



ÍNDICE DE RISCO POTENCIAL DE INUNDAÇÕES COMO FERRAMENTA PARA O PLANEJAMENTO DE ÁREAS URBANAS EM EXPANSÃO

Felipe Manoel Cabral

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez

Osvaldo Moura Rezende

Rio de Janeiro

Março de 2024

ÍNDICE DE RISCO POTENCIAL DE INUNDAÇÕES COMO FERRAMENTA
PARAO PLANEJAMENTO DE ÁREAS URBANAS EM EXPANSÃO

Felipe Manoel Cabral

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez
Osvaldo Moura Rezende

Aprovada por: Prof. Marcelo Gomes Miguez
Prof. Osvaldo Moura Rezende
Prof. Paulo Luiz da Fonseca
Profa. Thêmis Amorim Aragão

RIO DE JANEIRO, RJ BRASIL
MARÇO DE 2024

Cabral, Felipe Manoel.

Índice de Risco Potencial de Inundações como ferramenta para o planejamento de áreas urbanas em expansão / Felipe Manoel Cabral. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XVII, 162 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez

Osvaldo Moura Rezende

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 148-162.

1. Índice de risco. 2. Indicadores. 3. Planejamento Urbano. I. Miguez, Marcelo Gomes *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Civil. III. Título.

Agradecimentos

Aos meus pais, Joselina e José Carlos, cujo amor e apoio incansável moldaram os alicerces dos meus sonhos. São eles, verdadeiramente, as fontes inesgotáveis de inspiração que deram forma à pessoa que sou hoje.

Aos meus orientadores, Marcelo Miguez e Osvaldo Rezende, pelos ensinamentos, pelo apoio e, principalmente, pela paciência infinita na orientação deste trabalho. Foi um processo árduo e desgastante de mudanças e prorrogações, mas que, ao final, tudo se alinhou.

À equipe do Grupo de Extensão de Guaratiba e do Laboratório Águas e Cidades (LAC), que me apoiaram, torceram pela finalização desse trabalho e estiveram presentes em momentos cruciais para o andamento da pesquisa. Agradeço a todos, especialmente, ao Lucas Magalhães Carneiro Alves, que me auxiliou desde o início do mestrado, não só colaborando com ideias e contribuições acadêmicas, mas também me apoiando nas horas de desânimo e desespero e também ao Francis Martins Miranda, por todo apoio e disponibilidade no processo de reformulação do ISMFI, além de toda força, escuta e incentivo para finalizar este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo suporte financeiro para o desenvolvimento da pesquisa.

A todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, participaram do processo de elaboração desta Dissertação e compartilharam deste percurso. Cada contribuição deixou uma marca valiosa, e este trabalho é reflexo da colaboração e apoio que permearam essa trajetória.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ÍNDICE DE RISCO POTENCIAL DE INUNDAÇÕES COMO FERRAMENTA PARA O PLANEJAMENTO DE ÁREAS URBANAS EM EXPANSÃO

Felipe Manoel Cabral

Março/2024

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez

Osvaldo Moura Rezende

Programa: Engenharia Civil

As inundações urbanas causam uma série de danos em diferentes setores. Este resultado é agravado por processos de desenvolvimento urbano não adequadamente planejados, associado à ocupação indisciplinada do território e projetos de engenharia tradicional, que usualmente visam apenas o escoamento rápido das águas pluviais. Uma abordagem mais proativa e preventiva para o problema de inundações, no contexto do planejamento urbano, é uma necessidade premente, demandando aporte ferramental para orientar o desenvolvimento urbano, de modo a identificar preliminarmente as principais áreas suscetíveis a eventos de inundação, possibilitando antecipar ações que reconheçam a dinâmica natural das águas e a integração de conceitos de drenagem urbana sustentável no desenvolvimento da cidade. Nesse contexto, este trabalho visa propor uma metodologia multicritério para avaliação preliminar do risco potencial a que uma área pode estar sujeita, para subsidiar o processo de planejamento urbano, de forma relativamente simples e rápida, sem necessidade de uma modelagem matemática detalhada dos fenômenos físicos hidrodinâmicos. Essa metodologia busca oferecer uma

avaliação quantitativa do risco potencial de inundação para uma situação de ocupação do território objeto de análise, compondo um índice multicritério que considera a susceptibilidade do meio físico a inundações e a vulnerabilidade do sistema urbano potencialmente atingido pelas inundações. A metodologia será aplicada a um caso na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, localizada no município do Rio de Janeiro.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

POTENTIAL FLOOD RISK INDEX AS A TOOL FOR PLANNING EXPANDING
URBAN AREAS

Felipe Manoel Cabral

March/2024

Advisors: Marcelo Gomes Miguez

Osvaldo Moura Rezende

Department: Civil Engineering

Urban floods cause a series of damages in different sectors. This result is aggravated by inadequately planned urban development processes, associated with undisciplined occupation of the territory and traditional engineering projects, which usually aim only at the rapid drainage of rainwater. A more proactive and preventive approach to the problem of flooding, in the context of urban planning, is an urgent need, demanding tool support to guide urban development, in order to preliminarily identify the main areas susceptible to flooding events, enabling actions that recognize the natural dynamics of water and the integration of sustainable urban drainage concepts in city development. In this context, this work aims to propose a multicriteria methodology for preliminary assessment of the potential risk to which an area may be subject, to subsidize the urban planning process, in a relatively simple and fast way, without the need for detailed mathematical modeling of hydrodynamic physical phenomena. This methodology seeks to offer a quantitative assessment of the potential flood risk for a situation of occupation of the territory under analysis, composing a multicriteria index

that considers the susceptibility of the physical environment to floods and the vulnerability of the urban system potentially affected by floods. The methodology will be applied to a case in the Piraquê-Cabuçu River basin, located in the municipality of Rio de Janeiro.

