimada em 2021 de 825.796 habitantes (IBGE, 2021), a capital paraibana é o oitavo município mais populoso da região Nordeste e o vigésimo terceiro mais populoso do Brasil. Esse município está inserido em uma área costeira (Oceano Atlântico), na porção mais oriental das Américas e do Brasil, Zona da Mata Paraibana, porção leste do Estado, mais precisamente entre as coordenadas geográficas $7^{\circ} 03' 00''$ e $07^{\circ} 15' 00''$ de latitude sul e entre $34^{\circ} 58' 00''$ e $34^{\circ} 47' 30''$ de longitude oeste (Figura 1). De acordo com a divisão regional vigente, o município pertence às Regiões Geográficas Intermediária e Imediata de João Pessoa (IBGE 2017).

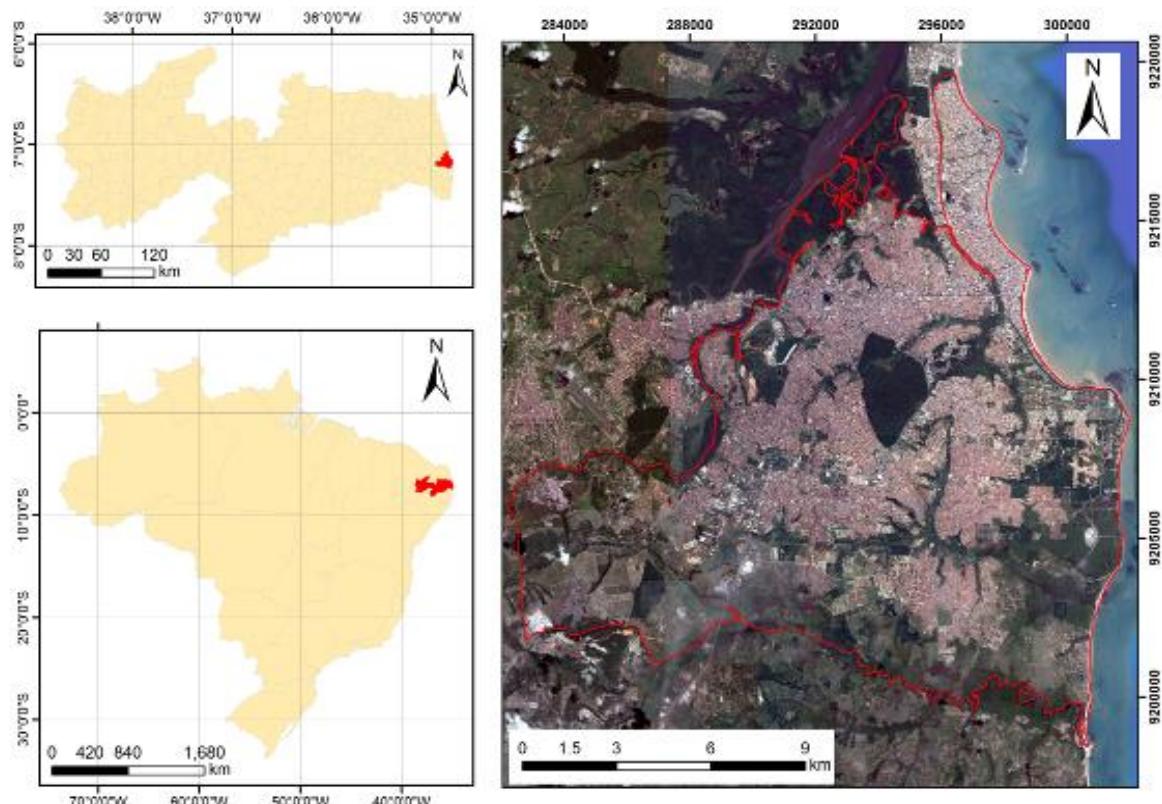


Figura 1 - Localização geográfica da cidade de João Pessoa no estado da Paraíba, e do estado no Brasil.

A altitude média do município em relação ao nível do mar é de 37 m, com um valor máximo de 74 m nas proximidades do rio Mumbaba, predominando em seu sítio urbano

terrenos planos com cotas da ordem de 10 m de altitude, na área inicialmente urbanizada. Limita-se ao norte com a cidade de Cabedelo, pelo Rio Jaguaribe, ao sul com o município do Conde e o Rio Gramame, a leste com o Oceano Atlântico e a oeste com os municípios de Bayeux, pelo Rio Sanhauá, e Santa Rita, pelos Rio Mumbaba e Rio Paraíba, respectivamente.

A malha urbana de João Pessoa apresenta sua configuração bem estratificada, consequentemente o uso do solo também. Atualmente, o governo criou programas para urbanização de comunidades e outros programas habitacionais visando ainda mais o progresso (SILVA, 2012).

Para efeito de ordenamento do uso e ocupação do solo, o macrozoneamento da área urbana de João Pessoa está representado na Figura 2, de acordo com o seu Plano Diretor (JOÃO PESSOA, 2009). As principais zonas que constituem a área urbana são:

- Zona Adensável Prioritária (ZAP): é aquela onde a disponibilidade de infraestrutura básica, a rede viária e o meio ambiente permitem a intensificação do uso e ocupação do solo e na qual o índice de aproveitamento básico (1,0) poderá ser ultrapassado até o limite de 4,0.
- Zona Adensável Não Prioritária (ZANP): é aquela onde a disponibilidade ou a falta de um dos sistemas da infraestrutura básica permite uma intensificação moderada do uso e ocupação do solo e na qual o índice de aproveitamento básico (1,0) poderá ser ultrapassado até o limite de 2,0.
- Zona Não Adensável (ZNA): é aquela onde a carência da infraestrutura básica, da rede viária e o meio ambiente restringem a intensificação do uso e ocupação do solo e na qual o limite máximo de construção é o índice de aproveitamento básico (1,0).
- Zonas Especiais de Preservação (ZEP): são porções do território, localizadas tanto na Área Urbana como na Área Rural, nas quais o interesse social de preservação, manutenção e recuperação de características paisagísticas, ambientais, históricas e culturais, impõe normas específicas e diferenciadas para o uso e ocupação do solo. Abrangem, dentre outros, as Zonas de Preservação Ambiental (ZPA), as Áreas de Preservação Permanente (APP), e os Setores de Amenização Ambiental (SAA)

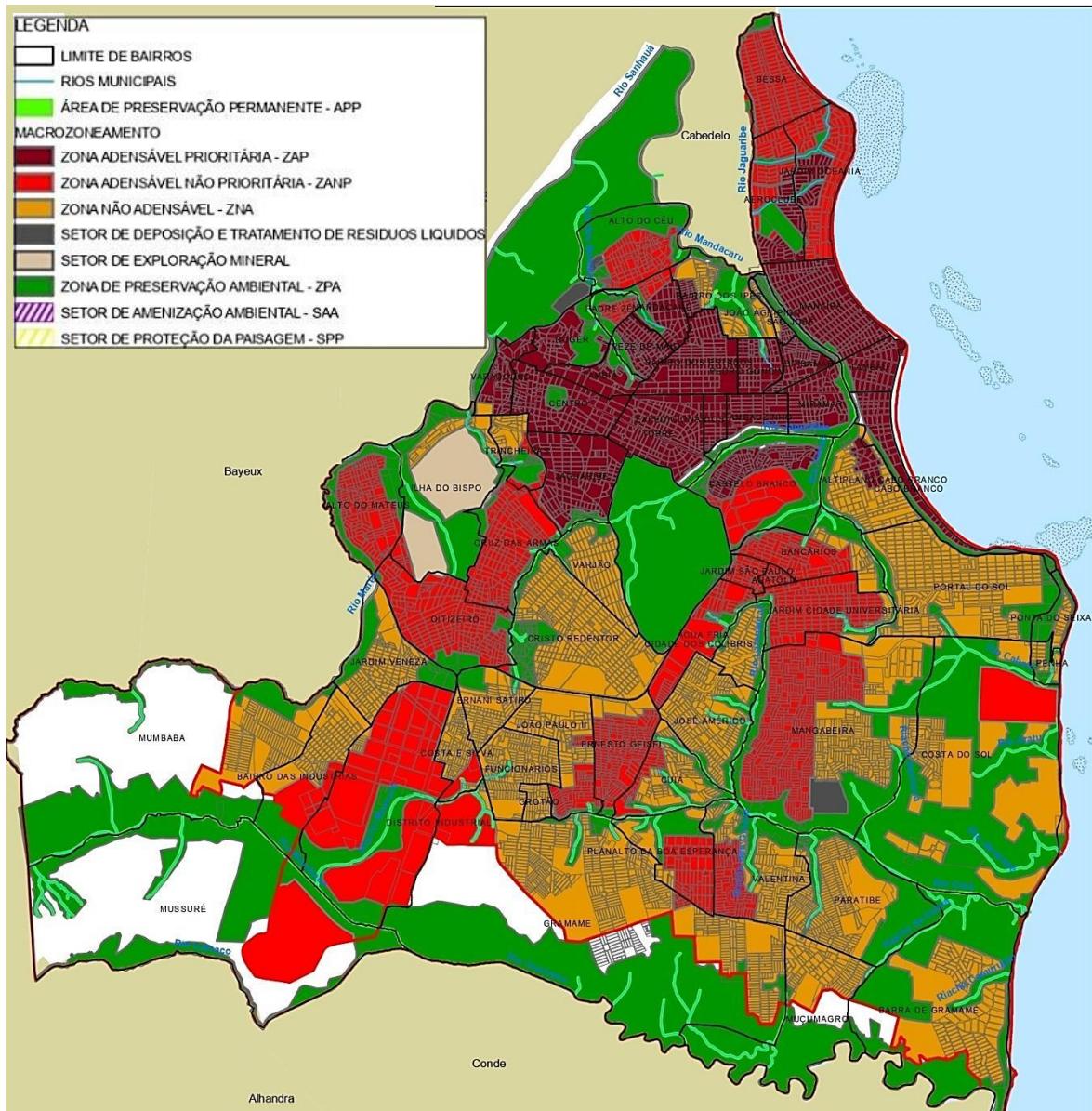
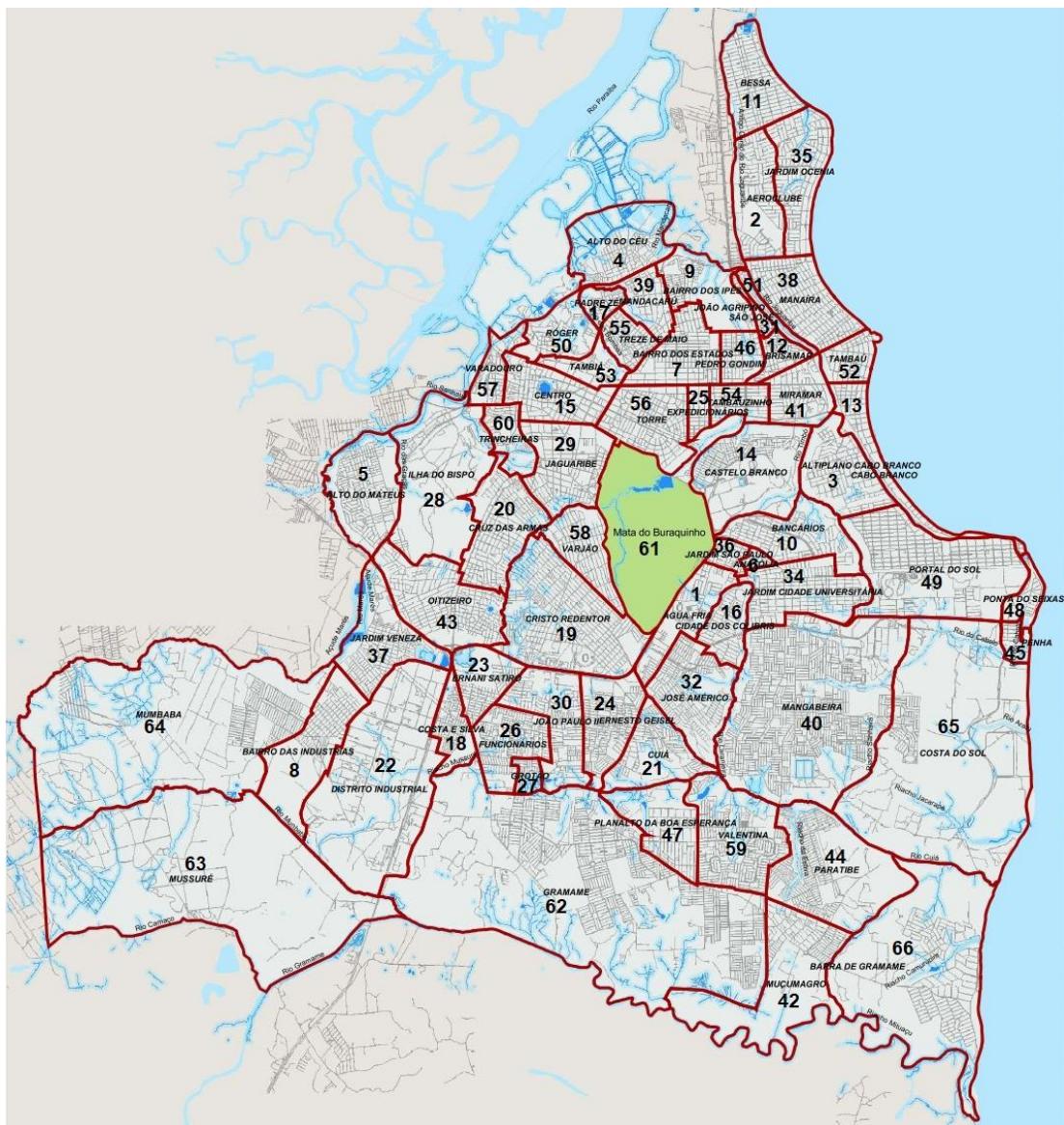


Figura 2 - Macrozoneamento do município de João Pessoa.

(Fonte: Prefeitura Municipal de João Pessoa.)

Atualmente, o município de João Pessoa possui 65 bairros distribuídos numa área de 210,511 km². A Figura 3 mostra a divisão do município por bairros. Os bairros estão agrupados nas zonas, de acordo com a relação abaixo, com a população e números de domicílios descritos nas Tabelas 2–5:



CÓD.	BAIRRO				
1	Aqua Fria	22	Distrito Industrial	45	Penha
2	Aeroclube	23	Ernani Sátiro	46	Pedro Gondim
3	Alliplano Cabo Branco	24	Ernesto Geisel	47	Planalto Boa Esperança
4	Alto do Céu	25	Expedicionários	48	Ponta dos Seixas
5	Alto do Mateus	26	Funcionários	49	Portal do Sol
6	Anatólia	27	Grotão	50	Rôger
7	Bairro dos Estados	28	Ilha do Bispo	51	São José
8	Bairro das Indústrias	29	Jaguaribe	52	Tambauá
9	Bairro dos Ipês	30	João Paulo II	53	Tambiá
10	Bancários	31	João Agrípino	54	Tambauzinho
11	Bessa	32	José Américo	55	Treze de Maio
12	Brisamar	34	Jardim Cidade Universitária	56	Torre
13	Cabo Branco	35	Jardim Oceânia	57	Varadouro
14	Castelo Branco	36	Jardim São Paulo	58	Varjão
15	Centro	37	Jardim Veneza	59	Valentina
16	Cidade dos Colibris	38	Manaira	60	Trincheiras
17	Padre Zé	39	Mandacaru	61	Mata do Buraquinho
18	Costa e Silva	40	Mangabeira	62	Gramame
19	Cristo Redentor	41	Miramar	63	Mussuré
20	Cruz das Armas	42	Mucumagro	64	Mumbaba
21	Cuiá	43	Oitizeiro	65	Costa do Sol
		44	Paratibe	66	Barra de Gramame

Figura 3 - Divisão dos bairros do município de João Pessoa.
 (Fonte: Prefeitura Municipal de João Pessoa.)

Zona Sul

Castelo Branco, Bancários, Jardim São Paulo, Anatolia, Jardim Cidade Universitária, Água Fria, Ernesto Geisel, Valentina Figueiredo, Paratibe, Praia do Sol, Conjunto Boa Esperança, José Américo, Cidade dos Colibris, Costa e Silva, Mangabeira(I a VIII), Cidade Verde, Esplanada, Ernani Sátiro, Funcionários (II a IV), Grotão, João Paulo II, Distrito Industrial, Bairro das Indústrias, Gramame (Novo Geisel, Conjunto Residencial Gervásio Maia, Colinas do Sul I e II, Conj. Irmã Dulce), Conjunto Presidente Médici.

Tabela 2 - População e domicílio da zona sul de João Pessoa.

Bairros zona sul	População	%	Quantidade de domicílios	%
Mangabeira	67398	29,4	18153	30,5
Valentina	22306	9,7	5554	9,3
Funcionários	16222	7,1	4020	6,7
Jardim Veneza	12494	5,4	2069	5,2
Ernesto Geisel	12049	5,2	3197	5,4
Jardim Cidade Universitária	11476	5,0	3321	5,6
João Paulo II	9912	4,3	2439	4,1
Costa e Silva	9245	4,0	2208	3,7
José Américo	8776	3,8	2241	3,8
Ernani Sátiro	8447	3,7	2142	3,6
Paratibe	8134	3,5	2130	3,6
Bairro das Indústrias	7755	3,4	1828	3,1
Gramame	6288	2,7	1563	2,6
Grotão	5784	2,5	1394	2,3
Muçumagro	4882	2,1	1183	2,0
Cuiá	3418	1,5	912	1,5
Planalto da Boa Esperança	3318	1,4	869	1,5
Água Fria	3069	1,3	1005	1,7
Jardim São Paulo	2543	1,1	814	1,4
Cidades dos Colibris	1802	0,8	468	0,8
Distrito Industrial	1675	0,7	397	0,7
Anatolia	1126	0,5	291	0,5
Costa do Sol	609	0,3	157	0,3
Mumbaba	463	0,2	100	0,2
Barra de Gramame	357	0,2	94	0,2
Mussuré	18	0,0	7	0,0
Total	229566	100	59556	100

Fonte: Adaptado de Sposati (2009).

Zona Leste

Cabo Branco, Tambaú, Tambauzinho, Expedicionários, Bessa, Jardim Oceania, Aeroclube, Manaíra, Altiplano, Miramar, Jardim Luna, João Agripino, São José e Brisamar.

Tabela 3 - População e domicílio da zona leste de João Pessoa.

Bairros zona leste	População	%	Quantidade de domicílios	%
Manaíra	19289	22,5	5131	22,4
Castelo Branco	12850	15,0	3299	14,4
Jardim Oceania	10015	11,7	2717	11,9
São José	7923	9,3	2063	9,0
Bessa	7111	8,3	1950	8,5
Tambaú	6782	7,9	1892	8,3
Cabo Branco	5439	6,4	1584	6,9
Altiplano Cabo Branco	4151	4,8	1005	4,4
Brisamar	4148	4,8	1096	4,8
Aeroclube	4057	4,7	1169	5,1
Portal do Sol	1510	1,8	364	1,6
João Agripino	1206	1,4	325	1,4
Penha	773	0,9	173	0,8
Ponta do Seixas	383	0,4	111	0,5
Total	85637	100	22879	100

Fonte: Adaptado de Sposati (2009)

Zona Oeste

Cruz das Armas, Jaguaribe, Oitizeiro, Rangel, Cristo Redentor, Bairros dos Novais, Alto do Mateus, Ilha do Bispo e Jardim Veneza.

Tabela 4 - População e domicílio da zona oeste de João Pessoa.

Bairros zona oeste	População	%	Quantidade de domicílios	%
Cristo Redentor	37170	23,3	9243	22,9
Oitizeiro	31028	19,5	7664	19,0
Cruz das Armas	25994	16,3	6584	16,3
Varjão	17276	10,8	4274	10,6
Alto do Mateus	16898	10,6	4188	10,4
Jaguaribe	14368	9,0	4123	10,2
Trincheiras	8399	5,3	2231	5,5
Ilha do Bispo	6386	4,0	1539	3,8
Mata do Buraquinho	1896	1,2	441	1,1
total	159355	100	40287	100

Fonte: Adaptado de Sposati (2009).

Zona Norte

Centro, Varadouro, Róger, Torre, Tambiá, Jardim 13 de Maio, Padre Zé, Bairro dos Estados, Bairro dos Ipês, Mandacaru, Alto do Céu, Jardim do Céu, Jardim Esther, Jardim Mangueira e Conjunto Pedro Gondim.

Tabela 5 - População e domicílio da zona norte de João Pessoa.

Bairros zona norte	População	%	Quantidade de domicílios	%
Torre	17062	21,5	4564	22,0
Alto do Céu	14981	18,9	3575	17,2
Bairro do Estados	8726	22,0	2383	11,5
Bairro dos Ipês	7874	9,9	2135	10,3
Treze de Maio	7850	9,9	1983	9,6
Padre Zé	7053	8,9	1631	7,9
Centro	4998	6,3	1618	7,8
Tambauzinho	4466	5,6	1165	5,6
Varadouro	4121	5,2	1116	5,4
Tambiá	2172	2,7	587	2,8
total	79303	100	20757	100

Fonte: Adaptado de Sposati (2009).

3.2 PROCESSO DE EXPANSÃO URBANA DA CIDADE DE JOÃO PESSOA

A data da fundação da capital paraibana foi estabelecida em 5 de agosto de 1585, em decorrência da construção de um Forte às margens do Rio Sanhauá, afluente do Rio Paraíba, sendo considerada a terceira cidade mais antiga do país. Diferentemente de outras cidades brasileiras que nasceram como vila, povoado ou aldeia, a cidade de João Pessoa já nasceu com o status de cidade, embora nascesse como uma cidade colonial, assim como muitas outras cidades brasileiras (MAIA, 2001). Apesar de ter sido planejada em seus primórdios, se expandiu de forma espontânea, trazendo inadequações para a cidade (MAIOR e CÂNDIDO, 2014).

Em homenagem ao santo do dia, o lugar tomou o nome de Nossa Senhora das Neves, até hoje padroeira da cidade, tendo recebido vários nomes, até que em 1930 foi designada com o nome que carrega até hoje. João Pessoa era presidente da Paraíba, cargo equivalente ao de governador, e candidato a vice-presidente da República, na chapa encabeçada por Getúlio Vargas, tendo sido assassinado em Recife – PE no ano de 1930.

A dinâmica da cidade de João Pessoa foi marcada pelo colonialismo, que ocorreu ao longo dos séculos XVI, XVII e XVIII. Sua localização à beira rio se mostrou útil à guarda militar do interesse português, possuindo forte defesa dos que chegavam pelo mar.

Como porto exportador, seguiu o padrão da colonização que tinha o campo como centro da produção e a cidade como centro da decisão. A importância desse legado histórico é determinante na sua formação espacial. A evolução espacial da cidade reflete o contexto geopolítico, econômico e social inerentes do processo de expansão do capital nos países colonizados (SPOSATI *et al.*, 2009).

João Pessoa teve seu processo de urbanização iniciado tarde. De acordo com Gonçalves (2007), no século XVII a cidade ganhava destaque na produção e comercialização de açúcar no Brasil, enriquecendo muitos senhores de engenhos e comerciantes. Deste modo, a cidade obteve recursos para se expandir, aumentando o número de edificações e melhorando em qualidade, porém tendo como fator limitante a presença do Rio Sanhauá e os mangues que limitavam essa expansão para norte e oeste. Do ponto de vista urbanístico, o município acaba por se demarcar espontaneamente em duas zonas: a cidade baixa, localizada na planície próxima ao Rio Sanhauá, e abrigando casas comerciais e prostíbulos, e a cidade alta, localizada no planalto acima desse rio, possuindo residências e centro religioso (MAIOR e CÂNDIDO, 2014).

No século XIX, a produção de algodão trouxe um fortalecimento econômico e político para a cidade, permitindo um processo de ampliação da infraestrutura urbana, que consequentemente possibilitou inúmeras medidas urbanísticas, introduzindo a modernização na Paraíba: primeira legislação para ordenamento urbano, abertura de ruas, construção de jardins públicos e implantação do bondinho puxado a burro (GONÇALVES, 2007).

No final do século XIX e início do século XX, a cidade não tem forças para enfrentar os obstáculos impostos por sua topografia e, por isso, seu desenvolvimento praticamente não existe (SILVEIRA, 2004). No entanto, no começo do século XX, houve um impulso de crescimento em direção ao leste e ao sul, quando ocorreu um intervencionismo no ordenamento urbano com abertura de equipamentos urbanos como praças, aumento dos transportes coletivos puxados a burro, energia elétrica e saneamento (MELLO, 1987). Além disso, ocorreu a aberturas de avenidas que direcionaram a expansão da cidade, a partir de dois eixos principais: a Avenida Epitácio Pessoa, direcionada para o leste, ligando o centro à orla, que impulsionou a dinâmica urbana nas faixas litorâneas de Cabo Branco e

Tambaú; e a Avenida Cruz das Armas, que tornou a principal via de entrada e saída da cidade, em direção à Recife-PE (MAIOR e CÂNDIDO, 2014; SILVA, 2012).

O eixo da Avenida Cruz das Armas se caracterizou por ser estritamente comercial, devido à sua ligação com Recife, possuindo em seu entorno núcleos de moradia das classes mais pobres. Já o eixo da Avenida Epitácio Pessoa direcionou a classe mais privilegiada, inicialmente para veranear e em seguida para fixar moradia na orla (MELLO, 1987).

Mesmo passando por processos de urbanização como o que ocorreu no inicio Século XX, os traços de ruralidade perduraram durante esse período. A maioria dos habitantes vivia de atividades do campo no interior e iam para a capital só para veranear. Os principais incentivos para a urbanização se deram com o progresso da atividade algodoeira e o fim da escravidão. Os senhores de engenho progressivamente se tornaram usineiros e as suas famílias passaram a habitar as cidades, vivendo nas residências que antes eram temporárias. Com esta mudança do engenho para usina e com a vinda dessas famílias para a capital, surgiu a necessidade de melhorias (SILVA, 2012).

Em termos urbanísticos, novas intervenções só voltaram a surgir a partir da década de 1950, com a criação de dois conjuntos habitacionais de grande porte nos bairros de Jaguaribe e Expedicionários (SILVA, 1997).

No ano de 1955, foi criada a Universidade da Paraíba, durante o governo de José Américo de Almeida, impulsionando transformações espaciais e demográficas, e o desenvolvimento cultural da região (SPOSATI *et al.*, 2009). Posteriormente, com a sua federalização, foi transformada em Universidade Federal da Paraíba, incorporando as estruturas universitárias existentes nas cidades de João Pessoa e Campina Grande. Na capital, a Cidade Universitária iniciaria um novo processo de ocupação da cidade para a região sul/leste que se concretizaria a partir do final da década de 1960 (HIGINO JUNIOR, 2013).

Nos anos que se seguiram, mais precisamente entre 1963 e 1978, estimulado pela intervenção de políticas federais, ocorre a grande expansão e redefinição da estrutura urbana da cidade de João Pessoa. Com auxílio do Banco Nacional de Habitação, foram criados grandes conjuntos habitacionais, impulsionando, assim, o crescimento da construção civil, que favoreceu e intensificou a ocupação do solo urbano, com os loteamentos na região litorânea (SPOSATI *et al.*, 2009). Lavieri e Lavieri (1999) afirmam que “em João Pessoa os conjuntos habitacionais passaram a se constituir num elemento chave para a reordenação de sua estrutura urbana, ocupando a linha de frente e funcionamento como vetor de direcionamento do crescimento da cidade [...]”.

Na década de 1970, a cidade recebeu novo impulso de expansão, através de financiamentos do Sistema Federal de Habitação (SFH), que priorizou as áreas no entorno da Avenida Epitácio Pessoa, sobretudo o Bairro dos Estados. Junto a outros fatores, como o Projeto Comunidade Urbana para Recuperação Acelerada (CURA), foi financiada a implantação de infraestrutura nos bairros da orla marítima de João Pessoa. O distrito de Tambaú foi incorporado à cidade de João Pessoa como bairro. A orla passou a ser uma das áreas mais valorizadas da cidade, e esse fenômeno teve como efeito a dinamização do setor de serviços, aumentando o preço do solo e intensificando o processo de segregação socioespacial. Surge aí outro eixo de expansão em direção ao norte, de Cabo Branco e Tambaú para Manaíra e Bessa (LAVIERI e LAVIERI, 1999; SILVA, 2012).

No período de 1970 a 1980, a expansão urbana assumiu formato de espraiamento, com crescimento na população de 62%, em contrapartida a uma ampliação de área de 170%, apresentando em toda parte espaços vazios (MAIOR e CÂNDIDO, 2014). Essa expansão, que ocorreu majoritariamente em direção às zonas sul e sudeste, sucedeu à revelia do planejamento e da implantação de infraestrutura básica. Segundo Sposati *et al.* (2009), nesse mesmo período, a quantidade de conjuntos habitacionais dobrou, reafirmando o crescimento da cidade da direção sudeste, com a instalação dos conjuntos Ernani Sátiro, José Américo, Ernesto Geisel e José Vieira Diniz – Distrito Industrial, além da ampliação do Castelo Branco. Com isso, o número de domicílios passou de 29.000, em 1960, para 64.650, em 1980. Como consequência da expansão ocorrida nesse período, surge o Código de Urbanismo de 1976 com redimensionamento do sistema viário de João Pessoa.

Esse processo de expansão ocorre também durante a década de 1980, gerando os bairros: Radialista, Ivan Bichara, Bancários, Ipês, Alto do Mateus, Esplanada, Anatolia, Cristo, Grotões, Mangabeira (I e II), Bairro das Indústrias, Parque Arruda Câmara (Roger), Valentina Figueiredo (SPOSATI *et al.*, 2009)

Lavieri e Lavieri (1992) apontam que, na década de 1990, a cidade de João Pessoa registrou uma rápida expansão da malha urbana, valorização imobiliária de áreas nobres, proliferação de áreas comerciais, de lazer e de serviços e desenvolveu um potencial turístico com a expansão da rede hoteleira na região da orla marítima, ao lado do crescimento de residências de alto padrão, com tendência à verticalização. Além disso, o fenômeno de transbordamento urbano da cidade se intensificou, sendo orientado no sentido sudeste e oeste, devido às limitações físicas do mangue e do rio Paraíba ao norte da cidade. As cidades de Bayeux, Santa Rita e Cabedelo também apresentaram as mesmas limitações

de expansão, sendo obrigadas a direcionar seu crescimento em direção a João Pessoa, ocasionando o processo de conurbação entre João Pessoa, Santa Rita, Bayeux, e Cabedelo (MAIOR E CÂNDIDO, 2014). Dado esse processo de expansão, foi criada a Região Metropolitana de João Pessoa – RMJP, através da Lei Complementar Estadual 59/2003.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Análise da evolução histórica entre 1990 e 2020 do uso e ocupação do solo

Nesta etapa, foram utilizadas imagens obtidas pelos satélites Landsat 5, 7 e 8. Estas imagens foram analisadas e pré-selecionadas através da plataforma USGS GloVis, utilizando-se um critério de visibilidade (menor quantidade de nuvens). Logo após, passaram por um processamento na plataforma Google Earth Engine, utilizando-se de princípios de álgebra de mapas e linguagem de programação em JavaScript para o cálculo do Índice de Diferença Normalizada de Vegetação (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) e do Índice de Diferença Normalizada de Área Construída (*Normalized Difference Built-up Index* – NDBI). Posteriormente, realizou-se um segundo processamento através do software ArcGIS, consistindo em transformar as imagens em formato *raster* para formatos vetoriais de polígonos, de modo a possibilitar a extração de áreas. Esses procedimentos serão mais bem detalhados ao longo deste item.

4.1.1 Análise e escolha das imagens

A seleção e análise das imagens Landsat se deu por meio da plataforma USGS GloVis, que fornece acesso gratuito a essas imagens obtidas. Foi adotado como principal critério de escolha a visibilidade da imagem sobre a cidade de João Pessoa, sendo aceitável a presença de nuvens, desde que de pequeno tamanho e em pouca quantidade. As imagens adotadas, com suas respectivas datas, são descritas na Tabela 6. As Figuras 4, 5 e 6 demonstram, respectivamente, exemplos do que foi considerado como tamanho e quantidade aceitável e inaceitável de nuvens.

Tabela 6 - Data e origem das imagens adotadas.

Satélite	Data da imagem
Landsat 5	27/06/1990
Landsat 5	15/05/1992
Landsat 5	26/09/2000
Landsat 7	04/08/2001
Landsat 5	26/08/2006
Landsat 5	08/10/2010
Landsat 8	25/11/2016

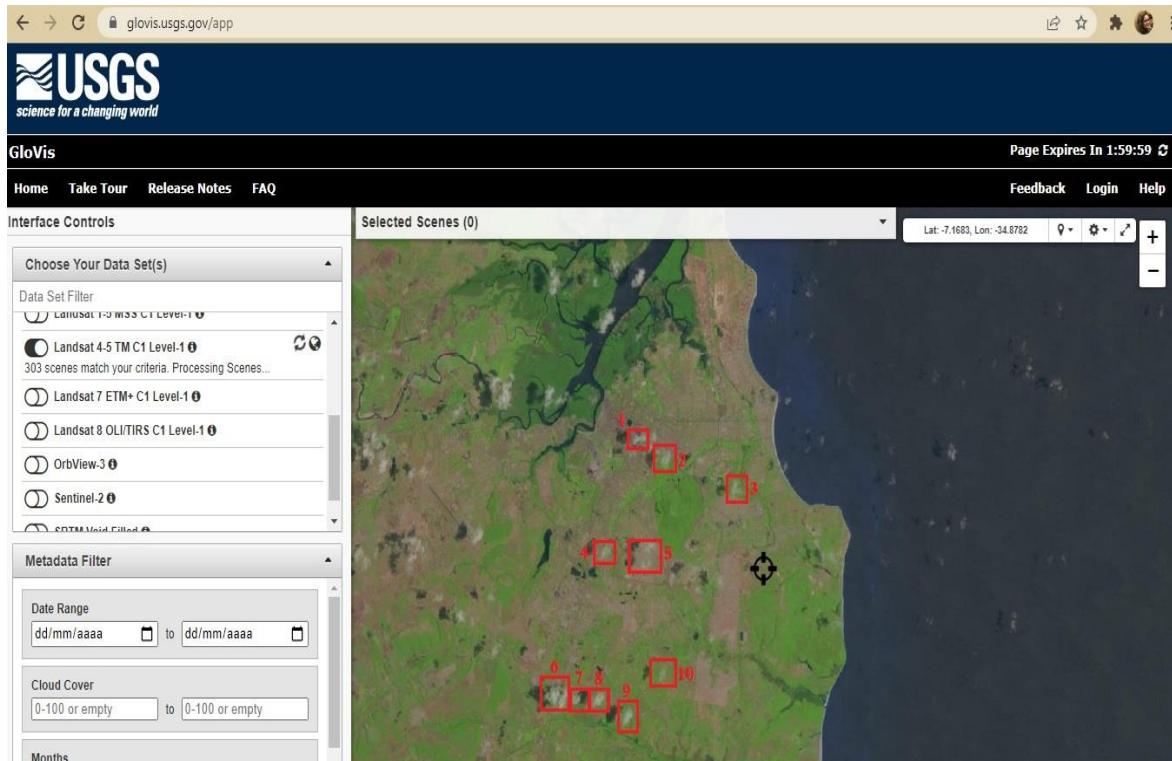


Figura 4 - Imagem Landsat com tamanho e quantidade aceitável de nuvens (Fonte: USGS, marcação da autora).

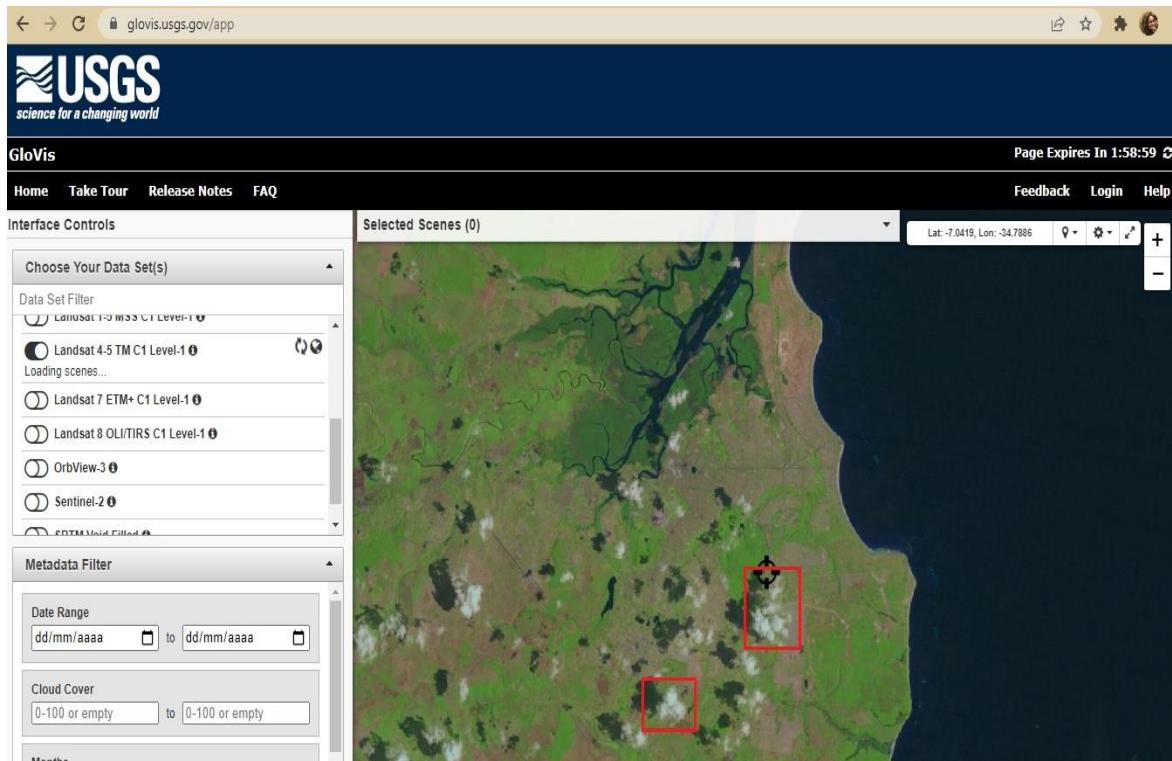


Figura 5 - Imagem Landsat com tamanho inaceitável de nuvens (Fonte: USGS, marcação da autora).