SUMÁRIO

1 Introdução	1
1.1 Contexto e Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodologia.....	3
1.4 Estudo de Caso	5
2 Revisão Bibliográfica.....	7
2.1 Hidrologia Urbana	7
2.1.1 O processo de urbanização e as inundações	7
2.1.2 Drenagem Urbana: Processo Evolutivo.....	14
2.2 Gerenciamento de Risco em Inundações.....	16
2.2.1 Elementos associados ao risco.....	18
2.2.2 A importância da resiliência em casos de inundação para o aumento de eficiência no planejamento urbano das cidades.....	24
2.2.3 Gestão de riscos em desastres de inundações urbanas	26
2.3 A Importância da coesão entre a Drenagem Urbana, o Planejamento Urbano e o Gerenciamento de Risco de Inundação	34
2.4 Estudos Antecedentes	39
2.4.1 Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações – ISMFI	39
2.4.2 Índice de Resiliência a Inundações em Bacias Urbanas – IRES	42
3 Metodologia.....	53
3.1 Proposta metodológica para a construção do aporte ferramental de auxílio ao planejamento urbano frente a inundações	53
3.2 Revisão do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico, propondo a sua versão v2.0 (ISMFIv2.0).....	55
3.2.1 Indicador de Declividade para Drenagem (<i>IDEC</i>).....	58

3.2.2 Indicador de Cota Altimétrica Absoluta (ICOTA).....	60
3.2.3 Indicador de Proximidade de Curso d'Água (IPROX).....	61
3.2.4 Indicador de Impermeabilização do Solo (IIMP)	62
3.3 Índice de Vulnerabilidade (IV).....	64
3.3.1 Indicador de exposição de edificações (Ie).....	66
3.3.2 Indicador de exposição de infraestrutura urbana (Iei).....	67
3.3.3 Indicador de susceptibilidade das edificações (IS)	68
3.3.4 Indicador de pessoas vulneráveis (Ipv)	69
3.3.5 Indicador de renda familiar (IR)	69
3.3.6 Indicador de hierarquia viária (Ihv)	70
3.3.7 Indicador de dificuldade de acesso a abrigo (Ida)	70
3.4 Índice de Risco Potencial de Inundações (IRPI)	71
3.5 Proposição de diretrizes conceituais para o planejamento urbano	73
4 Estudo de caso: Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, Rio de Janeiro (RJ).....	80
4.1 Caracterização da área de estudo.....	80
4.1.1 Aspectos Históricos	82
4.1.2 Características socioeconômicas e ambientais	84
4.1.3 Uso e ocupação do solo	88
4.1.4 Hidrografia	91
5 Resultados	95
5.1 Aplicação do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico v2.0 (ISMFIv2.0)	95
5.2 Aplicação do Índice de Vulnerabilidade (IV).....	102
5.3 Aplicação do Índice de Risco Potencial de Inundações (IRPI).....	112
6 Proposição dos cenários de simulação	115
6.1 Cenário 1: Crescimento populacional desordenado (Cenário tendencial).....	125

6.2 Cenário 2: Crescimento populacional planejado e ordenado conforme limitações da bacia.....	127
6.3 Aplicação dos índices para os cenários futuros	132
6.3.1 Aplicação do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI v2.0).....	132
6.3.2 Aplicação do Índice de Vulnerabilidade (IV)	135
6.3.3 Aplicação do Índice de Risco Potencial a Inundações (IRPI).....	139
7 Conclusões e Recomendações	142
Referências Bibliográficas	144

Lista de Figuras

Figura 1.1: Mapa de hidrografia e localização da Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, no Rio de Janeiro. Fonte: Araujo, E. C. et al. (2016)	5
Figura 2.1: Porcentagem da população que vive em área urbana por região. Fonte: IBGE, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2015.	9
Figura 2.2: Ocorrência de desastres naturais, por tipo, entre 2000 e 2019. Fonte: CRED (2020).....	10
Figura 2.3: Total de desastres naturais, por tipo, entre 1980-1998 vs. 2000-2019. Fonte: CRED (2020).....	10
Figura 2.4: Efeito da urbanização no hidrograma de uma bacia hidrográfica. Fonte: SCHUELER (1987 apud VERÓL, 2013).	13
Figura 2.5: Função do risco	17
Figura 2.6: Relação de elementos de risco em casos de inundação. Fonte: Zonensein (2007, p. 7).....	20
Figura 2.7: Relação de elementos de risco em casos de inundação. Fonte: Zonensein (2007, p. 8).....	22
Figura 2.8: Procedimento cíclico referente à gestão de risco e gerenciamento de desastres. Fonte: CEPED/RS-UFRGS (2016, p. 143).....	28
Figura 2.9: Relação de elementos de risco em casos de inundação. Fonte: Sayers et al. (2013, p. 61).....	31
Figura 2.10: Fluxograma da metodologia para construção do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações. Fonte: Miranda (2016).	40
Figura 2.11: Composição geral do IRES Fonte: REZENDE, 2018.	44
Figura 3.1: Alterações hidrológicas como consequência do processo de urbanização e impermeabilização do solo. Fonte: Adaptado de Marsh (1983).....	63
Figura 3.2: Composição geral do IRES adaptada para a composição do IV. Fonte: Adaptado de REZENDE (2018).....	65

Figura 3.3: Normalização do indicador de exposição de edificações.....	67
Figura 3.4: Normalização do indicador de exposição de infraestrutura urbana.	68
Figura 3.5: Esquema de formulação metodológica do Índice de Risco Potencial de Inundações (IRPI).....	72
Figura 3.6.: Comparativo entre as técnicas de drenagem. Fonte: Adaptado de Gutierrez & Ramos (2019).	78
Figura 4.1: Localização geográfica da Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu. Fonte: Relatório Diagnóstico (2021).	80
Figura 4.2: Unidades de conservação na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu. Fonte: Relatório Diagnóstico (2021)	81
Figura 4.3: Distribuição espacial da população da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu Fonte: Grupo de planejamento urbano-territorial para incremento da resiliência a inundações.	85
Figura 4.4: Renda per capita dos habitantes da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, de acordo com o Censo 2010. Fonte: Grupo de planejamento urbano-territorial para incremento da resiliência a inundações.	87
Figura 4.5: Cobertura vegetal e uso das terras na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu segundo monitoramento da Prefeitura do Rio de Janeiro em 2016. Fonte: Grupo de planejamento urbano-territorial para incremento da resiliência a inundações.	89
Figura 4.6: Áreas protegidas e Ocupações irregulares dentro dos trechos de unidades de paisagem. Fonte: Ribeiro (2017)	91
Figura 4.7: Principais sub-bacias da Bacia Hidrográfica do rio Piraquê-Cabuçu. Fonte: Rio de Janeiro – PDMAP (2012) adaptado de RIBEIRO (2017).	92
Figura 4.8: Divisão em trechos do Rio Piraquê-Cabuçu. Fonte: Rio de Janeiro – PDMAP (2012).....	93
Figura 5.1: Mapa com distribuição espacial do indicador de declividade para drenagem (IDEC).....	95