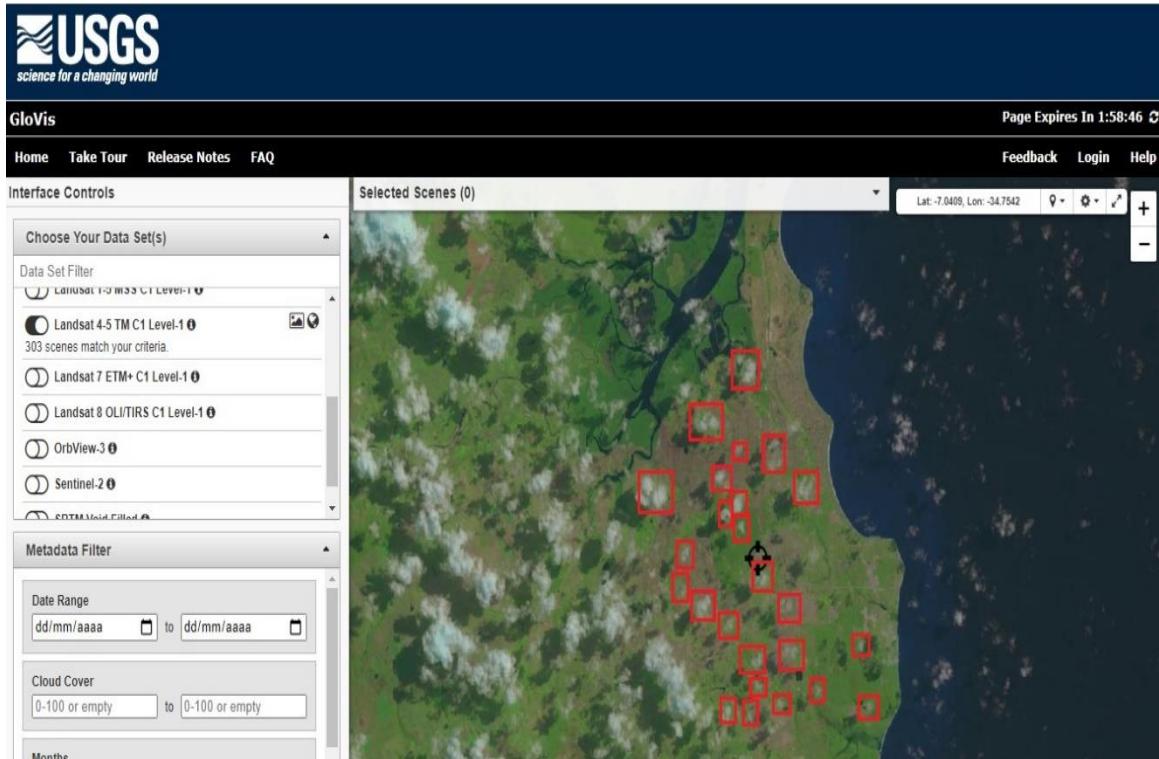


Figura 6 - Imagem Landsat com quantidade inaceitável de nuvens (Fonte: USGS, marcação da autora).

4.1.2 Cálculo dos índices de vegetação e de área construída

Para a avaliação das mudanças ocorridas na vegetação, adotou-se o NDVI, uma vez que pode ser aplicado sem a necessidade de determinação de coeficientes ou fatores de ajuste. Como o trabalho possui foco no solo urbano, considera-se que eventuais inexatidões advindas do uso desse índice não são prejudiciais, sendo compensados pela facilidade de sua aplicação. O índice NDVI é calculado de acordo com o que é exibido na Equação (1):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad (1)$$

onde: NIR é a banda no infravermelho próximo ($0,76 - 0,90 \mu\text{m}$) Red é a banda no vermelho ($0,630 - 0,680 \mu\text{m}$). O uso dessas bandas dá-se por conta da absorção da clorofila, que ocorre próximo a $0,67 \mu\text{m}$, e alta reflectância no infravermelho próximo (GAO, 1996).

Este índice é capaz de quantificar e atribuir valores de -1 a 1 para os pixels da imagem; nas superfícies que contêm água ou nuvem, esses valores encontram-se

menores que zero (PENACHIO *et al.*, 2020). Além disso, os valores do NDVI mais próximos de 1 representam vegetação saudável (maior densidade da cobertura vegetal). Por outro lado, os valores positivos próximos a 0 demonstram vegetações impactadas, rala e esparsa ou até mesmo solo exposto (POEKING *et al.*, 2007).

Já para o estudo da mudança de solo urbano, foi adotado o NDBI, por ser capaz de identificar área construída, e foi amplamente trabalhado nessa pesquisa. O índice NDBI é calculado de acordo com o que é exibido na Equação (2):

$$\text{NDBI} = \frac{\text{MIR} - \text{NIR}}{\text{MIR} + \text{NIR}} \quad (2)$$

sendo MIR referente a banda do infravermelho médio ($1,57 - 1,65 \mu\text{m}$) e NIR a banda do infravermelho próximo ($0,76 - 0,90 \mu\text{m}$) (GAO *et al.*, 2003).

Esse índice, na maioria das vezes, baseia-se na maior refletância na faixa do MIR do que do NIR de áreas urbanizadas, porém em locais com vegetação seca, pode haver maior refletância do MIR resultando em valores positivos de NDBI para esses locais (XU, 2008). Cabe ressaltar que o índice NDBI varia de -1 a 1, e os valores positivos representam áreas construídas/impermeabilizadas e os valores negativos correspondem as áreas com cobertura vegetal (SILVA *et al.*, 2014). No entanto, a presença de vegetação seca e água com elevada concentração de material em suspensão também podem apresentar valores positivos para o NDBI (XU, 2008).

A ferramenta utilizada para o cálculo dos índices foi o Google Earth Engine (GEE), um serviço de processamento geoespacial que permite que os usuários executem algoritmos, ou códigos, em imagens georreferenciadas, que estão armazenadas no banco de dados do Google (GOOGLE EARTH ENGINE, 2021). Esses algoritmos são escritos a partir de linguagens de programação como JavaScript e Python.

Para o desenvolvimento dessa pesquisa, se utilizou códigos que executam as fórmulas de determinação dos índices, fornecendo o valor *pixel a pixel*, sendo necessária também a aplicação de uma máscara para delimitar o município de João Pessoa. A variável de entrada para os códigos é a data das imagens selecionada e a cena que contém a localidade estudada. Com essas informações, a plataforma busca no banco de dados a imagem a ser processada.

Por fim, aplicou-se um novo código para a exportação do produto, possibilitando o *download* da imagem processada em formato de *raster*, com extensão .tif, aceita pelos principais *softwares* de geoprocessamento.

4.1.3 Cálculo das áreas de vegetação e de área construída

Para o cálculo das áreas de vegetação e de área construída, utilizou-se o software ArcGIS. A imagem com índices calculados, obtida através do Google Earth Engine, é adicionada ao programa.

Em seguida, as imagens foram convertidas de *raster* para polígonos, ou seja, a imagem deixou de possuir pixels e passou a ter feições com contornos e área bem definidos.

Uma vez que cada polígono representa o que antes era um aglomerado de pixels, a partir da tabela de atributos das feições foi possível obter a área construída e as áreas de vegetação. Para o caso do cálculo do NDBI, se calculou a área com valores maiores que 0. Já para o NDVI, se calculou a área dentro das faixas: $\text{NDVI} < 0$; $0,0 \leq \text{NDVI} < 0,2$; $0,2 \leq \text{NDVI} < 0,4$; $0,4 \leq \text{NDVI} < 0,6$; $0,6 \leq \text{NDVI} < 1$.

4.1.3.1 Cálculo da área construída por macrozona

Uma forma prática de verificar a eficácia dos instrumentos de planejamento e ordenamento urbano com a utilização de índices espectrais é realizar a comparação da distribuição espacial deles com os mapas de zoneamento urbano. Assim, é possível identificar se as zonas foram ocupadas de acordo com sua destinação correta. Deste modo, após a determinação das áreas construídas e das áreas com vegetação em todo o município de João Pessoa, foi realizado o cálculo da área construída em cada macrozona definida na lei de zoneamento urbano: Zona de Adensamento Prioritário, Zona de Adensamento Não Prioritário, Zona Não Adensável, Zona de Proteção Ambiental e áreas não zoneadas.

Para o cálculo da área construída por macrozona, foi adicionado ao arquivo com as feições de área construída, obtidas na etapa anterior a partir das imagens da distribuição espacial do NDBI, um *shapefile* com os limites das zonas, no qual foi possível fazer recortes dos polígonos contidos em cada uma delas.

Atribuindo valores aos *pixels* presentes em cada zona, de modo a possibilitar sua diferenciação, e isolando-as com a aplicação de filtros criados com a função *Query*

Builder, foram calculadas as áreas inseridas em cada uma delas, permitindo a obtenção da área construída por zona.

4.2 Modelagem de cenários futuros de uso e ocupação do solo

Para realizar a modelagem de cenários futuros, foram utilizadas imagens do uso e ocupação do solo de t_1 (2001), t_2 (2006) e t_3 (2018). Esses produtos foram utilizados como dado de entrada para o processo de modelagem, utilizando o modelo Land Change Modeler (LCM) no *software* TerrSet.

Foram empregadas as imagens dos anos t_1 e t_2 para identificar os padrões de mudança de uso e ocupação do solo no período, e assim gerar o potencial de transição entre estes. Em seguida, realizou-se a projeção do uso e ocupação do solo no período t_3 , e posteriormente a validação da imagem produzida com a imagem real para o período. Foi realizada uma calibração para que, no processo de projeção e validação, se obtivesse o modelo mais preciso possível.

Além das imagens classificadas, para a modelagem de cenários futuros foi necessária a aplicação das variáveis explanatórias, obtidas a partir de mapas de distribuição espacial de equipamentos urbanos, bem como mapas topográficos, mapas de rios e mapas de rodovias. Todos esses mapas foram obtidos junto ao IBGE e à Prefeitura Municipal de João Pessoa. Adicionalmente, utilizou-se também o mapa de macrozoneamento do município, também fornecido pela Prefeitura Municipal de João Pessoa, como fator de restrição às mudanças no uso e ocupação do solo.

Com o modelo calibrado, se realizou então a projeção de uso e ocupação do solo para os anos de 2030, 2035 e 2040. Os procedimentos de modelagem de cenários futuros, referenciados neste tópico, estão resumidos no fluxograma apresentado na Figura 7 e serão mais bem detalhados ao longo deste item.

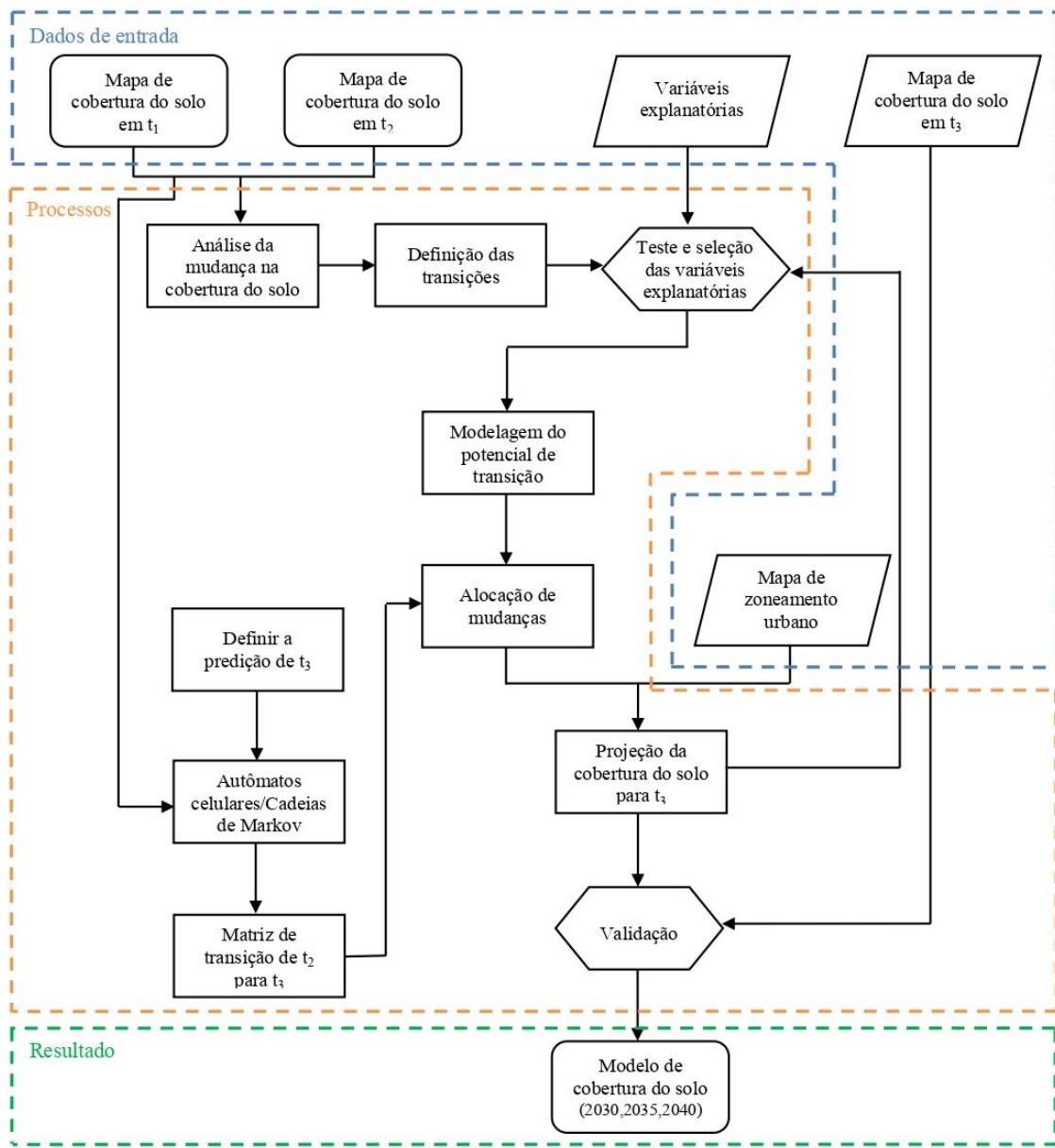


Figura 7 - Fluxograma da metodologia utilizada no processo de modelagem de uso e ocupação do solo para o município de João Pessoa (Fonte: Autoria própria).

4.2.1 Classificação das imagens

Para a modelagem de cenários futuros, foram utilizadas como dado de entrada as imagens classificadas do uso e ocupação do solo. Essas imagens foram classificadas usando o método de classificação supervisionada. Foram selecionadas imagens dos anos 2001, 2006 e 2018 totalmente livre de nuvens, sendo denominadas t_1 , t_2 e t_3 , respectivamente. Em seguida, as imagens foram adicionadas ao programa TerrSet para a realização de classificação supervisionada, pelo método da máxima verossimilhança. Na classificação do uso e ocupação do solo da área de estudo, foram definidas as seguintes

classes: (a) corpos hídricos, (b) vegetação, e (c) área urbanizada. A opção por utilizar uma quantidade limitada de classes se deu pela necessidade de simplificar os modelos de modo a obter dados mais precisos, uma vez que a adição de classes adicionais gerou modelos com mais imprecisões em testes iniciais.

4.2.2 Previsão do potencial de transição

O processo de modelagem do potencial de transição consiste em identificar o potencial de modificação de uma classe de cobertura do solo para outra, com a criação de mapas que apontam a tendência de cada transição ocorrer. Esses mapas são organizados de modo que uma transição, ou grupo de transições, que sejam impulsionados pelas mesmas variáveis explanatórias, formem um conjunto denominado de sub-modelo de transição.

Os procedimentos inicialmente realizados nesta etapa são:

1. Análise das transições na cobertura do solo entre t_1 e t_2 ;
2. Definição das transições a serem modeladas;
3. Teste e seleção das variáveis explanatórias.

Com isso, foi possível gerar os sub-modelos do potencial de transição para t_3 , adotando-se as metodologias de Rede Neural Multi-Layer Perceptron (RNMLP) e de Regressão Logística (RL).

4.2.2.1 Análise das transições do uso e ocupação do solo entre t_1 e t_2

A análise das mudanças no uso e ocupação do solo pelo LCM foi realizada com base nos mapas de classificação da cobertura do solo para os tempos t_1 (2001) e t_2 (2006). Assim, gerou-se o gráfico de perdas e ganhos por classe de cobertura do solo e o mapa das áreas de mudanças e persistência. Esses produtos serviram como subsídio para a definição das transições, isto é, para definição das mudanças de uma determinada classe para outra.

A partir do gráfico de perdas e ganhos, foi possível identificar a diminuição ou aumento de área de cada classe de cobertura do solo. O mapa de mudança e persistência apontou as áreas que mudaram de uma classe para outra, e as áreas que não sofreram mudanças em sua cobertura.

4.2.2.2 Definição das transições a serem modeladas

As transições no LCM foram definidas com base nas mudanças observadas no uso e ocupação do solo em t_1 , t_2 e t_3 . Para essa definição, levaram-se em consideração os seguintes fatores:

- Impacto da transição, em termos de área;
- Alinhamento com o objetivo de gerar modelos de crescimento urbano;
- Necessidade de simplificação dos modelos, de acordo com o sugerido por Liu (2009).

Deste modo, para modelagem do potencial de transição, optou-se por trabalhar apenas a transição de vegetação para área urbanizada.

4.2.2.3 Teste e seleção das variáveis explanatórias

A seleção das variáveis explanatórias foi baseada no teste V de Cramer, disponibilizado pelo LCM no *software* TerrSet. Este teste permite medir a força, ou intensidade, de associação entre duas variáveis (LUIZ, 2014; LIEBETRAU, 1983). Esse teste é feito de acordo com a Equação (3):

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{n(q-1)}} \quad (3)$$

onde χ^2 é o coeficiente Chi-quadrado dado pela Equação (4):

$$\chi^2 = \frac{(O-E)^2}{2} \quad (4)$$

sendo: V = índice V de Cramer; n = tamanho da amostra; q = menor valor das linhas e colunas da imagem da cobertura do solo; O = frequência observada para uma categoria e E = frequência esperada na categoria correspondente (LIEBETRAU, 1983).

Os valores de V podem variar entre 0 e 1. Valores mais altos indicam que o potencial da variável em explicar as transições, porém não garante uma boa performance, uma vez que não leva em conta as demandas matemáticas da modelagem nem a complexidade das relações. Por outro lado, é um bom indicador para o descarte da variável se o valor for muito baixo. De modo geral, considera-se que as variáveis com valores iguais ou maiores que 0,15 são úteis, enquanto as que possuem valores iguais ou maiores que 0,4 são boas (EASTMAN, 2020). Ao se realizar o teste através do LCM, são fornecidos valores de V global – associando a variável a todas as classes de cobertura do solo, bem como o valor de V para cada uma das classes.

As variáveis explanatórias correspondem aos fatores que podem influenciar na mudança do uso do solo (XAVIER, 2017). Alguns exemplos para casos urbanos são: topografia, declividade, distribuição e presença de infraestrutura básica e de equipamentos urbanos, distância de cursos de água, distância de rodovias, dentre outros.

Foram testadas neste trabalho 14 variáveis:

- a) Distância de comunidades;
- b) Distância de equipamentos públicos de educação;
- c) Distância de equipamentos públicos de esporte;
- d) Distância de rodovias;
- e) Distância do centro histórico delimitado pelo IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional);
- f) Distância do centro histórico delimitado pelo IPHAEP (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico do Estado da Paraíba);
- g) Distância de pontos de ônibus;
- h) Distância de praças;
- i) Distâncias de rios;
- j) Distância de equipamentos públicos de saúde;
- K) Distância de áreas e edificações tombadas;
- l) Distância de Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS);
- m) Modelo digital do terreno (MDT);
- n) Declividade.

As variáveis que envolvem distância foram obtidas a partir do cálculo de distância euclidiana, que calcula e atribui para cada célula do mapa a sua distância para a feição mais

próxima, sendo este tratamento realizado a partir do *software* ArcGIS. Os mapas de distribuição espacial de comunidades, equipamentos públicos, pontos de ônibus, praças, rios, tombamento e ZEIS, bem como a demarcação do centro histórico, foram obtidos com a Divisão de Geoprocessamento e Cadastro, da Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de João Pessoa (FILIPEIA, 2022). Já o mapa da rede rodoviária presente nos limites da cidade foi obtido junto ao IBGE (2018). O modelo digital de terreno e o mapa de declividade também foram obtidos no *software* ArcGIS, a partir do mapa topográfico de curvas de nível fornecido pela Divisão de Geoprocessamento e Cadastro, da Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de João Pessoa (FILIPEIA, 2022).

Foram realizados um total de 19 testes para escolha das variáveis que melhor explicam as transições observadas, distribuídos considerando-se os critérios:

- Todas as variáveis explanatórias, independentemente do valor de V: 1 teste – modelo 1;
- Cada variável explanatória de forma isolada, independentemente do valor de V: 14 testes – modelos 2 a 15;
- Todas as variáveis explanatórias com valor global de V maior que 0,15: 1 teste – modelo 16;
- Todas as variáveis explanatórias com valor de V maior que 0,4 para áreas urbanizadas: 1 teste – modelo 17;
- Todas as variáveis que apresentaram taxa de acurácia pelo método RNMLP (calculada na modelagem do potencial de transição) maior que 60%: 1 teste – modelo 18;
- Todas as variáveis que apresentaram taxa de acurácia pelo método RNMLP (calculada na modelagem do potencial de transição) maior que 65%: 1 teste – modelo 19.

4.2.2.4 Modelagem do potencial de transição usando Rede Neural *Multi-Layer Perceptron*

Nesta pesquisa, foi utilizada a configuração padrão recomendada por Eastman (2020), com número de iterações igual a 10.000, pois foi observado que este número de

iterações fornecia uma curva de erro estável com valores satisfatórios, enquanto quantidades de iterações maiores aumentavam consideravelmente o tempo de execução da modelagem sem trazer melhorias significativas. Após a execução da RNMLP, o método forneceu uma taxa de acurácia que depende da iteração entre as variáveis explanatórias e as transições consideradas.

Segundo Haykin (2001), a RNMLP é baseada em redes neurais artificiais, que podem ser definidos de maneira genérica como modelos matemáticos que atuam simulando o funcionamento das estruturas de redes neurais biológicas, incorporando a capacidade de adquirir conhecimento por meio de um processo de aprendizagem.

Ainda de acordo com o autor (*op. cit.*), as RNMLP, que possuem múltiplas camadas, se diferenciam das redes neurais simples pelo número de camadas intermediárias entre as camadas de entrada e saída. Na camada de entrada, não ocorre nenhum tipo de processamento, apenas a propagação das informações de entrada para a camada seguinte. Já nas camadas intermediárias, que são ocultas, atuam os neurônios ocultos capazes de intervir na rede neural, adicionando uma ou mais camadas ocultas, aumentando assim o poder de solução da rede. Os processamentos ocorrem nesta etapa, sendo transmitidos por meio de conexões entre as camadas de entrada e saída. Cada conexão tem um peso específico. Por fim, na camada de saída, as informações das camadas ocultas são recebidas, e são gerados os produtos finais.

No caso do LCM, a RNMLP é treinada por um algoritmo do tipo *backpropagation* (retro-propagação). Esse algoritmo treina a rede através da aprendizagem por correção dos erros. A partir de uma saída, o erro é calculado, e então são retro-propagados na rede. Durante essa etapa, os pesos nas camadas ocultas são reajustados e novos valores são apresentados à rede. Isso acontece até que o número de iterações, ou que a acurácia da resposta, definidas pelo usuário seja alcançado (LUIZ, 2014).

4.2.2.5 Modelagem do potencial de transição usando Regressão Logística

O método de RL no LCM modela os potenciais de transição a partir de amostras dos mapas de mudanças cujo tamanho é ajustável pelo usuário. Dessa forma, adotou-se a configuração padrão do tamanho da amostra de 10%, considerada satisfatória por Eastman (2020). Segundo esse autor (*op. cit.*), esse tamanho de amostra apresenta um menor tempo de processamento, porém mantendo a eficácia dos resultados.

A análise de regressão logística no LCM é do tipo binomial ($Y = 0$ ou $Y = 1$), sendo equivalente ao caso de transições da cobertura do solo, que possui duas alternativas no momento da transição: permanência da cobertura atual ou transição para outro tipo de cobertura (XAVIER, 2017). A regressão logística binomial descreve a probabilidade de Y (variável dependente) assumir valor 1, dado o conjunto de variáveis independentes (Y), como visto na Equação (5):

$$P(Y = 1/X) = \frac{\exp(\sum BX)}{1+\exp(\sum BX)} \quad (5)$$

onde: P é a probabilidade de Y assumir valor 1, X é o conjunto de variáveis independentes ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$), e B é o conjunto dos coeficientes estimados para o ajuste ($b_0, b_1, b_2, b_3, \dots, b_k$). Neste estudo, a variável dependente corresponde à variação da cobertura do solo e as variáveis independentes correspondem às variáveis explanatórias.

4.2.3 Simulações e validação do modelo

Após definidas as transições a serem modeladas, escolhidas as variáveis explanatórias e determinados os sub-modelos do potencial de transição, partiu-se para a etapa de simulação das mudanças no uso e ocupação do solo e sua posterior validação.

Nesta etapa, utilizou-se os processos da Cadeia de Markov para determinar a probabilidade de mudança de um determinado tipo de uso e ocupação para outro entre t_2 e t_3 . Adicionalmente à matriz de transição, foi incluído no processo um fator de incentivo ou restrição às mudanças.

Com esses dados, é produzido um mapa simulação da cobertura do solo em t_3 , que é comparado ao mapa real de cobertura do solo para essa data. Caso o resultado obtido nessa comparação indique que o modelo é satisfatório, pode-se realizar a previsão de cenários futuros para qualquer ano de escolha. Caso contrário, o modelo é recalibrado, principalmente alterando-se as variáveis explanatórias utilizadas, iniciando-se novamente a etapa de modelagem da transição de potencial.

4.2.3.1 Cadeias de Markov

A partir da modelagem do potencial de transição, foi especificado o tempo t_3 , que consiste no ano cuja imagem será utilizada para a validação do modelo. Para tanto, a probabilidade de mudança foi modelada através da Cadeia de Markov (CM) disponível na modelagem com o LCM. Esse processo é feito a partir do cálculo da probabilidade da distribuição dos valores em um dado estágio de um sistema, sendo que os estágios futuros não dependem dos estágios anteriores, apenas do estágio atual, gerando por fim uma matriz de probabilidade de transição de t_2 para t_3 (LUIZ, 2014; XAVIER, 2017).

4.2.3.2 Inclusão de fatores de incentivo ou restrições às mudanças

Este processo é utilizado para identificar se fatores como incentivos fiscais, reservas ambientais, dentre outros, irão agir como restrição ou incentivo na transição de uso e ocupação do solo em determinadas regiões. Para isto, são utilizados mapas onde se atribui valores reais e positivos como indicativo de restrição ou incentivo, que são multiplicados pelos mapas de transição de potencial associados a cada transição. O valor 0 (zero) no mapa considera uma restrição absoluta, enquanto o valor 1 representa ausência de restrição, não tendo impacto nas transições. Valores entre 0 e 1 indicam que há um desincentivo para as mudanças na região, e valores maiores que 1 agem como incentivo (EASTMAN, 2020).

Considerando que o mapa de zoneamento da cidade de João Pessoa, para este trabalho utilizou os valores:

- a) O valor 0 (zero) para as áreas que compõem a zona de preservação ambiental, na qual não são permitidos desmatamento e consequente urbanização;
- b) O valor 1 (um) para as áreas das zonas de adensamento prioritário, de adensamento não prioritário e não adensável, além das áreas não incluídas em nenhuma zona. Essas zonas não possuem nenhuma restrição à urbanização, porém, os adensamentos prioritário e não prioritário não foram considerados incentivos, pois estão relacionados com o processo de verticalização, i.e., não influencia diretamente na mudança do uso e ocupação do solo. Assim sendo, como esta pesquisa considera apenas a perspectiva horizontal do crescimento urbano, com mudanças na cobertura do solo, todas estas zonas receberam os mesmos valores.

4.2.3.3 Validação do modelo de simulação de mudanças do uso e ocupação do solo

Uma vez determinada a matriz de transição utilizando a Cadeia de Markov, foi obtido o mapa de cobertura do solo simulado para t_3 (2018). Em seguida, foi realizada a validação no LCM para cada mapa simulado com RNMLP e RL. Para realização desse processo, foram necessários o mapa de cobertura simulado e o mapa de cobertura real (classificado) para t_3 .

O processo de validação da simulação de cobertura do solo resulta em um mapa que aponta (EASTMAN, 2020):

- a) Acertos (*hits*): regiões onde se previu transição de um tipo de cobertura do solo para outro e esta transição de fato ocorreu;
- b) Alarmes falsos (*false alarms*): regiões do mapa simulado onde se previu transição de cobertura do solo, porém o mapa de cobertura real demonstrou persistência na cobertura do solo;
- c) Erros (*misses*): regiões em que o modelo previu que haveria persistência no tipo de cobertura do solo, porém o mapa classificado demonstra que houve transição.

Ou seja, neste processo de validação não são destacados os acertos relativos à persistência no tipo de cobertura do solo.

Com o processo de validação, foi possível calibrar o modelo de simulação, alterando-se a combinação de variáveis explanatórias e de métodos de modelagem de potencial de transição até se obter o modelo mais preciso, ou seja, o que apresenta maior precisão e maior acurácia. A precisão foi calculada de acordo com a Equação (6), considerando-se apenas os valores fornecidos pelo mapa de validação:

$$Precisão (\%) = \frac{Acertos}{Acertos+Alarmes\ falsos+Erros} \times 100 \quad (6)$$

Já a acurácia foi calculada levando-se em conta, além dos valores fornecidos pelo mapa de validação, os valores reais das transições que ocorreram no período considerado, sendo obtida a partir da Equação (7):

$$Acurácia (\%) = \frac{Acertos}{Valor\ real\ das\ transições} \times 100 \quad (7)$$

4.2.3.4 Modelagem de cenários futuros de uso e ocupação do solo

A simulação de uso e ocupação do solo para cenários futuros foi realizada após a previsão do potencial de transição e calibração, utilizando-se o modelo cuja combinação entre variáveis explanatórias e o método de modelagem (RNMLP ou RL) apresentou melhor desempenho no processo de validação. Foram modelados cenários de expansão urbana para os anos de 2030, 2035 e 2040.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise da evolução histórica dos índices espectrais entre 1990 e 2016

A Tabela 7 apresenta os valores da área ocupada pelas classes estimadas dos índices NDVI e NDBI, e sua variação percentual no período estudado para a cidade de João Pessoa. Os resultados mostram que a classe de NDVI entre 0,4 – 0,6 foi aquela que apresentou a maior área em todas as imagens. Esses resultados podem ser atribuídos a maior presença de vegetação de porte médio a alto, constituída por árvores esparsas com grandes copas e resquícios de áreas de preservação, sobretudo na porção sul da cidade. Entretanto, os resultados mostram ainda que essa classe foi aquela que apresentou a maior perda de sua área ocupada no período estudado (-65,92%), enquanto a classe 0 – 0,2 foi a única que apresentou aumento da área ocupada (4.62%).

Tabela 7 – Áreas de vegetação e construídas estimadas para a cidade de João Pessoa.

Data	Valores de NDVI					NDBI – Área construída (km ²)
	< 0,0	0 – 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,6	0,6 – 0,8	
	Área (km ²)					
27/06/1990	3,38	5,54	37,95	66,14	63,31	19,67
15/05/1992	1,96	6,58	35,06	79,80	39,02	33,69
26/09/2000	3,43	4,89	24,84	57,22	44,93	60,75
04/08/2001	3,10	2,42	12,49	41,69	72,16	64,26
26/08/2006	2,80	3,13	16,65	47,00	59,74	66,75
08/10/2010	3,32	2,74	14,47	53,87	22,55	99,17
25/11/2016	3,33	5,80	13,65	22,54	43,75	107,11
Variação percentual						
1990 – 2016	-1,54%	4,62%	-64,03%	-65,92%	-30,89%	444,54%

Fonte: Autoria própria.

A Figura 8 apresenta a evolução histórica do uso e ocupação do solo do município, de acordo com as faixas adotadas para os valores NDVI e NDBI. Os resultados mostram que as classes 0,2-0,4, 0,4 – 0,6 e 0,6 – 1,0 vêm apresentando uma tendência de diminuição nos últimos 30 anos , sendo as classes 0,2-0,4 e 0,4-0,6 as que sofreram maior impacto. Essa diminuição da vegetação pode ser atribuída ao avanço de loteamentos habitacionais

na porção sul da cidade e a consolidação da área construída nas porções norte, leste e oeste, uma vez que foi observado também um aumento de área construída.

Esses resultados corroboram com os valores obtidos por Souza *et al.* (2016), que analisaram a influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície em João Pessoa, no qual constataram uma expansão contínua da área urbana nas porções norte, oeste e central da cidade, em detrimento da diminuição da classe de vegetação herbácea. Esses autores destacaram ainda que, apesar dessas porções apresentarem menor crescimento urbano, percebeu-se ainda um maior adensamento das edificações, quando comparado com os anos de 1991 e 2006. Esses valores também estão próximos aos resultados obtidos por Lacerda *et al.* (2021), que reportaram perdas significativas da cobertura vegetal nas últimas duas décadas, na cidade de João Pessoa.

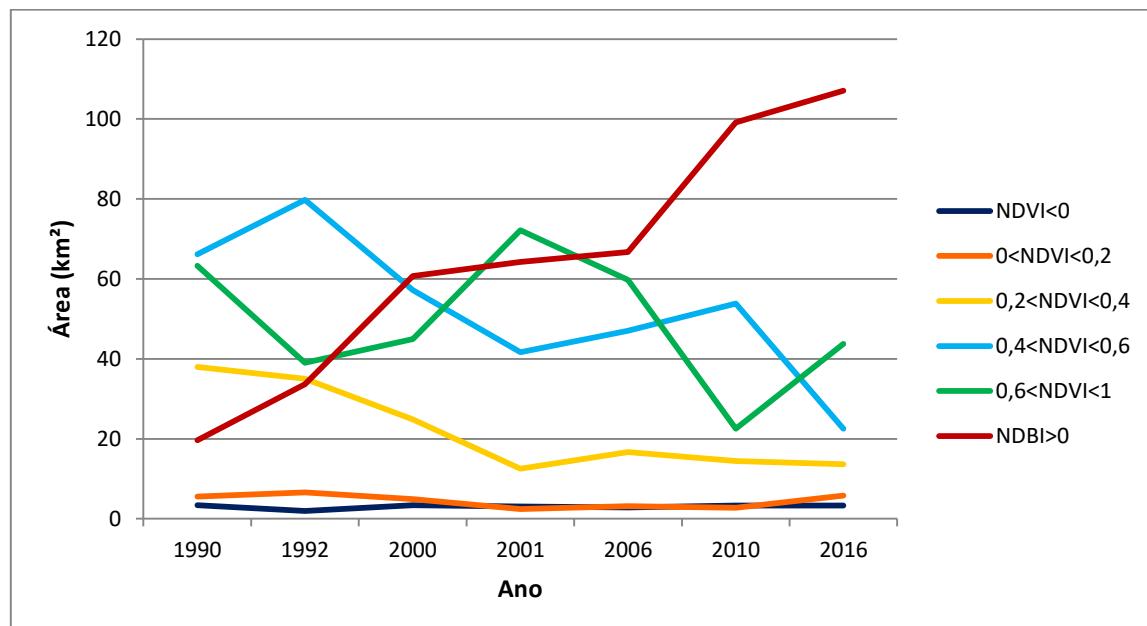


Figura 8 - Evolução histórica do uso e ocupação do solo no município de João Pessoa por índice espectral entre 1990 e 2016 (Fonte: Autoria própria).

Com relação à área construída calculada com base no NDBI, resultados estimados mostram um aumento de aproximadamente 445% entre 1990 e 2016. Esses resultados chamam a atenção para a urgência de um planejamento urbano para o ordenamento territorial em João Pessoa. De acordo com Lacerda *et al.* (2021), a vegetação urbana é responsável por uma série de benefícios de cunho social, como a potencialização do uso dos espaços públicos pelo sombreamento e consequente bem-estar físico e psicológico

proporcionado aos usuários, e ambiental, a exemplo da estabilidade do microclima urbano, garantia da qualidade do ar nas cidades e controle e absorção das águas pluviais.

No entanto, também se observa uma sequência de conflitos e danos à infraestrutura urbana, em decorrência da arborização inadequada, ou seja, deterioração ou inviabilização do passeio público e conflitos com as redes elétrica e de esgoto. Assim, é imperativo o planejamento e da adoção de soluções adequadas pelo responsável por sua execução para assegurar as benesses geradas pela presença da vegetação.

Ante a responsabilidade pela arborização urbana, Yu et al. (2018) destacam que esta cabe à administração municipal, mas dela não é exclusiva, uma vez que a vegetação também pode permear o domínio privado e, nestes espaços, a responsabilidade primordial é delegada ao proprietário. Deste modo, planejamento e execução tornam-se atrelados a um processo colaborativo e que demanda o engajamento entre as esferas da gestão e da sociedade que usufrui da vegetação no cotidiano dos espaços.

Todavia, a realidade em muito se distingue desse pressuposto. Como trata Ribeiro (2009), a função de orientar a sociedade civil quando a arborização se encontra em propriedade privada em pouco se concretiza. Sem a devida orientação e conhecimento técnico adequado, a determinação das espécies incumbe inteiramente ao proprietário e, com isso, o risco de diversos conflitos com o ambiente urbano é drasticamente potencializado, pela espécie inadequada escolhida sem o critério e aval do corpo técnico especializado.

Alguns dos fatores que podem explicar eventuais inconsistências dos resultados são:

- Resolução da imagem: a resolução espacial do Landsat é 30 m, possuindo cada pixel 900 m² de área. Em áreas residências e turísticas da cidade de João Pessoa é admitido o valor mínimo de 360 m² por lote, e vias para circulação de veículos com largura mínima de 3 m, de acordo com a legislação urbanística da cidade. É concebível então, que um mesmo pixel contenha mais de um tipo de cobertura do solo, o que pode gerar diferentes respostas para diferentes imagens (JOÃO PESSOA, 2001);
- Resposta espectral das áreas construídas: por serem índices sensíveis ao comprimento de onda utilizado, superfícies compostas de materiais diferentes, mesmo que dentro de uma mesma categoria de cobertura do solo, irão refletir as

ondas eletromagnéticas de forma diferente, podendo influir na caracterização do pixel (BHATTI e TRIPATHI, 2014);

- Variações climáticas: o mês do ano em que a imagem foi obtida pode indicar a presença ou não da quadra chuvosa da cidade, e consequentemente gerar uma diferença no vigor vegetativo identificado para uma mesma região de vegetação. A diferença dos índices pluviométricos entre um ano e outro, ainda que as imagens sejam de meses próximos, também podem gerar o mesmo efeito.