Figura 5.2: Mapa com distribuição espacial do indicador de cota altimétrica absoluta (I_{COTA}).....	96
Figura 5.3: Mapa com distribuição espacial do indicador de proximidade de curso d'água (I_{PROX})	97
Figura 5.4: Mapa com distribuição espacial do indicador impermeabilização do solo (I_{IMP}).....	99
Figura 5.5: Mapa com distribuição espacial do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0 (ISMFI v2.0)	101
Figura 5.6: Mapa com distribuição espacial do ISMFI v2.0 em comparação com os Locais de Inundação da Rio-Águas.	102
Figura 5.7: Mapas com distribuição espacial dos indicadores de exposição de edificações (I_e) e de infraestrutura urbana (I_{ei}).	104
Figura 5.8: Mapas com distribuição espacial dos indicadores de susceptibilidade das edificações (I_S) e de pessoas vulneráveis (I_{pv}).	106
Figura 5.9: Mapas com distribuição espacial dos indicadores de renda familiar (I_r) e de hierarquia viária (I_{hv}).	108
Figura 5.10: Mapa com distribuição espacial do indicador de dificuldade de acesso a abrigo (I_{da}).....	109
Figura 5.11: Mapa com distribuição espacial do Índice de Vulnerabilidade (IV)	111
Figura 5.12: Mapa com distribuição espacial do Índice de Risco Potencial de Inundação (IRPI)	113
Figura 5.13: Mapa com distribuição espacial do Índice de Risco Potencial de Inundação (IRPI) sobreposto aos Locais de Inundação (AquaFluxus).	114
Figura 6.1: Mapa de identificação das Áreas de Conservação Ambiental, Áreas de Proteção Ambiental e Potenciais Espaços Livres.....	118
Figura 6.2: Mapa com a distribuição espacial do ISMFI v2.0, identificação dos Espaços Livres, Áreas de Conservação e Proteção Ambiental e Locais de Inundação.	120

Figura 6.3: Mapa com distribuição espacial segundo o Censo 2010 (IBGE). .	124
Figura 6.4: Mapa com distribuição espacial de expansão urbana tendencial segundo Cenário 1.	126
Figura 6.5: Mapa com distribuição espacial de expansão urbana tendencial segundo Cenário 2.	129
Figura 6.6: Mapa com distribuição espacial do Indicador de Impermeabilização do Solo (I_{imp}) para o Cenário 1.	133
Figura 6.7: Mapa com distribuição espacial do Indicador de Impermeabilização do Solo (I_{imp}) para o Cenário 2.	133
Figura 6.8: Mapa com distribuição espacial do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0 para o Cenário 1.	134
Figura 6.9: Mapa com distribuição espacial do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0 para o Cenário 2.	135
Figura 6.10: Mapa com distribuição espacial do Indicador de Exposição de Infraestrutura para o Cenário 1.	136
Figura 6.11: Mapa com distribuição espacial do Indicador de Exposição de Infraestrutura para o Cenário 2.	137
Figura 6.12: Mapa com distribuição espacial do Índice de Vulnerabilidade para o Cenário 1.	138
Figura 6.13: Mapa com distribuição espacial do Índice de Vulnerabilidade para o Cenário 2.	139
Figura 6.14: Mapa com distribuição espacial do IRPI para o Cenário 1.	141
Figura 6.15: Mapa com distribuição espacial do IRPI para o Cenário 2.	141

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Impactos da urbanização sobre as inundações	12
Tabela 2.2: Capacidade média de reposição de CR, relacionada à faixa de rendimento.	47
Tabela 2.3: Valores do indicador de altura <i>IA</i> relacionados à altura da edificação H.	48
Tabela 2.4: Normalização do indicador de hierarquia viária.....	50
Tabela 2.5: Oferta de estações e indicador de atendimento de transporte sobre trilho.	51
Tabela 3.1: Classes de declividade segundo da EMBRAPA (2016).....	59
Tabela 3.2: Classes de declividade para drenagem e seu valor normalizado	60
Tabela 3.3: Normalização do Indicador de Cota Altimétrica Absoluta	61
Tabela 3.4: Indicador de Proximidade de Curso d'Água (IPROX).....	62
Tabela 3.5: Valores de C recomendados pela ASCE (1969).....	64
Tabela 3.6:Valores do Indicador de Altura (<i>IA</i>), relacionados à altura da edificação H.....	69
Tabela 3.7: Valores de vulnerabilidade econômica normalizados	70
Tabela 3.8: Normalização do indicador de hierarquia viária (<i>Ihv</i>).....	70
Tabela 3.9: Ranqueamento da área de abrangência das escolas.....	71
Tabela 4.1: Uso e Ocupação do solo nos bairros da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu	90
Tabela 4.2: Principais sub-bacias do Rio Piraquê-Cabuçu.....	92
Tabela 5.1: Faixas de classes de impermeabilização do solo e Coeficiente de Runoff.....	97
Tabela 5.2: Testes de sensibilidade dos pesos adotados na composição do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0 (ISMFI v2.0)	99

Tabela 5.3: Pesos adotados na composição do Índice de Vulnerabilidade (IV)	109
Tabela 6.1: Dados de população obtidos por meio dos Censos de 2000 e 2010 e taxa de crescimento populacional por bairro.....	122
Tabela 6.2: População por bairro inserida na Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu...	123
Tabela 6.3: Valores de população por bairro em 2050 após aplicação das taxas de crescimento anual calculadas.....	124

1 Introdução

1.1 Contexto e Motivação

A problemática das inundações urbanas se relaciona diretamente com o crescimento das cidades, sendo ainda mais grave quando este ocorre de forma desordenada. Muitas vezes, as planícies de inundação são indevidamente ocupadas, levando bairros inteiros a ficarem embaixo d'água em eventos de chuva, afetando os vários sistemas urbanos, como o transporte público e habitação, além de afetar a economia, escolas e hospitais e, eventualmente, ceifando vidas.

Desastres naturais são cíclicos e podem provocar enormes impactos para a sociedade. Uma questão importante é: como tornar o sistema urbano menos susceptível a esses eventos? Isto é, como rever o planejamento urbano e implantar medidas que possam auxiliar a cidade a se preparar e minimizar os impactos das inundações urbanas?

Torna-se importante, então, desenvolver ferramentas de análise territorial para dar suporte a um planejamento urbano menos susceptível a inundações, permitindo chegar a projetos urbanos mais seguros. A possibilidade de se dispor de uma abordagem para quantificar e medir previamente, e de forma simples, a susceptibilidade de uma dada área à inundação, ou a expectativa de risco potencial de um futuro desenvolvimento urbano, pode ser uma importante ferramenta de suporte ao planejamento. A quantificação do risco de inundação envolve a estimativa de ocorrência de um evento perigoso, que pode afetar um sistema exposto, gerando dano. Essa quantificação pode ser realizada, de forma preliminar e estimativa, por meio de metodologias de análise multicritério, gerando índices integradores, compostos por indicadores de diferentes origens, escalas, unidades e significados diferentes, transformados em informações relevantes, simplificando a complexidade original do problema e auxiliando a tomada de decisão, em etapas preliminares de planejamento e formulação de políticas públicas. Um índice não tem a pretensão de detalhar fisicamente o funcionamento de um sistema, pois isso implicaria na mesma complexidade de desenvolvimento de modelos determinísticos, que são mais talhados para a fase de diagnóstico detalhado e projeto. Entretanto, pode ser uma potente

ferramenta de planejamento, fornecendo indicações de ação e priorização de áreas para atuação, de forma simples e rápida.

Nesta dissertação, objetiva-se construir uma metodologia simples, para mensuração do risco potencial, para fins de suporte ao planejamento, utilizando informações físicas do ambiente natural e construído, bem como do sistema socioeconômico urbano, sem necessidade de uso de ferramentas de modelagem matemática hidrodinâmica. Inicialmente, como base ferramental a ser utilizada e desenvolvida de forma complementar, será revisitado e explorado o Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações – ISMFI (MIRANDA, 2016), desenvolvido como uma ferramenta de suporte ao planejamento urbano e capaz de avaliar qualitativamente as áreas mais propensas a inundações, tanto no ambiente natural quanto construído, com base apenas nas características físicas da bacia. Essa revisão pretende definir o ISMFI como representativo do perigo a que um sistema está exposto, na formulação pretendida para a medição do risco potencial.**Erro! Fonte de referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Complementarmente, busca-se uma composição simples para a representação da vulnerabilidade socioambiental das cidades (especialmente com foco na realidade brasileira), combinando esta composição com o ISMFI revisado, de forma a compor um índice de risco potencial. Destaca-se que o uso do termo risco potencial tem relação com o uso da susceptibilidade do meio físico a inundações e não um mapeamento real de inundações. Ou seja, o risco aqui medido se refere a uma fragilidade original do ambiente, combinado com as características socioeconômicas de sua ocupação. Nesse sentido, medidas de controle de inundação podem reduzir o risco efetivo (e esta é uma ação esperada para defender comunidades já expostas), mas não modificam o risco residual (que tem relação, justamente, com a fragilidade do ambiente e com consequências que podem advir de uma falha na proteção estabelecida para esta área frágil). Nesse sentido, propõe-se o conceito do risco potencial como ferramenta de planejamento, indicando áreas que deveriam ser vistas como locais de não adensamento e merecedores de ações de preparação e resposta a eventos extremos. Assim, busca-se oferecer um acervo ferramental que permita uma leitura rápida do risco de inundações para fins de orientação

preliminar ao planejamento, oferecendo diretrizes para o mesmo. A bacia do Rio Piraquê-Cabuçu será adotada como estudo de caso exploratório nesta pesquisa.

1.2 Objetivos

A presente pesquisa tem como objetivo principal o desenvolvimento de um índice de risco potencial, que permita ofertar suporte ao planejamento urbano e territorial, com vistas à redução de riscos de inundação para áreas em desenvolvimento, em estágio inicial de urbanização, permitindo orientar projetos de expansão urbana sob o ponto de vista de redução de riscos futuros de inundação. Destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Definir indicadores e índices associados ao conceito de risco de inundação existentes, para avaliar o seu potencial de uso na presente proposta, com as respectivas vocações e necessidades de adaptação, para fins de planejamento, consolidando-os em uma revisão bibliográfica sobre o tema.
- ✓ Definir indicadores representativos de características socioeconômicas, capazes de representar as parcelas de vulnerabilidade, e avaliar a necessidade de ajuste no cálculo da susceptibilidade física a inundações urbanas, definida originalmente no ISMFI (MIRANDA, 2016) Esta será a base da nova proposta para o índice de risco potencial.
- ✓ Equacionar o novo índice com os indicadores escolhidos, utilizando informações de fácil acesso, para fins de suporte prévio ao planejamento urbano e territorial.
- ✓ Fazer testes de sensibilidade para avaliar o comportamento dos indicadores escolhidos, aplicados a uma área de estudo, e ajustar o índice, se necessário.