Assim sendo, se infere do gráfico de NDVI que os valores menores que zero se mostraram aproximadamente constante, indicando a presença de água. Similarmente, se apresentaram relativamente constantes os valores entre 0 e 0,2, que indicam ausência de vegetação, podendo ser também regiões onde há presença tanto de vegetação como de área construída.

Valores entre 0,4 e 0,6, e acima de 0,6, indicam vegetação mais densa e com maior vigor, e graficamente apresentam uma tendência de decréscimo, demonstrando a ocorrência de sua degradação em detrimento do crescimento urbano.

Valores entre 0,2 e 0,6 apresentaram queda mais acentuada, indicando que áreas com médio vigor vegetativo foram as mais impactadas com o crescimento da cidade. Áreas com vigor vegetativo médio podem ser compostas de vegetação arbustiva ou rasteira, mangues, remanescentes de áreas de agricultura, entre outros.

Já áreas com vigor vegetativo alto, representadas por valores acima de 0,6, podem ser constituídas de vegetação de grande porte e matas fechadas, e seu decréscimo menos significativo se dá pela presença das áreas de preservação ambiental. Os valores de NDBI apresentam uma constância do crescimento, ainda que em ritmos diferentes de acordo com os intervalos de datas.

Os mapas apresentados na Figura 9 apresentam uma visão espacial do crescimento da cidade de João Pessoa. Observa-se que entre 1990 e 2006, o crescimento de área construída se deu majoritariamente por preenchimento de vazios nas regiões norte, noroeste e centro da cidade. A partir de 2010, se torna mais intensa a expansão da cidade para as regiões sul e sudoeste.

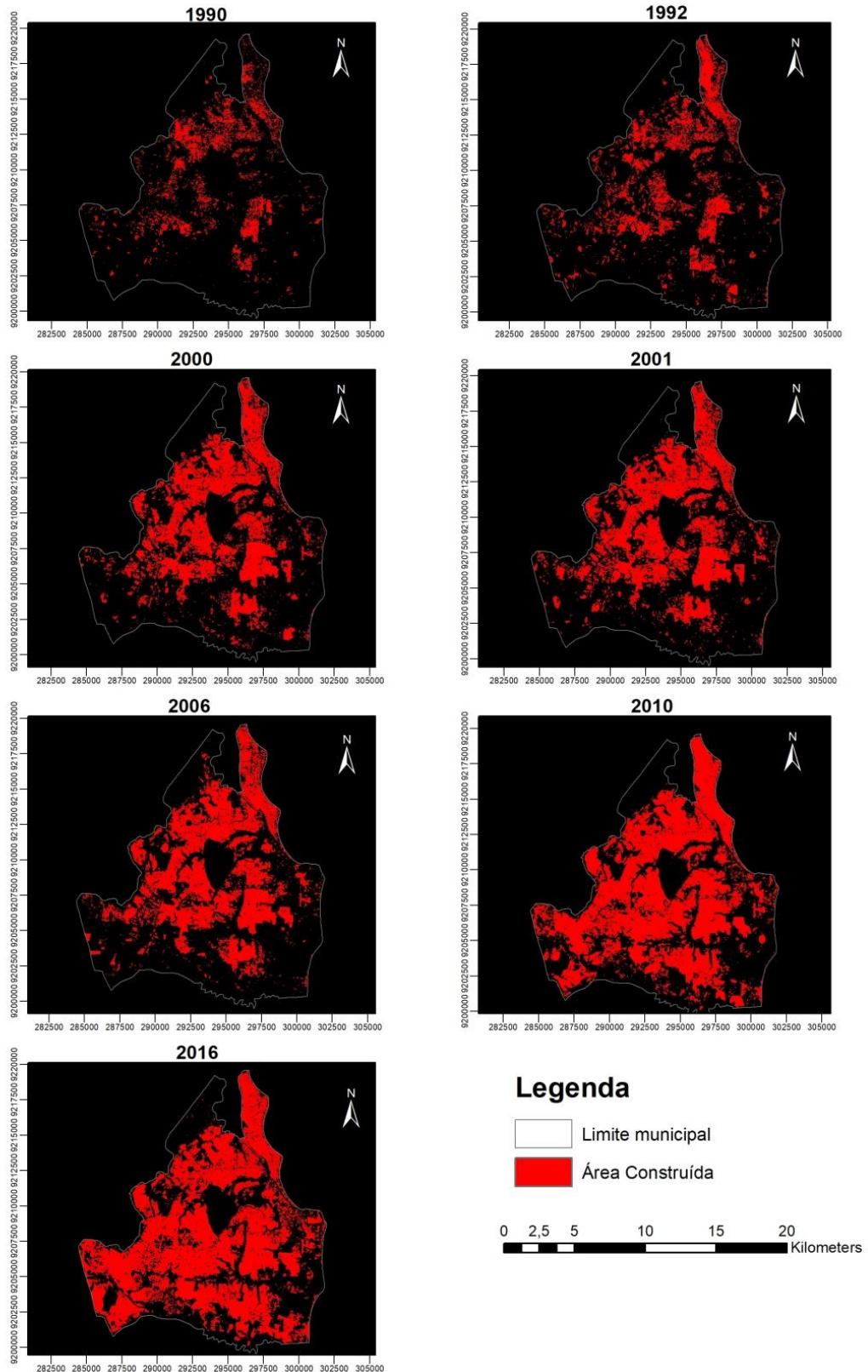


Figura 9 - Mapa da evolução da área construída na cidade de João Pessoa (Fonte: Autoria própria).

A Tabela 8 apresenta os valores estimados de área para o índice NDBI no município de João Pessoa, segmentado por zonas pertinentes ao macrozoneamento urbano, enquanto a Figura 10 demonstra esta informação na forma de gráfico.

Tabela 8 - Área construída estimada por zonas para a cidade de João Pessoa.

Data	NDBI (Área por zona em km ²)				
	Adensamento prioritário	Adensamento não prioritário	Não adensável	Preservação ambiental	Não zoneado
27/06/1990	7,86	6,31	4,00	0,99	0,50
15/05/1992	9,40	11,57	8,40	3,02	1,30
26/09/2000	16,36	20,33	18,12	4,77	1,16
04/08/2001	16,68	21,41	19,72	4,93	1,52
26/08/2006	16,93	22,01	21,79	4,91	1,10
08/10/2010	18,92	31,27	34,48	9,92	4,58
25/11/2016	17,11	30,99	38,83	12,90	7,27

Fonte: Autoria própria.

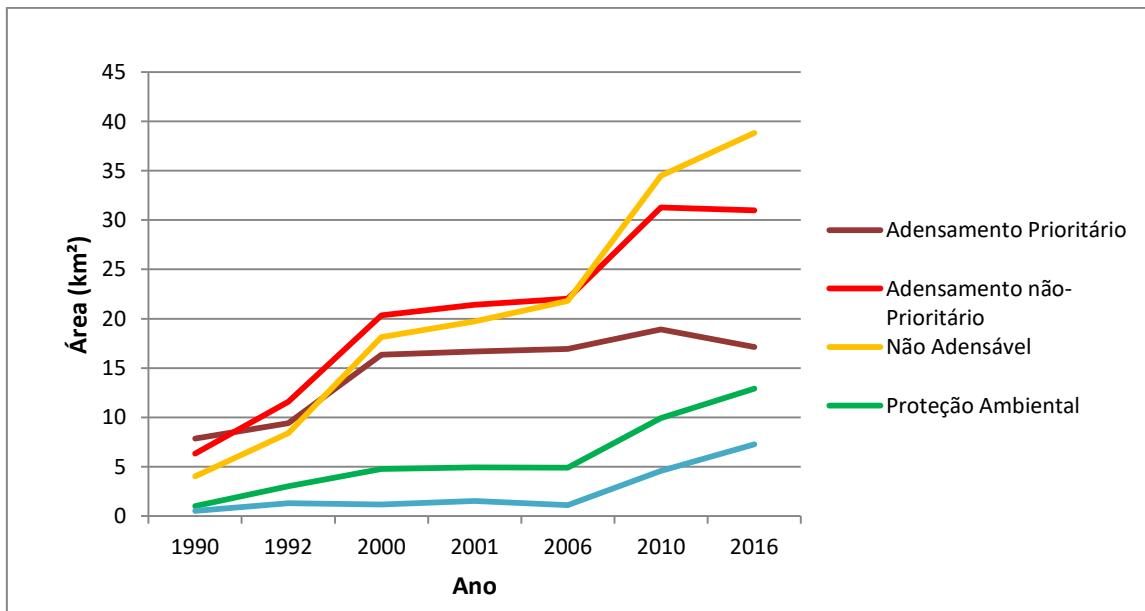


Figura 10 - Evolução da área construída por macrozona entre 1990 e 2016 (Fonte: Autoria própria).

É possível observar que, em termos de crescimento horizontal, a zona de adensamento prioritário atinge um patamar de estabilidade a partir do ano 2000, sofrendo apenas um leve aumento em 2010, e nota-se também que a mesma possui área relativamente limitada quando comparadas com as outras zonas.

Essa zona abrange os bairros da orla marítima, do centro histórico e das proximidades da Universidade Federal da Paraíba, que representam em parte as primeiras regiões a serem urbanizadas no município, e em parte regiões de grande interesse imobiliário. Assim sendo, é razoável considerar que a mesma atingiu o seu limite de expansão horizontal no início da década de 2000, mas que continuou crescendo em termos de população a partir do processo de verticalização, estando consoante com a sua própria definição.

Em relação às zonas de adensamento não-prioritário e não adensável, por outro lado, observou-se que estas apresentaram os maiores crescimentos em área, informação também condizente com suas definições. Por terem preferência ao não adensamento, e por terem maior área disponível, observou-se expansão urbana de forma intensa nestas zonas. Constatação similar se faz referente às regiões não zoneadas, as quais se comprehende que não há restrições ao crescimento. Apesar de terem área relativamente pequena, estas regiões abrigaram crescimento urbano considerável a partir de 2010.

Por fim, a zona de preservação ambiental, na qual se considerou também o setor de exploração mineral e o setor de deposição e tratamento de resíduos líquidos, é uma zona na qual a previsão de processos de urbanização é mínimo. Porém, observa-se que também houve crescimento considerável de área construída, indicando possíveis invasões a áreas preservadas.

Assim sendo, de modo geral, constata-se que os instrumentos de planejamento e ordenamento urbano do município de João Pessoa, em especial a lei de macrozoneamento urbano, mostrou eficácia no direcionamento do crescimento, com exceção da zona de preservação ambiental.

5.2 Modelagem de cenários futuros de uso e ocupação do solo

5.2.1 Classificação de uso e ocupação do solo para t_1 , t_2 e t_3

A Figura 11 mostra a espacialização das classes de uso e ocupação, que foram identificadas no município de João Pessoa, a partir da classificação supervisionada dos tipos de cobertura do solo, pelo método da máxima verossimilhança, para t_1 (2001).

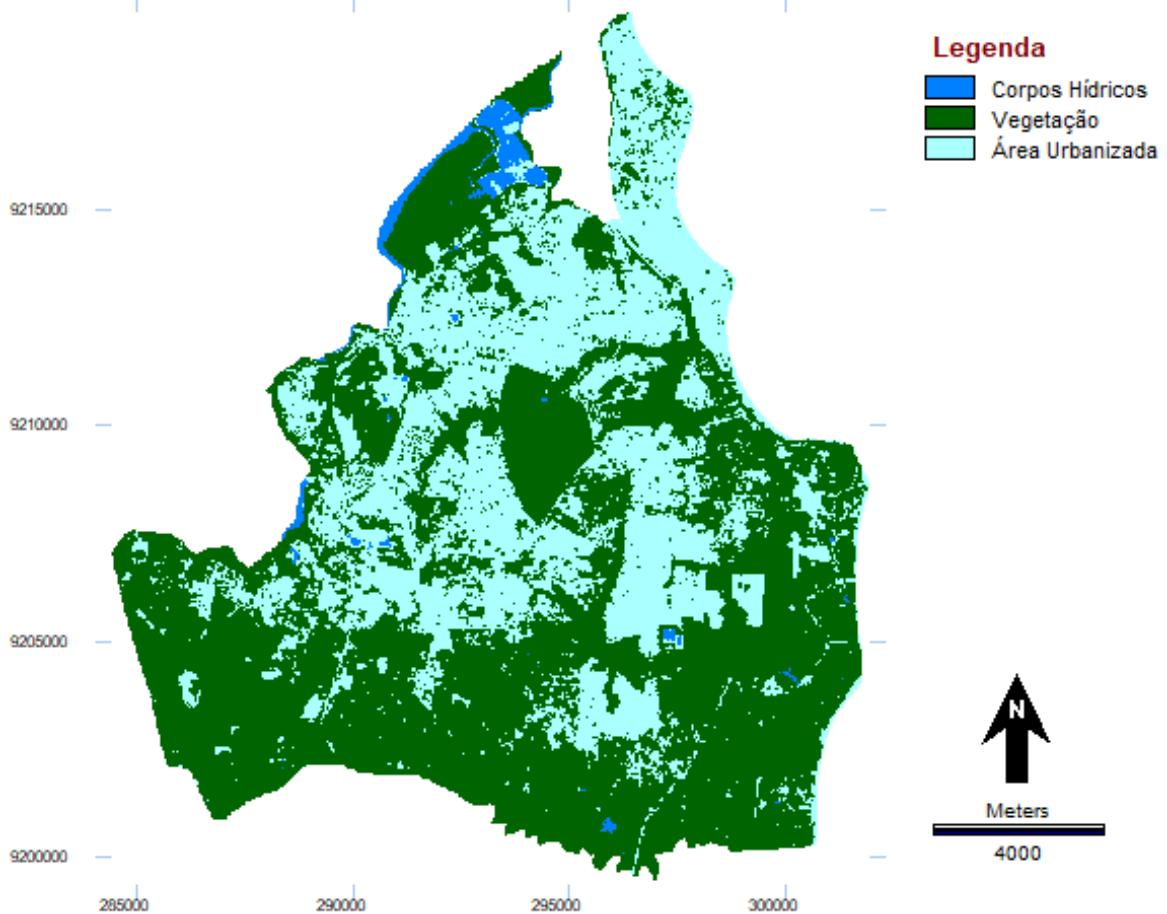


Figura 11 - Mapa de cobertura do solo para o município de João Pessoa em 2001. (Fonte: Autoria própria)

Neste ano, a classe que ocupava a maior área da cidade era a de vegetação, preenchendo 61,63% de sua superfície, seguida pela área urbanizada que ocupava 36,70% da área total. Por fim, a classe que ocupava menor área era a dos corpos hídricos, ocupando apenas 1,67% da área total do município. Observa-se que a área urbanizada se encontra ordenada de forma mais densa e contínua nas regiões norte, nordeste e central da cidade, apresentando nas regiões sul e sudeste uma configuração predominantemente formada de pequenos aglomerados urbanos esparsamente distribuídos. Já a área de vegetação, nas regiões norte e central, encontram-se concentradas em pequenas áreas isoladas, devido a existência de zonas de preservação ambiental, ocupando maior espaço, de forma mais espalhada, ao sul da cidade.

A Figura 12 apresenta o mapa de cobertura do solo para o município de João Pessoa em t_2 (2006), na qual é possível observar que, em 2006, a classe de vegetação continua sendo predominante no município de João Pessoa, ocupando 56,44% de sua área,

enquanto a área urbanizada ocupava 42,12% e os corpos hídricos ocupavam 1,44% da extensão da cidade.

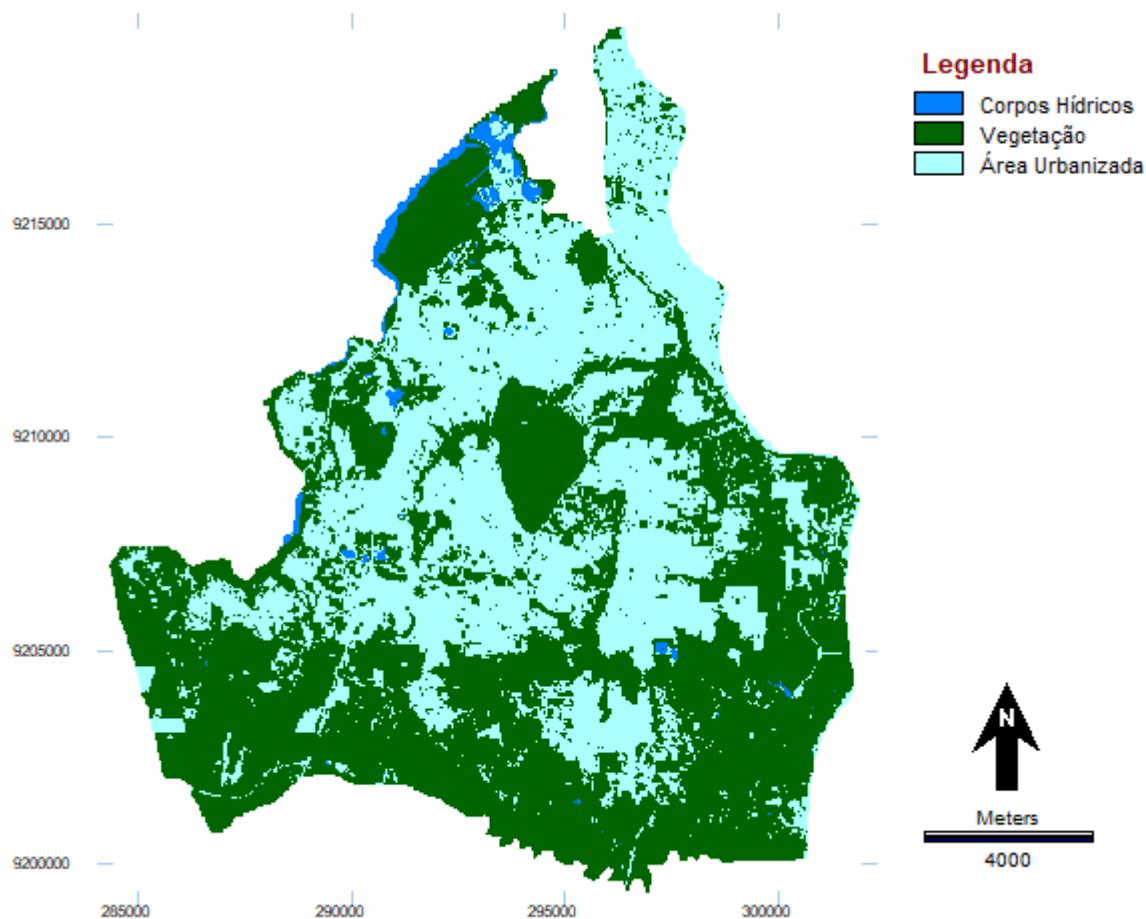


Figura 12 - Mapa de cobertura do solo para o município de João Pessoa em 2006. (Fonte: Autoria própria)

Observa-se, então, que apesar da classe vegetativa ser a que ocupa maior área da cidade, houve um crescimento na classe de área urbanizada. Constatase também que este crescimento ocorre tanto por intensificação de construção e substituição de áreas de vegetação em áreas já urbanizadas, como pelo surgimento de aglomerados nas regiões a sul da cidade.

A Figura 13 apresenta o mapa de cobertura do solo para o município de João Pessoa em t3 (2018). Como nos anos anteriormente apresentados, em 2018 a classe de vegetação ainda ocupa maior parte do território urbano, seguido pela área urbanizada e pelos corpos hídricos, ocupando, respectivamente, 53,95%, 44,06% e 1,99% do município de João Pessoa. Neste ano, a transição da cobertura do solo de vegetação para área urbanizada ocorreu de forma mais moderada, porém mais dispersa, principalmente na

região centro-sul. A Tabela 9 resume os dados de cobertura do solo citados ao longo deste tópico.

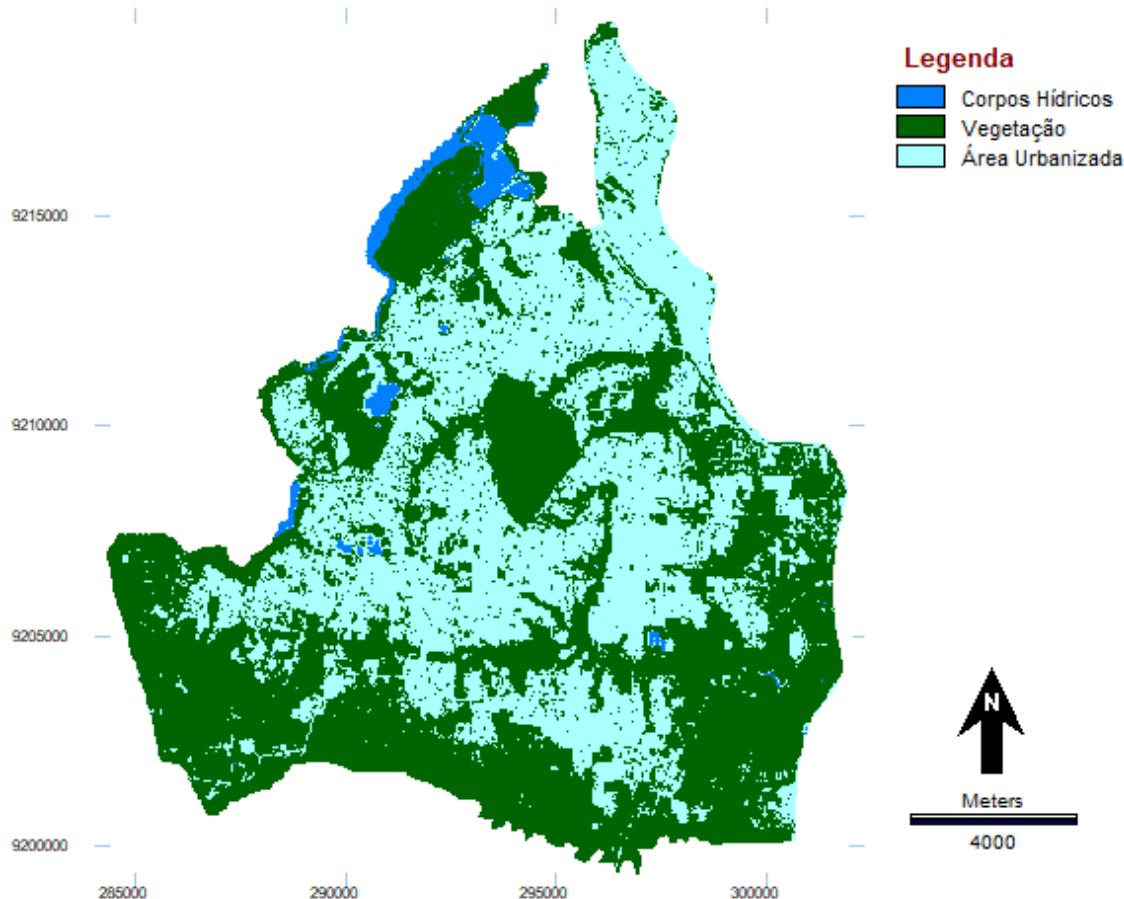


Figura 13 - Mapa de cobertura do solo para o município de João Pessoa em 2018. (Fonte: Autoria própria)

Tabela 9 - Cobertura do solo para a cidade de João Pessoa em t_1 , t_2 e t_3 .

Classes	Área ocupada					
	2001		2006		2018	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Corpos hídricos	3,24	1,67%	2,79	1,44%	3,87	1,99%
Vegetação	119,78	61,63%	109,7	56,44%	104,85	53,95%
Área urbanizada	71,34	36,70%	81,87	42,12%	85,64	44,06%

Fonte: Autoria própria.

5.2.2 Análise nas mudanças do uso e ocupação do solo entre t_1 e t_2

Com base nos mapas de cobertura do solo em t_1 (2001) e t_2 (2006), foram gerados com o LCM o gráfico de perdas e ganhos para cada classe de cobertura do solo e o mapa com as áreas de mudança, que serviram de auxílio para a definição das transições.

A Figura 14 apresenta o gráfico de perdas e ganhos por classe de cobertura do solo entre 2001 e 2006. Este gráfico demonstra que as maiores mudanças ocorreram com a substituição de áreas vegetadas por área urbanizada corroborando com o que foi observado nos mapas de classificação do solo, apresentados no item anterior.

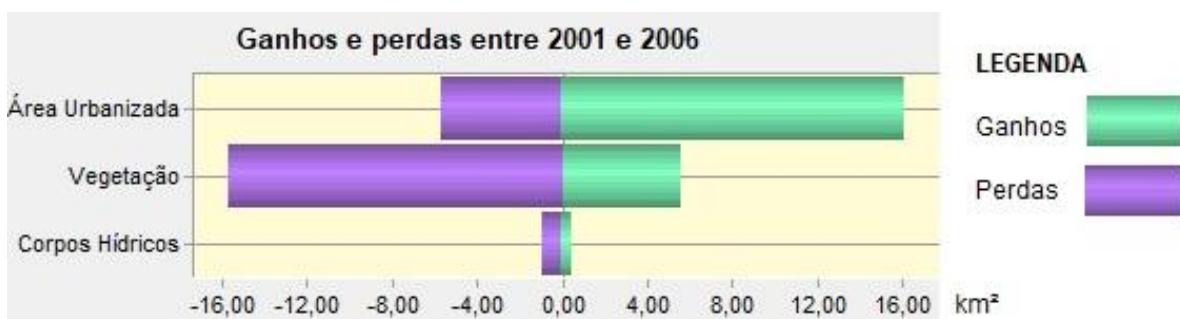


Figura 14 - Ganhos e perdas na cobertura do solo entre 2001 e 2006 para o município de João Pessoa (Fonte: Autoria própria).

A Figura 15 mostra o mapa de mudança de classe de cobertura do solo para o período citado. Transições entre classes que apresentaram área menor que 1 km² foram consideradas desprezíveis, não estando representadas no mapa. A partir deste, é possível visualizar de forma mais clara a tendência de mudança descrita a partir dos mapas de classificação do uso e ocupação do solo, apresentados nas Figuras 11 e 12. Transições de áreas de vegetação para área urbanizada ocorreram de forma esparsa por toda a extensão da cidade, preenchendo vazios urbanos, mas também se observa o surgimento de novas concentrações urbanas mais extensas em regiões anteriormente ocupadas por vegetação no sul da cidade.

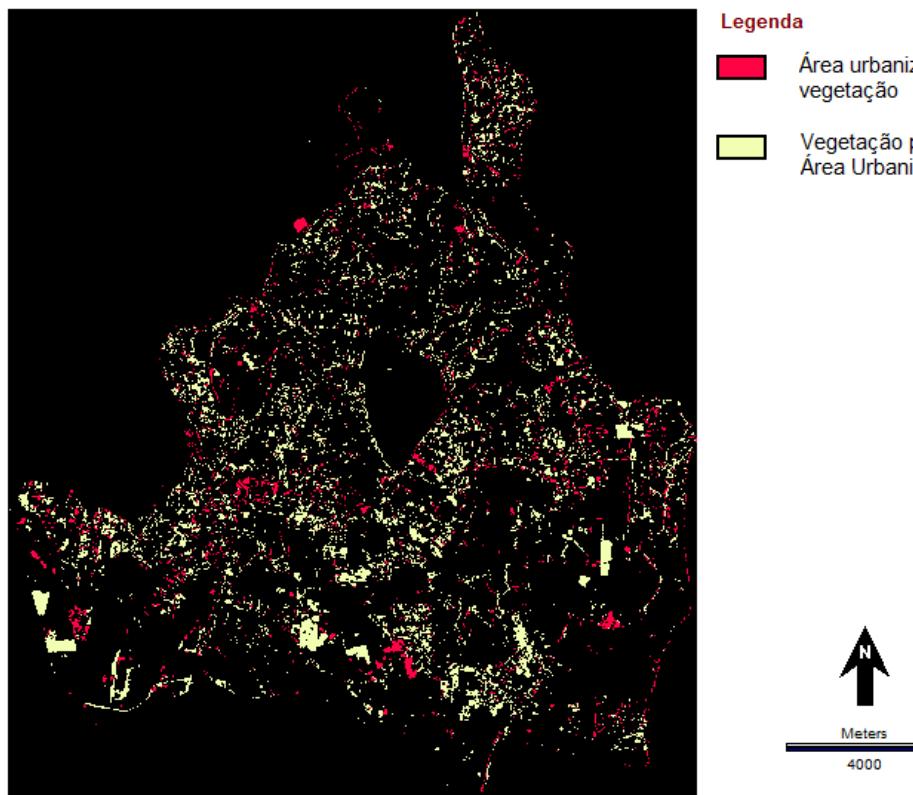


Figura 15 - Mapa de mudanças de classe de cobertura do solo entre 2001 e 2006 (Fonte: Autoria própria).

O mapa também aponta, em menor proporção, para o movimento de conversão contrário ao esperado, com áreas identificadas como urbanas sendo convertidas em vegetação. Apesar de não ter sido identificado o motivo de este fenômeno ocorrer, supõe-se que alguns fatores podem ter influenciado, sendo eles:

- A escolha por reduzir a quantidade de classes utilizadas levou à inclusão de regiões de solo descoberto na classe de área urbanizada. Assim, as variações, sazonais ou não, no regime de chuvas pode ter levado ao crescimento de vegetação em solos expostos, gerando mudança de classificação desses espaços;
- A metodologia de classificação está sujeita a erros, fato agravado quando se considera que, em estudos de regiões urbanas, a resolução espacial das imagens utilizadas facilita a ocorrência de imprecisões;

5.2.3 Seleção das variáveis explanatórias

A Tabela 10 mostra as variáveis explanatórias testadas e o resultado do teste de V de Cramer. Observa-se que, de modo geral, apenas as variáveis declividade e distância de

ZEIS apresentaram valor global menor que 0,15, porém nenhuma variável apresentou valor global de V maior que 0,4.

Tabela 10 - Resultados do teste de V de Cramer para as variáveis explanatórias

<i>Variável</i>	Valor V de Cramer			
	Global	Vegetação	Área urbanizada	Corpos hídricos
Distância de comunidades	0,2294	0,0932	0,3790	0,0000
Distância de equipamentos públicos de educação	0,2776	0,1445	0,4439	0,0000
Distância de equipamentos públicos de esporte	0,1942	0,1121	0,3046	0,0000
Distância de rodovias	0,1846	0,2895	0,1276	0,0000
Distância do centro histórico delimitado pelo IPHAN	0,2733	0,1707	0,4467	0,0000
Distância do centro histórico delimitado pelo IPHAEP	0,2678	0,1620	0,4410	0,0000
Distância de pontos de ônibus	0,3438	0,1971	0,5411	0,0000
Distância de praças	0,3158	0,1387	0,5147	0,0000
Distâncias de rios	0,1749	0,1023	0,2704	0,0000
Distância de equipamentos públicos de saúde	0,2972	0,1306	0,4826	0,0000
Distância de áreas e edificações tombadas	0,2320	0,1133	0,3889	0,0000
Distância de ZEIS	0,1462	0,1052	0,2201	0,0000
Modelo digital do terreno	0,2709	0,2397	0,3827	0,0000
Declividade	0,1175	0,1065	0,1787	0,0000

Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, considerando-se que esta pesquisa tem como foco as mudanças que ocorrem na classe de cobertura do solo de área urbanizada, todas as variáveis relacionadas à esta classe apresentaram valor de V maior que 0,15, com exceção da variável distância de rodovias.

Além disso, 6 variáveis apresentaram valor maior que 0,4 quando testadas para a classe de área urbanizada, indicando uma forte correlação, sendo elas: distância de equipamentos públicos de educação, distância do centro histórico delimitado pelo IPHAN, distância do centro histórico delimitado pelo IPHAEP, distância de pontos de ônibus, distância de praças e distância de equipamentos públicos de saúde.

Como dito no item 4.2.2.3, nos testes para as escolhas das variáveis explanatórias considerou-se também o valor da taxa de acurácia pelo método RNMLP, fornecido pelo próprio programa durante o processo de modelagem do potencial de transição por este método, já que esta taxa também funciona como um indicativo da força da correlação entre as transições consideradas e as variáveis explanatórias escolhidas. A Tabela 11 apresenta

os resultados de taxa de acurácia de forma simplificada, destacando apenas os modelos cujas combinações de variáveis resultaram em taxas maiores que 60%.

Tabela 11 - Resultados de taxa de acurácia pelo método RNMLP para os modelos estudados (simplificado).

Variável	Modelo							
	1	2	3	4	7	8	9	11
Distância de comunidades	x	x						
Distância de equip. públicos de educação	x			x				
Distância de equip. públicos de esporte	x				x			
Distância de rodovias	x							
Distância do centro histórico IPHAN	x					x		
Distância do centro histórico IPHAEP	x							
Distância de pontos de ônibus	x					x		
Distância de praças	x						x	
Distância de rios	x							
Distância de equip. públicos de saúde	x							x
Distância de áreas e edificações tombadas	x							
Distância de ZEIS	x							
Modelo digital do terreno	x							
Declividade	x							
Taxa de acurácia RNMLP (%)	76,03	61,44	66,37	62,51	60,93	71,09	63,86	65,71
Variável	Modelo							
	16	17	18	19				
Distância de comunidades	x		x					
Distância de equip. públicos de educação	x	x	x	x				
Distância de equip. públicos de esporte	x			x				
Distância de rodovias	x							
Distância do centro histórico IPHAN	x	x	x	x				
Distância do centro histórico IPHAEP	x	x	x	x				
Distância de pontos de ônibus	x	x	x	x				x
Distância de praças	x	x	x	x				
Distância de rios	x							
Distância de equip. públicos de saúde	x	x	x	x				x
Distância de áreas e edificações tombadas	x							
Distância de ZEIS								
Modelo digital do terreno	x							
Declividade								
Taxa de acurácia RNMLP (%)	75,49	72,34	73,15	72,11				

Fonte: Autoria própria.

5.2.4 Modelagem do potencial de transição e matriz de probabilidade de transição em t₃ (2018)

A Figura 16 mostra a projeção do potencial de transição de classe de cobertura do solo, de vegetação para área urbanizada, indicando o potencial para mudança da área de estudo pelos métodos: a) RNMLP e b) RL.

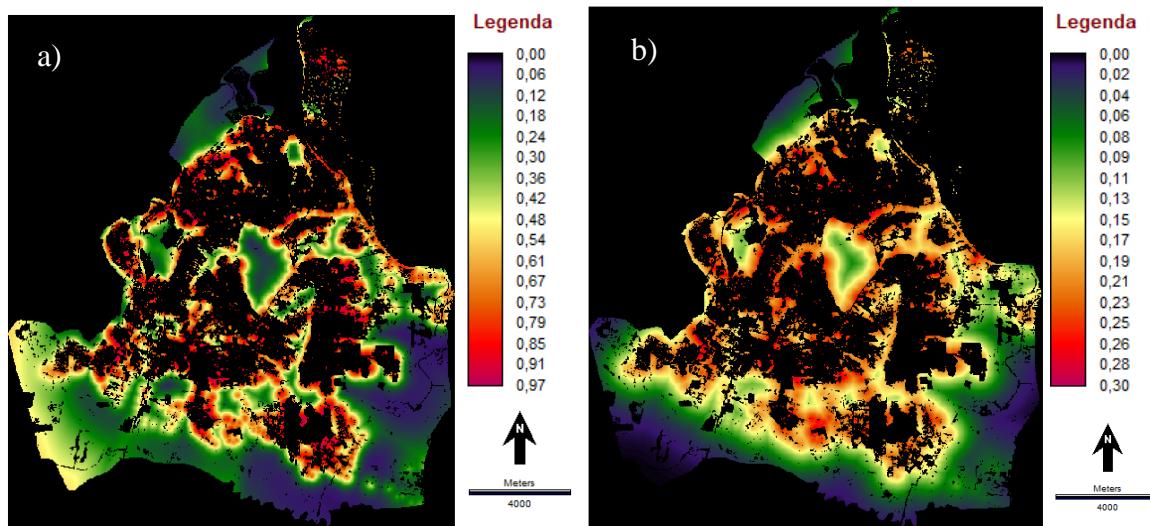


Figura 16 - Potencial de transição da cobertura do solo usando os métodos (a) RNMLP e (b) RL (Fonte: Autoria própria)

Os mapas acima demonstram que a modelagem pelo método RNMLP resulta em potenciais de transição elevados, chegando a quase 1, enquanto pelo método RN os valores de potencial de transição não ultrapassam 0,3. Além disso, pelo método RNMLP, observa-se que alteração de um valor de potencial de transição para outro ocorre de forma mais abrupta, enquanto pelo método RL esta alteração é mais suave. Em ambos os mapas, porém, observa-se que os maiores valores estão dispostos no limite entre a área urbana e a vegetação, ou seja, mais próximos do centro urbano, e diminui nas regiões periféricas da cidade, atingindo seus menores valores próximos à fronteira do município.

A Tabela 12 apresenta a matriz de probabilidade de transição da cobertura do solo de t₂ (2006) para t₃ (2018) obtida pela Cadeia de Markov. Na matriz de transição, as linhas correspondem às categorias de cobertura solo em t₂ e as colunas ao período t₃. Os resultados da diagonal, destacados na cor cinza, representam os percentuais de probabilidade de persistência, enquanto os demais resultados correspondem aos percentuais de probabilidade de mudança de uma categoria de cobertura do solo para outra.

Tabela 12 - Matriz de probabilidade de transição da cobertura do solo de t_2 para t_3 .

		2018		
		Corpos hídricos	Vegetação	Área urbanizada
2006	Corpos hídricos	0,4152	0,2135	0,3713
	Vegetação	0,0030	0,7278	0,2692
	Área urbanizada	0,0103	0,1537	0,8360

Fonte: Autoria própria.

É possível perceber na matriz que a classe de cobertura de área urbanizada é a que tem maior probabilidade de persistência. Esta observação é condizente com a lógica de crescimento urbano, onde a área urbanizada tende a ocupar áreas de vegetação, porém o movimento inverso é mais difícil de ocorrer. Por outro, observa-se que a probabilidade de persistência para a classe de vegetação ainda é alta, indicando que a transição para a classe de área urbanizada ocorre de forma moderada, fato também observado na comparação dos mapas de classificação de uso e ocupação do solo. Por fim, de acordo com a matriz, a classe dos corpos hídricos é a que possui menor probabilidade de persistência, sendo esta abaixo de 50%.