1.3 Metodologia

Resumidamente, o processo metodológico proposto para a pesquisa é o seguinte:

- i. Revisão bibliográfica, buscando abordar a problemática de inundações urbanas e a sua relação com a urbanização rápida e não adequadamente planejada, bem como sua relação com o consequente risco de inundações.
- ii. Identificação de indicadores adequados à representação simplificada de risco, para fins de planejamento, a partir das variáveis intervenientes neste processo, a partir dos achados constantes na pesquisa bibliográfica. Essa revisão visa consubstanciar a revisão do Índice de Susceptibilidade Física a Inundações e a composição de um índice de vulnerabilidade socioeconômica-ambiental.
- iii. Levantamento das informações socioeconômicas e fisiográficas da bacia hidrográfica em estudo, de acordo com informações censitárias do IBGE, para realizar um diagnóstico urbano preliminar da ocupação inicial do território;
- iv. Proposição de uma revisão do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações, propondo a sua versão v2.0, a partir do ISMFI original (MIRANDA, 2016), buscando um diagnóstico de fragilidades físicas na bacia hidrográfica em estudo, em relação à propensão à inundação, adotando este índice revisado como base para representação do perigo na composição do risco potencial.
- v. Proposição de um Índice de Vulnerabilidade – IV, a partir de indicadores identificados na literatura e de indicadores utilizados em índices previamente desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do Laboratório Água e Cidade, da Escola Politécnica da UFRJ, com destaque para aqueles utilizados na composição do Índice de Resiliência a Inundações – IRES (REZENDE, 2018) buscando uma representação simplificada, mas significativa, da situação socioeconômica atual na bacia hidrográfica em estudo.
- vi. Proposição de um Índice de Risco Potencial de Inundações – IRPI, composto por uma parcela de vulnerabilidade, a partir do IV, e da susceptibilidade do meio físico, a partir do ISMFIv2.0, representando uma propensão ao dano, ou um potencial de materialização do dano (como propõe o nome escolhido para o próprio índice, ou seja, uma representação do risco potencial de inundações), para fins de mapeamento territorial deste risco potencial de inundações para suporte ao planejamento urbano na bacia hidrográfica em estudo.
- vii. Análise crítica de todos os resultados, gerando aprendizado para definir diretrizes para orientação do zoneamento de uso e ocupação futura do solo,

no processo de planejamento, evitando ocupar ou adensar áreas naturalmente susceptíveis a inundação e buscando reduzir vulnerabilidades identificadas.

1.4 Estudo de Caso

O desenvolvimento urbano do Rio de Janeiro tem levado à saturação da área urbana central, tornando áreas periféricas, onde ainda existem espaços livre e com valor de terras abaixo do padrão, foco de expansão urbana. Essa expansão se dá principalmente na Zona Oeste da cidade, onde estão localizados os bairros de Guaratiba e Campo Grande, por exemplo, que abrangem a maior parte da bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu, foco deste trabalho.

A bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu está localizada na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro e inserida na macrorregião de drenagem da Baía de Sepetiba. Tal área abrange os bairros de Guaratiba, Pedra de Guaratiba, Campo Grande, Senador Vasconcelos, Santíssimo e Senador Camará, sendo que a região mais expressiva são os bairros de Campo Grande e Guaratiba. De acordo com o PUB-Rio – Plano Urbanístico Básico (1977), essa região faz parte da área de planejamento AP-5, conforme ilustrado na Figura 1.1, caracterizada por ser uma antiga zona rural do município, onde o processo de expansão é menos recente e se dá entre a população de média e baixa renda, com a presença de loteamentos irregulares e clandestinos.

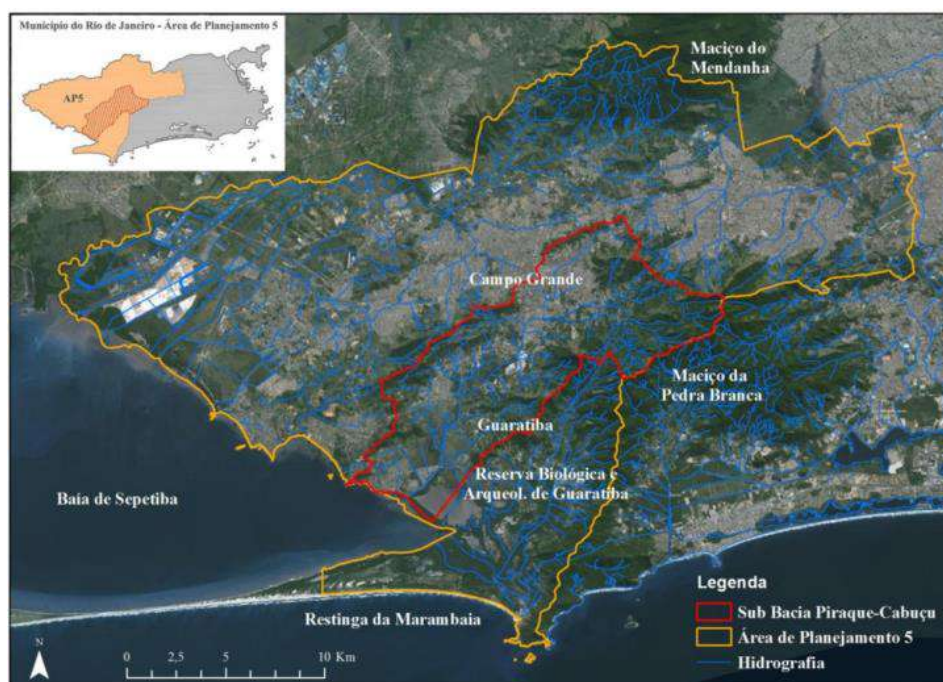


Figura 1.1: Mapa de hidrografia e localização da Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, no Rio de Janeiro.

Fonte: Araujo, E. C. et al. (2016)

Devido a sua configuração, a bacia caracteriza-se por possuir uma zona natural pantanosa ao longo da foz. Segundo o Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais do Rio de Janeiro (PDMAP, 2012), isso ocorre, pois, praticamente toda a área de manguezais encontra-se abaixo da cota de 0,5 m, considerada como uma cota sob influência da maré e, portanto, frequentemente invadida por águas advindas da Baía de Sepetiba. Ainda em relação à região de manguezais, também são encontradas áreas de apicuns, planícies hipersalinas em grande parte desprovidas de vegetais vascularizados (PELLEGRINI, 2000). De forma geral, a recomendação de ocupação urbana se faz para cotas de terreno maiores que 2,0 m.

Essas regiões administrativas são apontadas como as principais áreas de expansão horizontal do município até 2050. Mantida essa perspectiva, antes disso, até 2030, já teriam sido ocupados cerca de 655 hectares com crescimento urbano, seja por meio do mercado formal ou informal. Uma reportagem no Jornal *O Globo*, aponta que em Guaratiba, por exemplo, quase metade (46%) das áreas de expansão enfrentaria o perigo de inundações.

Do ponto de vista urbano, considerando o conflito entre ocupação urbana e fragilidades ambientais, essa área pode ser importante para absorver a expansão urbana, mas isso deve ser feito por meio de adequado planejamento, reconhecendo as fragilidades ambientais e os consequentes riscos de degradação, tanto ambiental, quanto urbana. Portanto, o desenvolvimento urbano deve ser realizado de forma sustentável, combinando necessidades do ambiente natural e do ambiente construído, e tomando ações para reduzir os riscos presentes e futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Hidrologia Urbana

Os processos de urbanização modificam as parcelas do ciclo hidrológico, incrementando o escoamento de águas pluviais, com a elevação de picos de escoamento. Há, ainda, uma inferência no escoamento de águas pluviais associada à redução de escoamento em rios menores durante a estação seca, pois reduz-se a recarga nestas regiões

2.1.1 O processo de urbanização e as inundações

A evolução da civilização, com a formação e crescimento das primeiras cidades, levou a grandes mudanças no meio físico para dar lugar a esta nova forma de organização social. Mais tarde, com o da era industrial e da migração da população rural para um perfil urbano, houve a quebra de um equilíbrio secular em que as cidades praticamente se mantiveram estáveis e, conseqüentemente, houve degradação do ambiente urbano, crescimento da insalubridade, da poluição de corpos hídricos e diminuição de áreas livres.

O rápido processo de urbanização, acentuado nos países periféricos na segunda metade do século XX, vem agravando consequências decorrentes de desastres naturais; afinal, mais pessoas, estruturas e bens acabam expostos aos efeitos desses desastres (MIGUEZ *et al.*, 2018). Embora usualmente o processo de crescimento urbano seja significativamente benéfico no desenvolvimento social e econômico das populações, em países com menor capacidade de investimento, também agravam-se as vulnerabilidades e as fragilidades inerentes à falta de planejamento urbano adequado e integração deste às dinâmicas da natureza.

A referida falta de orientação do planejamento urbano tem graves impactos negativos, principalmente em países periféricos, onde a urbanização e obras civis de drenagem são realizadas, em geral, de forma descontrolada e insustentável no longo prazo. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), atualmente 55% da população mundial vive em áreas urbanas e a expectativa é de que esta proporção aumente para 70% até 2050. Este crescimento coincide com um período em que muitos países estão

implementando processos de políticas descentralizadas, o que estaria resultando num aumento das responsabilidades locais (ONU, 2019).

A urbanização, quando ocorre sem o devido planejamento, representa uma fomentadora de possíveis problemas aos diversos subsistemas urbanos, inclusive ao sistema de drenagem pluvial, especialmente, nas mudanças geradas sobre a estrutura de uso solo.

Além das responsabilidades administrativas públicas referente à gestão eficiente de uma cidade, em particular, no que concerne à discussão desta dissertação, ao sistema de drenagem pluvial, destacam-se também os eventos climáticos extremos, como fatores disruptivos do bom funcionamento urbano. Estes eventos associados a mudanças no clima, além de causarem problemas popularmente conhecidos aos habitantes – enchentes, deslizamento de terra, destelhamento, entre outros –, também são considerados agentes agravantes de danos, quando o sistema de drenagem pluvial não se demonstra devidamente estruturado e adaptado.

No contexto brasileiro, o intenso processo de urbanização produziu o fenômeno da metropolização em torno de muitas capitais, o que levou ao consequente surgimento de áreas metropolitanas como São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Salvador, Goiânia e Manaus. De acordo com dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD-IBGE) de 2015 a maior parte da população brasileira, 84,72%, vive em áreas urbanas, como é possível observar no gráfico da Figura 2.1.

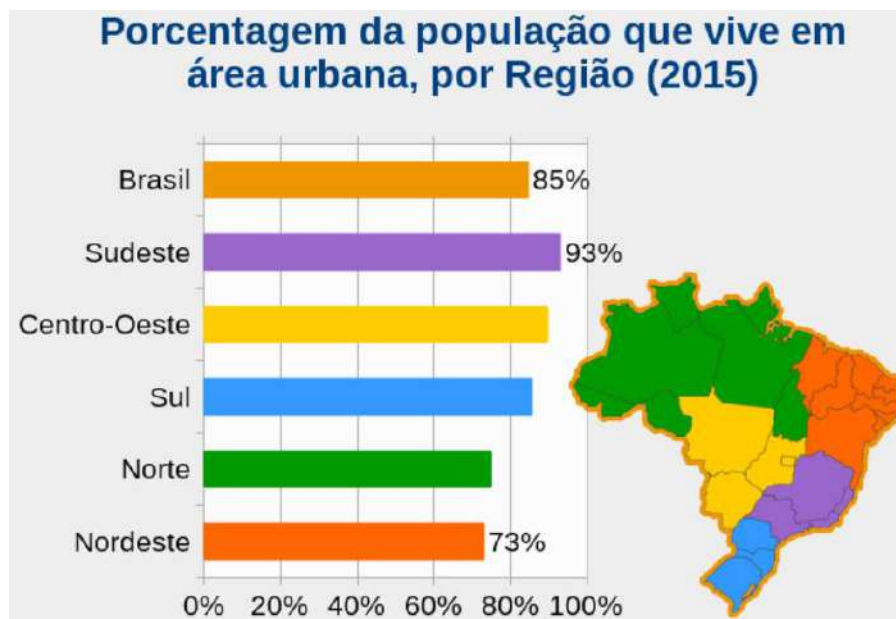


Figura 2.1: Porcentagem da população que vive em área urbana por região.

Fonte: IBGE, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2015.