As transições da classe dos corpos hídricos para as classes de vegetação e de área urbanizada estão entre as mais suscetíveis a ocorrer, com probabilidade de mudança de 21,35% e 37,13%, respectivamente. Porém, como visto anteriormente, estas transições são desprezíveis quando analisadas a partir de seu valor absoluto. A outra transição que apresentou probabilidade alta de ocorrência foi a de vegetação para área urbanizada, sendo esta probabilidade de 26,92%, sendo um resultado que está alinhado com o objetivo da pesquisa de analisar e prever o crescimento urbano.

5.2.5 Simulação e validação do uso e ocupação do solo em t_3 (2018)

Como visto no item 5.2.3, foram realizados diversos testes para diversas combinações de variáveis explanatórias, considerando-se os valores de V de Cramer e a taxa de acurácia no método RNMLP, fornecida no processo de cálculo do potencial de transição. Estes testes, juntamente com o processo de validação, tiveram como propósito auxiliar na escolha do modelo a ser utilizado para a previsão dos cenários futuros.

A Tabela 13 apresenta os resultados de precisão e acurácia obtido no processo de validação para os diversos modelos, sendo selecionado para a simulação dos cenários futuros aquele que apresentou melhores respostas. Foi escolhido então o modelo 18, que combinou todas as variáveis que apresentaram taxa de acurácia pelo método RNMLP

maior que 60%. A Figura 17 mostra os mapas do modelo 18 de cobertura do solo simulados para t_3 (2018) usando os métodos (a) RNMLP, e (b) RL.

Tabela 13 - Resultados obtidos na validação dos modelos.

Modelos	Valores (%)			
	Precisão		Acurácia	
	RNMLP	RL	RNMLP	RL
Modelo 1	23,52	21,66	67,08	62,71
Modelo 2	21,93	20,44	63,72	60,12
Modelo 3	22,21	20,04	64,38	59,15
Modelo 4	21,74	19,72	63,26	58,35
Modelo 5	18,03	16,77	54,12	50,88
Modelo 6	21,39	19,00	62,40	56,55
Modelo 7	21,21	18,43	61,99	55,14
Modelo 8	24,04	21,54	68,67	62,80
Modelo 9	21,97	20,21	63,81	59,56
Modelo 10	16,58	15,47	50,39	47,47
Modelo 11	23,06	20,71	66,38	60,78
Modelo 12	19,07	17,94	56,72	53,89
Modelo 13	20,36	19,17	59,93	57,00
Modelo 14	19,93	18,56	58,87	55,46
Modelo 15	18,74	17,33	55,92	52,34
Modelo 16	23,65	21,66	67,77	63,08
Modelo 17	24,29	22,00	69,25	63,89
Modelo 18	24,73	22,08	70,24	64,07
Modelo 19	23,44	21,99	67,27	63,87

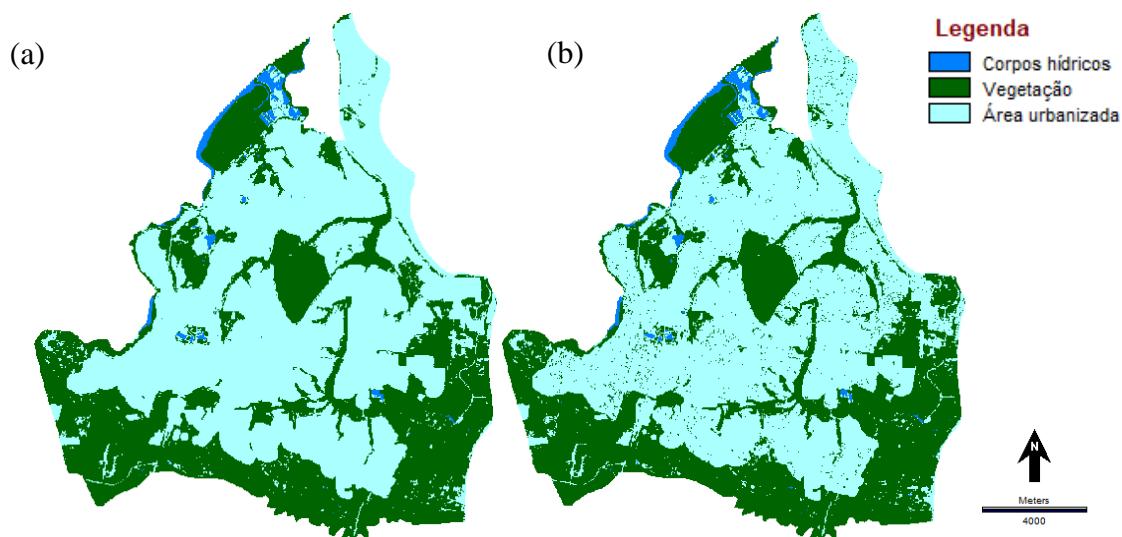


Figura 17 - Mapa de simulação da cobertura do solo em 2018 pelos métodos a) RNMLP e b) RL (Fonte: Autoria própria)

Ambas as projeções apresentam movimento de crescimento urbano semelhantes, com a classe de área urbanizada ocupando espaços antes pertencentes à classe de vegetação

na região centro-sul da cidade e, em menor proporção, na região sudoeste. A diferença entre as duas projeções se encontra principalmente na continuidade espacial das classes de uso e ocupação do solo na região urbana. A projeção pelo método RNMLP apresenta a classe de área urbana bastante densa e contínua, enquanto na projeção pelo método RL, esta classe é esparsamente pontilhada com pequenas áreas de vegetação.

Observa-se também, nas duas projeções, que devido às restrições impostas pelo zoneamento urbano do município de João Pessoa, ainda existem grandes manchas de vegetação no interior de áreas urbanizadas. Estas, porém, se expandiram o máximo permitido, ocupando toda a região limítrofe das zonas de proteção de ambiental.

Em termos numéricos, o processo de projeção de cobertura para o ano de 2018 resultou nas seguintes áreas mostradas na Tabela 14. A Figura 18 apresenta a espacialização da validação realizada pelo LCM da cobertura do solo simulado para t_3 (2018) usando: (a) RNMLP e (b) RL.

Tabela 14 - Cobertura do solo simulado para a cidade de João Pessoa em 2018.

Classe de cobertura do solo	Área ocupada (km ²)	
	RNMLP	RL
Corpos hídricos	2,7891	2,7891
Vegetação	80,1720	80,1666
Área urbanizada	111,3921	111,3975

Fonte: Autoria própria.

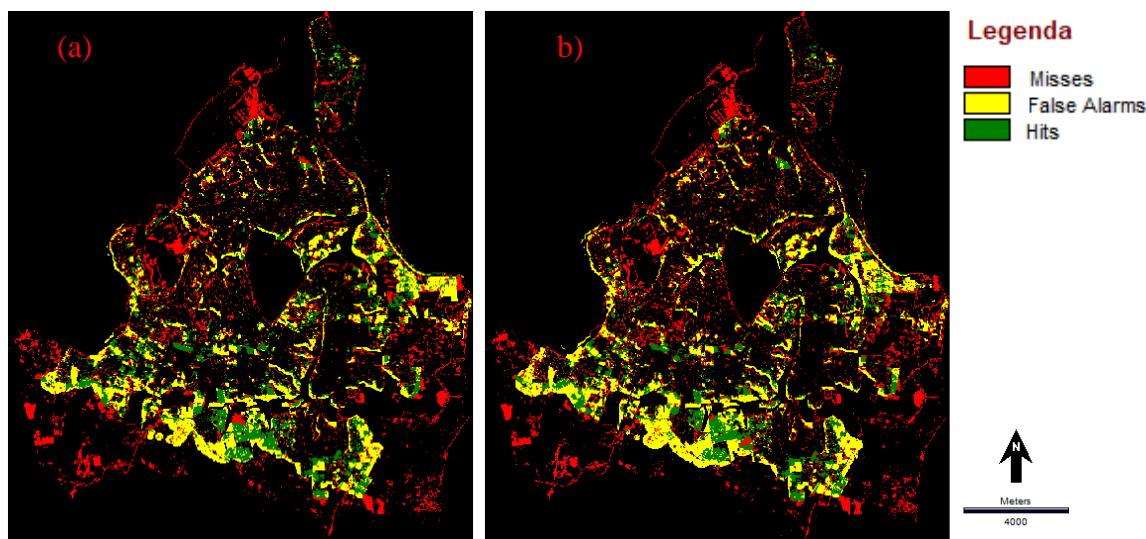


Figura 18 - Validação da cobertura do solo simulado para 2018 pelos métodos (a) RNMLP e (b) RL (Fonte: Autoria própria)

Como os mapas de projeção pelos métodos RNMLP e RL apresentaram semelhança quanto à sua distribuição espacial, naturalmente os mapas de validação também são similares. A ocorrência tanto de acertos como de falsos alarmes se concentraram nas porções leste, centro sul e sudoeste da cidade, enquanto os erros se distribuem de forma mais ou menos uniforme ao longo do território. Ou seja, observa-se um contraste entre a concentração espacial dos alarmes falsos e a dispersão espacial dos erros.

Retomando a Tabela 13, observa-se que as simulações, de modo geral, forneceram acurácia relativamente alta, porém precisão baixa. Esta informação, associada à Tabela 14 e à Figura 18, indica que o modelo de simulação de uso e ocupação do solo previu um crescimento urbano mais intenso do que de fato ocorreu. Ou seja, a alta acurácia ocorre porque a projeção da transição da classe de vegetação para a de área urbanizada atinge uma grande porção da superfície do município, acabando por englobar também as áreas onde esta transição de fato ocorreu. No entanto, este movimento gera também nos falsos alarmes, ou seja, previsão de transição onde na realidade houve permanência na cobertura do solo, o que configura uma espécie de erro para o modelo e acaba resultando em perda de precisão.

Observa-se um contraste entre a concentração espacial dos alarmes falsos e a dispersão espacial dos erros. Isto ocorre porque os modelos de projeção são estatísticos, e ao analisarem um *pixel*, consideram mais prováveis a transição de uma classe para outra se este *pixel* já está em contato com outro que pertence à nova classe. Esta ponderação é condizente com a observação realizada na análise dos mapas de potencial de transição. Assim sendo, o modelo é falho na previsão de crescimento em áreas mais distantes do centro urbano.

5.2.6 Simulação de cenários de uso e ocupação do solo para 2030, 2040 e 2050

A Figura 19 mostra a simulação de cobertura do solo pelo método RNMLP para os anos: a) 2030, b) 2035 e c) 2040. Por este método, na projeção para o ano de 2030 observa-se um crescimento significativo na classe de cobertura de área urbanizada, com destaque para as regiões sudoeste e centro-sul, passando a ser a classe de cobertura dominante no município.

Nas regiões ao norte e ao centro da cidade, onde a classe urbana já era expressiva, observa-se espaços totalmente preenchidos por este tipo de cobertura, sendo os únicos

vazios não construídos as zonas de preservação ambiental. O mesmo movimento observa-se na projeção para 2035, havendo agora, porém, transição de vegetação para área urbanizada também na porção sudeste da cidade.

Já para o ano de 2040, a projeção de cobertura do solo é bastante semelhante à de 2035, com pequeno aumento da área urbanizada apenas na região sudoeste da cidade. Todavia, observa-se o surgimento de uma tarja horizontal na porção norte do mapa, que foi destacada, classificada como área urbanizada.

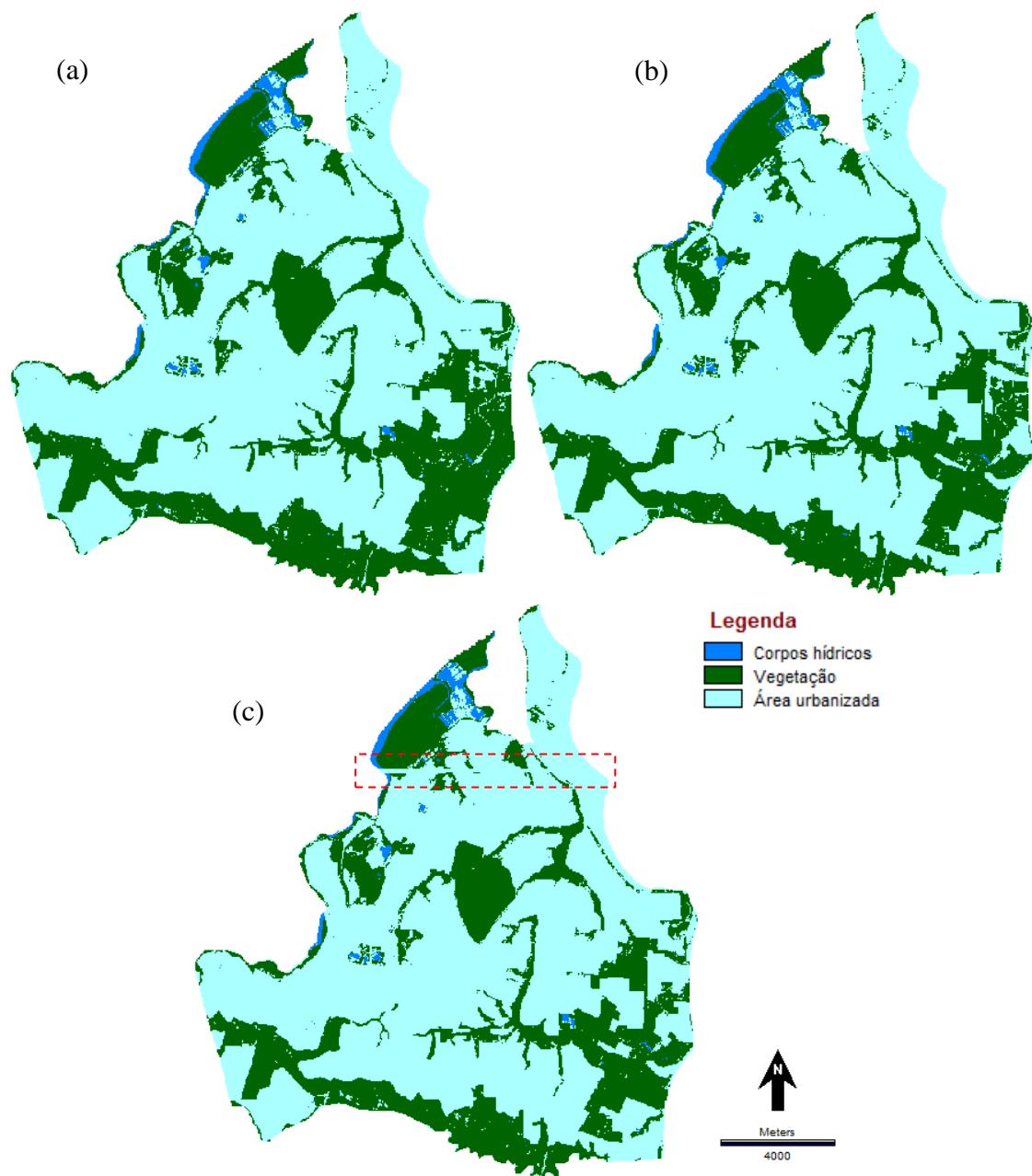


Figura 19 - Simulação de cobertura do solo pelo método RNMLP para os anos (a) 2030, (b) 2035, e (c) 2040 (Fonte: Autoria própria)

Essa tarja é o resultado de um processo de superalocação, ou seja, o modelo continua prevendo crescimento da classe de área urbanizada em um território que não possui mais espaço disponível para tal. Assim, o programa acaba por alocar as novas áreas desta classe de forma aleatória no segundo plano do mapa ou sobre outras classes. Isso implica que em algum momento entre o período de 2035 a 2040, a cidade atingiu sua capacidade máxima de expansão horizontal urbana, respeitando os limites do seu zoneamento. A Figura 20 mostra a simulação de cobertura do solo pelo método RL para os anos: a) 2030, b) 2035 e c) 2040.

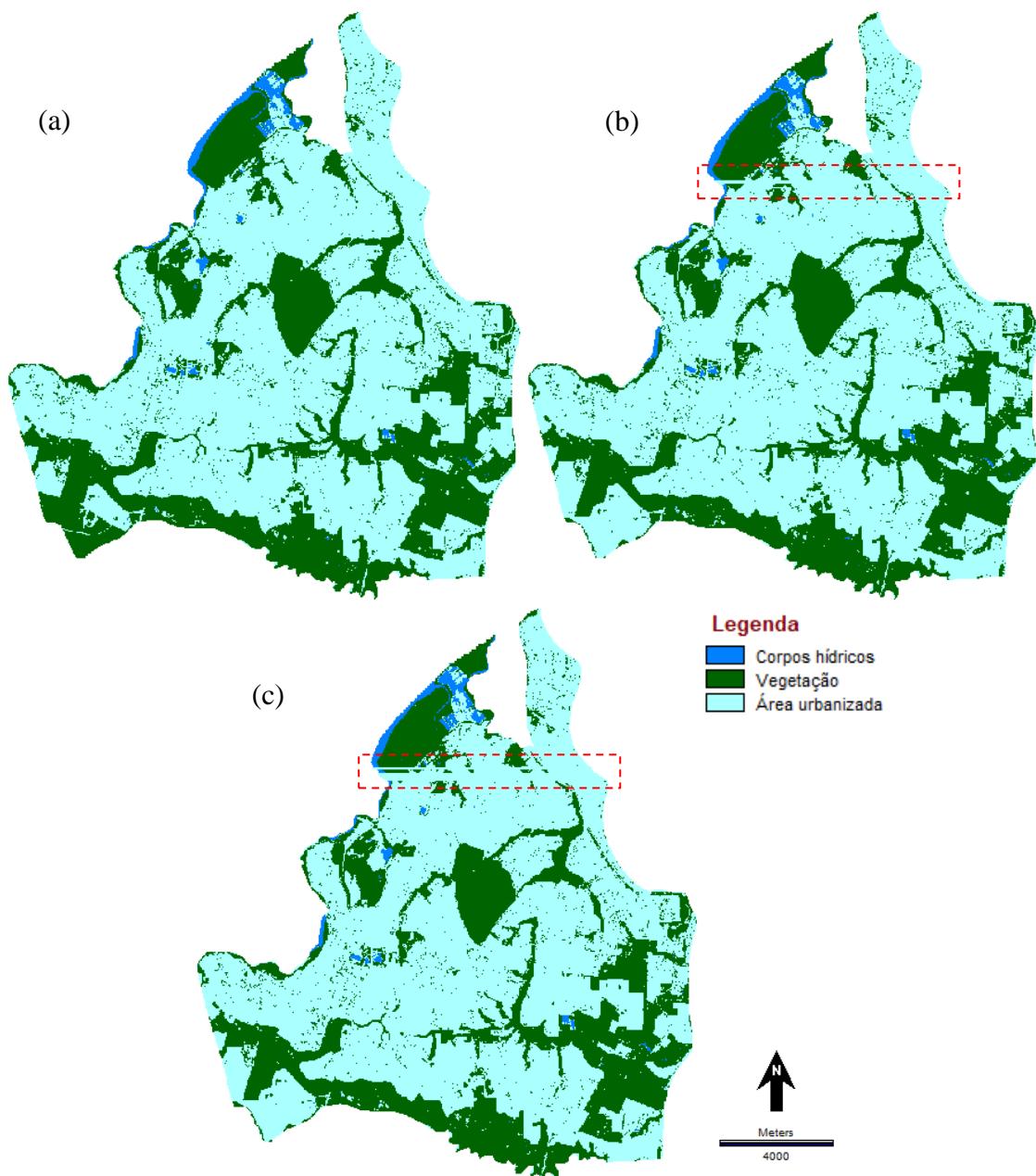


Figura 20 - Simulação de cobertura do solo pelo método RL para os anos (a) 2030, (b) 2035, e (c) 2040. (Fonte: Autoria própria)

Já pelo método RL, observa-se também, no ano de 2030, expansão acelerada da área urbanizada, de modo similar ao que se verificou pelo método RNMLP. Porém, diferentemente do que ocorreu neste método, esta expansão ocorre com intensidade semelhante em toda a região sul da cidade. Como já foi observado no processo de simulação e validação para o ano de 2018, este método apresenta como diferença também a presença de pontos isolados de classe de vegetação em meio à extensão da área urbanizada.

A projeção da cobertura do solo para 2035, por este método já apresenta a presença da tarja horizontal indicativa de superalocação, que aumenta no ano de 2040. Este fato sugere que o método de modelagem por RL, apesar de fornecer movimentos de transição semelhante ao do método RNMLP, projeta uma expansão urbana ainda mais acelerada. Assim, a modelagem obtida estima que a cidade chegará ao seu limite de expansão horizontal entre os anos 2030 e 2035.

A relativa imprecisão na modelagem pode ser parcialmente explicada ao se levar em conta que o processo considera apenas a mudança entre dois períodos como base para a previsão. O padrão de crescimento urbano, porém, é complexo e varia de acordo com o contexto de cada época, com as políticas públicas de incentivo ou desincentivo de desenvolvimento de determinada região, com mudanças no cenário econômico e social, com acontecimentos isolados de um período. Assim sendo, o uso de variáveis explanatórias estáticas, apesar de tornar a metodologia mais simples, por vezes não consegue refletir de forma satisfatória esses movimentos. O uso de variáveis explanatórias dinâmicas pode incrementar a precisão dos modelos, porém ainda não há garantia de que seja possível prever todas as oscilações que compõem o processo de expansão urbana.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Na primeira etapa do estudo, relativa à análise do crescimento urbano através de índices espectrais, a área construída estimada pelo NDBI mostrou um aumento de 445% entre 1990 e 2016. Este crescimento se mostrou constante durante todo o período, ainda que em ritmos diferentes de acordo com os intervalos de datas.

Observou-se que entre 1990 e 2006, o crescimento de área construída se deu majoritariamente por preenchimento de vazios nas regiões norte, noroeste e centro da cidade. A partir de 2010, se torna mais intensa a expansão da cidade para as regiões sul e sudoeste.

A análise do NDVI indica a mesma tendência, ainda que de forma indireta e com variações de crescimento e diminuição mais acentuadas. Valores entre 0,2 e 0,6 apresentaram queda acentuada, indicando que áreas com médio vigor vegetativo foram as mais impactadas com o crescimento da cidade. Áreas com valores maiores que 0,6, indicativos de vegetação mais densa e com maior vigor, também apresentaram uma tendência de decréscimo, porém com menor intensidade, devido à presença de áreas de preservação ambiental.

Ao se comparar o crescimento urbano com a lei de macrozoneamento do município de João Pessoa, observou-se eficácia satisfatória dos instrumentos de planejamento e ordenamento urbano no direcionamento do crescimento da cidade, com exceção da zona de preservação ambiental.

Na segunda etapa da pesquisa, a avaliação do crescimento urbano realizada a partir da classificação supervisionada foi coerente com a realizada por meio do cálculo de índices espectrais, no sentido de apontar para a expansão urbana na região sul da cidade nos anos recentes.

Com relação ao processo de escolha das variáveis explanatórias, os resultados obtidos evidenciaram a importância da infraestrutura e dos equipamentos urbanos como fatores que impulsionam o crescimento da cidade.

O processo de modelagem de cenários futuros demonstrou duas tendências. A primeira está relacionada à forma como a área urbanizada se expande. Os métodos utilizados para realizar a projeção de cenários futuros consideram maior potencial de transição nas áreas limítrofes entre uma classe e outra. Assim, o crescimento previsto apresentou-se concentrado próximo ao centro urbano, desconsiderando a possibilidade de surgimento de aglomerados urbanos em áreas mais periféricas.

A segunda tendência demonstrada foi com relação à intensidade da transição prevista da classe de vegetação para classe de área urbanizada. O processo de validação revelou um crescimento urbano mais acelerado do que de fato ocorreu, entre os anos de 2006 e 2018. Deste modo, esta tendência de crescimento acelerado foi reproduzida na projeção de cenários de uso e ocupação do solo para os anos de 2030, 2035 e 2040, resultando, tanto para o método RNMLP quanto para o RL, no esgotamento de áreas de vegetação passíveis de transição.

A partir dos resultados obtidos, algumas sugestões são feitas para trabalhos posteriores:

- A utilização de satélites com alta resolução espacial é recomendada, tanto para a análise a partir de índices espectrais quanto para a projeção de cenários futuros, de modo a obter resultados mais consistentes e precisos;
- De forma complementar ao estudo da expansão urbana, pode-se realizar estudos envolvendo variação populacional, de forma a verificar se há alguma relação entre ambos. Além disso, como este estudo possui enfoque na expansão de modo horizontal, o estudo de um possível crescimento populacional poderia trazer indícios com relação ao processo de verticalização da cidade;
- Na modelagem de cenários futuros, adicionar novas variáveis explanatórias aos modelos de previsão. Cabe a utilização de variáveis socioeconômicas, como renda, densidade populacional, escolaridade, taxa de desemprego, entre outros. Adicionalmente, a utilização de variáveis dinâmicas ao longo do tempo permitiria que os modelos incorporassem os dinamismos do crescimento urbano;
- Ainda no processo de modelagem de cenários futuros, é possível a utilização de fatores de incentivo e desincentivo para além do zoneamento urbano, incorporando outros tipos de políticas públicas de ordenamento do território.

REFERÊNCIAS

BADWI, I. M.; EL BARMELGY, M. M.; EL-DIN OUF, A. S. **Modeling and prediction of expected informal growth in the Greater Cairo Region, Egypt.** Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, v. 49, n. 2, 2022.

BARROS, E. R. O.; ANDRADE, M. O.; SOUZA JÚNIOR, F. L. **Time-space modeling of irregular occupations around Brazilian highways, based on static grids: Case study of BR-408.** Land Use Policy, v. 114, p. 1-11, jan. 2022.

BATTY, M. **Urban modeling.** In: KITCHIN, R.; THRIFT, N. (Orgs.). International Encyclopedia of Human Geography. Londres: Elsevier Science, p. 51-58, 2009.

BHATTA, B. **Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data.** Berlim: Springer, 2010.

BHATTI, S. S.; TRIPATHI, N. K. **Built-up area extraction using Landsat 8 OLI imagery.** GIScience & Remote Sensing, v. 51, n. 4, p. 445-467, jun. 2014.

BONAMENTE, J. L.; SOUZA, A. J. **Planejamento urbano e ambiental.** Indaial: Uniasselvi, 2012.

BOSE, A.; CHOWDHURY, I. R. **Monitoring and modeling of spatio-temporal urban expansion and land-use/land-cover change using Markov chain model: a case study in Siliguri Metropolitan area, West Bengal, India.** Modeling Earth Systems and Environment, v. 6, n. 4, p. 2235-2249, dez. 2020.

BRAGA, R. **Política urbana e gestão ambiental: considerações sobre o plano diretor e o zoneamento urbano.** In: CARVALHO, P.F.; BRAGA, R. (Orgs). Perspectivas de Gestão Ambiental em Cidades Médias. Rio Claro: LPM-UNESP, p. 95-109, 2001.

BRASIL. Senado Federal. **Estatuto da cidade.** Brasília, DF, 2008.

CHAVES, I. B. *et al.* **Índices Espectrais e Diagnóstico da Degradação da Caatinga na Bacia Hidrográfica do Açude Soledade, Paraíba-BR.** In: XIX Reunião Brasileira De Manejo E Conservação Do Solo E Da Água. Lages – SC, 2012.

CLEVE, C. et.al. **Classification of the wildland–urban interface: A comparison of pixel-and object-based classifications using high-resolution aerial photography.** Computers, Environment and Urban Systems, v. 32, n. 4, p; 317-326, 2008.

DERIBEW, K. T. **Spatiotemporal analysis of urban growth on forest and agricultural land using geospatial techniques and Shannon entropy method in the satellite town of Ethiopia, the western fringe of Addis Ababa city.** Ecological Processes, v. 9, n. 1, p. 1-16, dez. 2020.

DUADZE, S. E. K. **Land use and land cover study of the Savannah Ecosystem in the Upper West Region (Ghana) using remote sensing.** Göttingen: Cuvillier Verlag, 2004.

EASTMAN, J. **Terrset 2020 geospatial monitoring and modeling system:** Manual. Clark Labs, 2020.

FERRARI, C. **Dicionário de urbanismo.** São Paulo: Disal, 2004.

FILIPEIA. **Mapas da Cidade.** João Pessoa: Prefeitura Municipal de João Pessoa, 2022. Disponível em: <<https://filipeia.joaopessoa.pb.gov.br/>>. Acesso em: 19 de outubro de 2022.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicações.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico: arquitetura e urbanismo.** São Paulo: Studio Nobel, 2001.

FURTADO, B. A.; van DELDEN, H. **Modelagem urbana e regional com autômatos celulares e agentes: Panorama teórico, aplicações e política pública.** Texto para Discussão, No. 1576, 2011.

GAO, B. C. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, v. 58, p. 257-266, 1996.

GARCÍA, P.; PEREZ. E. **Mapping of soil sealing by vegetation indexes and built-up index: A case study in Madrid (Spain)**. *Geoder*, v. 268, p.100-107, 2016.

GELPI, A.; KALIL, R. M. L. **A cidade comentada: expressões urbanas e glossário em urbanismo. Passo Fundo - RS**: Editora Universidade de Passo Fundo, 2016.

Get Started with Earth Engine. **Google Earth Engine**, 2021. Disponível em: <<https://developers.google.com/earth-engine/guides/getstarted>>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2022.

GONÇALVES, R. C. **Guerras e Açúcares: Política e economia na capitania da Parahyba (1585-1630)**. Bauru: EDUSC, 2007.

GRIFFITHS, P. *et al.* **Mapping megacity growth with multi-sensor data**. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, n. 2, p. 426-439, 2010.

GUHAA. S. *et al.* **Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy**. *European Journal of Remote Sensing*, v. 51, n. 1, p. 667-678, 2018.

HAYKIN, S. **Redes neurais**. Porto Alegre: Bookman, 2^a edição, p. 900, 2001.

HIGINO JUNIOR, A. **A geo-história da Avenida Epitácio Pessoa em João Pessoa – PB**. Monografia (Graduação em Geografia), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Bases cartográficas contínuas – Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas/15759-brasil.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 19 de outubro de 2022.

JOÃO PESSOA. **Código de Urbanismo**. João Pessoa, 2001.

JOÃO PESSOA. **DECRETO N.º 6.499 de 20 de Março de 2009 (Plano diretor)**. João Pessoa, 2009.

KARANAM, H. K. **Study of normalized difference built-up (NDBI) index in automatically mapping urban areas from Landsat TM imagery**. International Journal of Scientific Research and Review, v. 7, n. 1, 2018.

KHAWALDAH, H. A.; FARHAN, I.; ALZBOUN, N.M. **Simulation and prediction of land use and land cover change using GIS, remote sensing and CA-Markov model**. Global Journal of Environmental Science and Management, v. 6, n. 2, p. 215-232, mar. 2020.

KNIGHT, J. F. *et al.* **Regional scale land cover characterization using MODIS-NDVI 250 m multi-temporal imagery: A phenology-based approach**. GIScience & Remote Sensing, v. 43, n. 1, p. 1-23, 2006.

LACERDA, L. I. A.; SILVEIRA, J. A. R.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R.M.; SILVA, A. M.; NASCIMENTO, T. V. M.; RIBEIRO, E.L.; FREITAS, P. V. N. **Urban forest loss using a GIS-based approach and instruments for integrated urban planning: A case study of João Pessoa, Brazil**. Journal of Geographical Sciences, v. 31, p. 1529-1553, 2021.

LAVIERI, J. R.; LAVIERI M. B. **Evolução da estrutura urbana de João Pessoa (1960-1986)**. Textos UFPB – NDHI n. 29, 1992.

LIEBETRAU, A.M. **Measures of association**. Newbury Park, CA: Sage Publications. Quantitative, 1983.

LIMA, G. C. *et al.* **Avaliação da cobertura vegetal pelo índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN)**. Revista Ambiente & Água, v. 8, n. 2, 2013.

LIMA, N. A. S. *et al.* **Índices Espectrais por Sensoriamento Remoto com os satélites Landsat-5 e Sentinel-2 no entorno do reservatório Poço da Cruz – PE.** Journal of Hyperspectral Remote Sensing, v. 9, n. 5, p. 299-309, 2019.

LIU, Y. **Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata.** Boca Raton: CRC Press, 2009.

LUIZ, C.H.P. **Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na transformação da paisagem:** Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MAIA, D. S. **Notas sobre a urbanização da cidade de João Pessoa: do processo e do seu reverso.** Revista Paraibana de Geografia, v. 3, n. 1, Julho de 2001. UFPB.

MAIOR, M. M. S.; CÂNDIDO, G. A. **Vulnerabilidade socioeconômica:** um estudo transversal para o município de João Pessoa. Revista Princípia, João Pessoa-PB, n. 24, p. 72-87, jun. 2014.

MANSOUR, S.; AL-BELUSHI, M.; AL-AWADHI, T. **Monitoring land use and land cover changes in the mountainous cities of Oman using GIS and CA-Markov modeling techniques.** Land Use Policy, v. 91, p. 1-15, 2020.

MASSABKI, J. A. R. et.al. **Modelagem dos padrões da expansão urbana da Região Metropolitana de São Paulo baseada em autômatos celulares.** Revista Brasileira de Gestão Urbana, Curitiba-PR, v. 9, supl.1, p. 361-371, out. 2017.

MELLO, J. O. A. **História da Paraíba:** lutas e resistência João Pessoa. A União, 7. ed., 1987.

MOHAMED, A.; WORKU, H. **Simulating land use and cover dynamics using cellular automata and Markov chain approach in Addis Ababa and the surrounding.** Urban Climate, v. 31, p. 1-17, mar. 2020.

NAGENDRA, H. *et al.* **Sub-regional Assessment of India: Effects of Urbanization on Land Use, Biodiversity and Ecosystem Services.** In: ELMQVIST, T. *et al.* (Orgs.). *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities.* Londres: Springer, 2013, p. 65-74.

NASCIMENTO, V. M. L. C.; LIMA, E. R. V.; SANTOS, C. A. G. **SIG na avaliação de áreas para ocupação urbana de João Pessoa, PB.** Ambiente Construído, Porto Alegre-RS, v. 9, n.1, p. 107-123, jan./mar. 2009.

NUGRAHA, A. T. *et al.* **Unravelling the dynamics behind the urban morphology of port-cities using a LUTI model based on cellular automata.** Computers, Environment and Urban Systems, v. 92, p. 1-13, 2022.

PAULA NETO, H. M. Modelagem “CA – Células automatas” para avaliação do crescimento urbano: o caso do entorno do Parque Macambina/Anicuns no município de Goiânia. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

PENACHIO, S. M. *et al.* **Índices radiométricos para estimativa de umidade do solo.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 5, p. 29540-29549, mai. 2020.

RIBEIRO, F. A. B. S. **Arborização urbana em Uberlândia: percepção da população.** Revista da Católica, 1(1), 224-237, 2009.

RIBEIRO, L. C. Q. *et al.* **Hierarquização e identificação dos espaços urbanos.** Rio de Janeiro: Letra Capital: Observatório das Metrópoles, 2009.

ROCHA, F. J. P. S. P. **Sistemas complexos, modelação e geosimulação da evolução de padrões de uso e ocupação do solo.** Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de Lisboa, Lisboa, 2012.

RODRIGUES, H. C. T. *et al.* **NDVI e SAVI como ferramentas de monitoramento das modificações no uso e ocupação do solo no sudoeste paraense.** Research, Society and Development, v. 11, n. 1, p. e47611122583-e47611122583, 2022.

ROSSETTI, L. A. F. G. Modelagem dinâmica espacial de mudanças no uso do solo urbano: contribuição metodológica. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt, NASA SP-351, p. 3010-3017, 1974.

SANTOS, B. S. Passado e futuro de Feira de Santana (BA): Modelagem da dinâmica espacial do uso do solo entre 2000 e 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2019.

SHUBHO, M. T. H.; ISLAM, I. An integrated approach to modeling urban growth using modified built-up area extraction technique. International Journal of Environment Science and Technology, v. 17, n. 5, p. 2793-2810, mai. 2020.

SILVA, C. D. A dinâmica do uso do solo da avenida Cruz das Armas em João Pessoa –PB. Monografia (Graduação em Geografia), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

SILVA, L. M. T. Forma urbana e cotidiano na evolução de João Pessoa – PB. Seaculum (UFPB), João Pessoa – PB; v. 1, n. 3, p. 161-186, 1997.

SILVA, R. C. F. et al. Análise comparativa de índices espectrais para a extração automática da lâmina d'água em imagem do satélite Landsat 8/OLI. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2019.

SILVA, V. M. Classificação de imagens por sensoriamento remoto: análise comparativa das metodologias pixel-a-pixel e segmentação por região. – 2014. Monografia (Curso de Especialização em Geoprocessamento), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014

SOBREIRA, L. C. et al. Expansão urbana e variações mesoclimáticas em João Pessoa, PB. Ambiente Construído, Porto Alegre – RS, v. 11, n. 2, p. 125-138, abr./jun. 2011.

SOUZA, J. F.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M. **Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa - PB.** Ambiente Construído, v. 16, p. 21-37, 2016.

SOUZA, J. F. **Análise das mudanças do uso e ocupação do solo, variabilidade da temperatura e do saldo de radiação em João Pessoa-PB.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

SPOSATI, A. *et al.* **Topografia social de João Pessoa.** CEDEST/IEE/PUCSP, 2009.

TRINDADE, J. P. P.; VOLK, L. B. S..; DA ROCHA, D. S. **Avaliação do índice normalizado de vegetação no monitoramento de sistema de unidades de manejo.** Embrapa Pecuária Sul-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 2021.

XAVIER, A. P. C. **Modelagem temporal da dinâmica do uso e ocupação do solo nas perdas e deposição de sedimentos na Bacia do Rio Tapacurá (PE).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

XU, H. **A new index for delineating built-up land features in satellite imagery.** International Journal of Remote Sensing v. 29, n. 14, p. 4269-4276, 2008.

YU, C.-P.; LEE, H.-Y.; LUO, X.-L. **The effect of virtual reality forest and urban environments on physiological and psychological responses.** Urban Forestry & Urban Greening, 35, 106-114, 2018.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. **Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery.** International Journal of Remote Sensing, v. 24, p. 583–594, 2003.

ZHANG, Q. *et al.* **A semi-automatic segmentation procedure for feature extraction in remotely sensed imagery.** Computers & Geosciences v. 31, n. 3, p. 289-296, 2005.