As inundações urbanas podem causar grandes perdas econômicas e sociais, produzindo impactos como riscos à saúde pública e perda de vidas humanas; alagamento de habitações; propriedades comerciais e industriais, com perdas econômicas públicas e privadas; alagamento de vias públicas, gerando engarrafamentos; interrupção de serviços, como abastecimento de água, fornecimento de energia e coleta de esgotos (MIGUEZ e MAGALHÃES, 2010).

Os projetos de engenharia tradicional, realizados de modo a remover as águas pluviais o mais rápido possível do espaço urbano, não só intensificaram o processo de inundações a jusante, uma vez feita a substituição de superfícies naturais por superfícies impermeabilizadas (GUIMARÃES e MIGUEZ, 2020), como também aumentaram a contaminação dos recursos hídricos e negligenciaram o potencial de rios e córregos de fornecerem serviços ambientais (KOZAK *et al.*, 2020). Como consequência, tornaram-se comuns não apenas os transtornos relacionados à inundação em grandes centros urbanos, como também os impactos ambientais.

Em seu relatório do custo humano dos desastres (CRED, 2020), a ONU aponta que 44% dos desastres naturais ocorridos entre os anos de 2000 e 2019 tiveram origem em eventos de inundações (Figura 2.2).

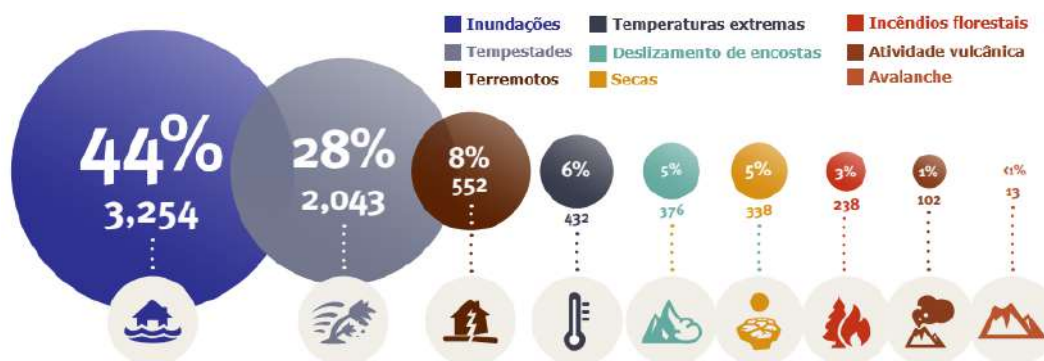


Figura 2.2: Ocorrência de desastres naturais, por tipo, entre 2000 e 2019.

Fonte: CRED (2020).

O mundo enfrentou 7.348 eventos de desastres entre 2000 e 2019, 75% a mais do que os eventos de desastres registrados entre 1980 e 1999. Dentre esses, 3.254 são eventos de inundação, ou seja, 135% a mais do que o período anterior (Figura 2.3).



Figura 2.3: Total de desastres naturais, por tipo, entre 1980-1998 vs. 2000-2019.

Fonte: CRED (2020).

No período entre 1980 e 1999, ocorreram 3.656 desastres climáticos e, nos últimos 20 anos, foram registrados 6.681 desastres climáticos que afetaram 3,9 bilhões de pessoas e causaram 510.837 mortes, o que representa um significativo aumento. O relatório da Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres (CRED, 2020) aponta que essa é uma evidência clara de que, em um mundo onde a temperatura média global em 2019 foi 1,1 °C acima do período pré-industrial, os impactos estão sendo

sentidos na frequência aumentada de eventos climáticos extremos, incluindo ondas de calor, inundações, secas, furacões, incêndios florestais e tempestades de inverno.

Eventos extremos como inundações, tempestades, secas, ondas de calor e incêndios florestais, foram responsáveis por quase 91% de todos os desastres naturais registrados nos últimos 20 anos. No entanto, apesar do aumento dos desastres no período de comparação, o número de mortes não aumentou significativamente. O período 2000-2019 registrou 1,23 milhão de mortes por desastres, um pouco superior à de 1980-1999 (1,19 milhão). O relatório atribui este fato às melhorias feitas nos primeiros avisos, preparação para desastres e respostas, o que configura um melhor planejamento para lidar com esses tipos de eventos. No contexto econômico, as perdas totais devido aos desastres naturais entre 2000 e 2019 foram de 2,97 trilhões de dólares (USD), dos quais 22% foram de inundações.

Na medida em que a urbanização aumenta e se expande, ela ocupa as várzeas de inundação e impermeabiliza o solo, dificultando a infiltração da água pluvial e realocando essas águas para outros lugares mais baixos (REZENDE, 2018). Isto é, as inundações acontecem quando os cursos de água naturais não são mais capazes de conduzir todos os fluxos superficiais, causando transbordamentos e inundação de planícies de inundação. Apesar do processo ser natural e sazonal, as inundações podem produzir vários resultados negativos, ao acessar áreas urbanizadas (MIGUEZ e VERÓL, 2016).

As falhas no sistema de drenagem, além de contribuírem para perdas econômicas associadas à interrupção de comércio e serviços, também afetam a mobilidade e o saneamento e aumentam o risco de doenças de veiculação hídrica (VERÓL *et al.*, 2020). Esta série de interrupções pode ser reconhecida como efeito cascata, ou seja, devido a interligação dos sistemas urbanos, uma área inicialmente impactada pode impulsionar uma sequência de eventos secundários para os demais eixos, dificultando, inclusive, a previsão de seu potencial destrutivo e a recuperação de perdas (GUIMARÃES e MIGUEZ, 2020). A Tabela 2.1 resume os diferentes impactos da urbanização sobre uma bacia hidrográfica.

Tabela 2.1: Impactos da urbanização sobre as inundações

Ação da urbanização	Efeitos
Remoção da vegetação natural	Aumento dos volumes de escoamento superficial e das vazões de pico; maiores velocidades de escoamento; crescimento dos processos de erosão e consequente sedimentação em canais e galerias de drenagem.
Aumento das taxas de impermeabilização	Aumento dos volumes de escoamento superficial e das vazões de pico; menos depressões superficiais, permitindo menores retenções; menos irregularidade nas superfícies de escoamento e maiores velocidades de escoamento.
Construção de redes de drenagem artificial	Significativo crescimento das velocidades de escoamento e antecipação do pico das cheias.
Ocupação de áreas ribeirinhas e planícies de inundação	População diretamente exposta a inundações periódicas em áreas naturais de inundação; ampliação das áreas alagáveis, com a diminuição do espaço natural que deveria estar disponível para o armazenamento temporário e acomodação das cheias.
Ocupação desordenada de encostas e favelização	Acréscimo dos volumes superficiais de escoamento, somados a grande quantidade de resíduos sólidos e lixo produzidos pelas encostas ocupadas; obstrução parcial ou total de dispositivos de drenagem; degradação da qualidade da água; população exposta a riscos de deslizamento.
Disposição de resíduos sólidos e de águas residuais na rede de drenagem	Degradação da qualidade da água; degradação do ambiente natural e construído, proliferação de doenças; sedimentação na rede de canais e obstrução das captações de água de chuva.
Interferências recíprocas entre redes de infraestrutura: pontes estreitas sobre rios, tubulações de água cortando galerias, entre outros, configurando singularidades locais que restringem o escoamento.	Redução pontual da capacidade de escoamento dos condutos afetados, gerando remansos e alagamentos a montante.

Fonte: CARNEIRO; MIGUEZ, 2011

Segundo TUCCI (2012) as principais causas para disfunções urbanas associadas à água são:

- A expansão irregular sobre as áreas de mananciais de abastecimento humano, comprometendo a sustentabilidade hídrica das cidades.
- A população de baixa renda tende a ocupar as áreas de risco de encostas e de áreas de inundações ribeirinhas, devido a falta de política habitacional adequada.
- Aumento da densidade habitacional, com consequente aumento da demanda de água e do aumento da carga de poluentes sem tratamento de esgoto, lançados nos rios próximos às cidades.
- O planejamento urbano tem levado a uma excessiva impermeabilização das áreas públicas; canalização dos rios urbanos que, posteriormente, são ainda cobertos por concretos e avenidas, produzindo inundações em diferentes locais da drenagem.

Portanto, em resumo, a urbanização provoca mudanças significativas na situação natural de equilíbrio das cheias. De forma geral, a consequência dessa alteração é propensa a intensificar e antecipar o ápice de um evento pluvial extremo, considerando que uma maior quantidade de precipitação torna-se disponível para escoamento, devido ao incremento da fração de escoamento superficial. Adicionalmente, essa precipitação tende a escoar com maior velocidade, em função da redução das retenções superficiais e na vegetação, em decorrência da impermeabilização da bacia hidrográfica, conforme a Figura 2.4.

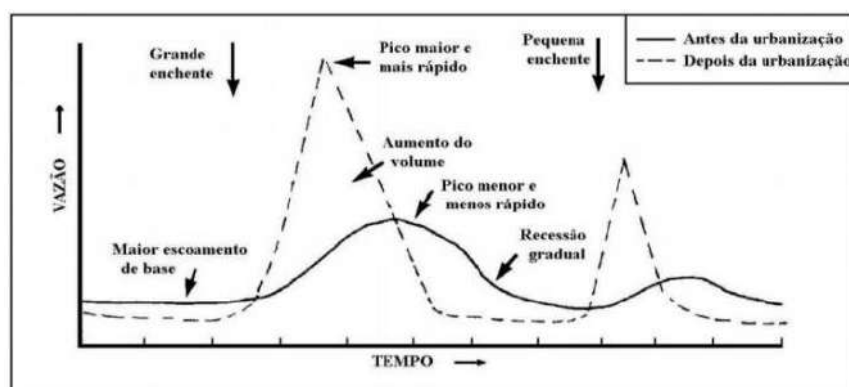


Figura 2.4: Efeito da urbanização no hidrograma de uma bacia hidrográfica.

Fonte: SCHUELER (1987 *apud* VERÓL, 2013).

2.1.2 Drenagem Urbana: Processo Evolutivo

Dentre as estratégias desenvolvidas a fim de planejar e controlar de forma adequada a drenagem pluvial, a presente pesquisa ressalta, na origem do processo evolutivo de transição para uma abordagem mais sustentável, as técnicas LID¹ e BMP², com a finalidade de proporcionar aumento de eficiência para o sistema de drenagem pluvial no ambiente urbano (TASSINARI, 2014), através de uma melhor integração com os processos naturais.

Duas situações principais podem ser responsáveis por causar alagamentos significativos em áreas urbanizadas. A primeira situação acontece quando uma parcela da população, sem alternativas de habitação e sem planejamento, ocupa o espaço que deveria ser dedicado à dinâmica das águas – margens de um rio, por exemplo – de forma equivocada. A segunda situação, formal, é motivada pelo processo evolutivo no meio urbano, que leva ao excesso de impermeabilização da superfície do solo, aumentando a dimensão e a frequência de alagamentos. Obras urbanas, realizadas de forma equivocada, também podem levar à obstrução (parcial ou total) do fluxo de água – processo construtivo de diques; implantação de pontes; planejamento e execução de drenagem pluvial incorreta; sistema de tubulação bloqueados; entre outras situações (CANHOLI, 2015).

Dentre as estratégias desenvolvidas a fim de planejar e controlar de forma adequada a drenagem pluvial, a presente pesquisa ressalta, na origem do processo evolutivo de

¹ *“Uma eficiente ferramenta que vem sendo utilizada para aproximar a drenagem urbana ao desenvolvimento sustentável é o conceito de low impact development (LID). O LID apresenta o planejamento de espaços urbanos por meio da conservação de processos hidrológicos, redirecionando as águas pluviais para seu aproveitamento, sua infiltração e sua evaporação [...], mitigando os impactos provenientes da urbanização desordenada.” (ZANANDREA; SILVEIRA, 2019, p. 1196).*

² *“Uma Melhor Prática de Gestão é definida pela EPA como uma técnica, medida ou controle estrutural que é usado para um determinado conjunto de condições para gerenciar a quantidade e melhorar a qualidade do escoamento de águas pluviais de maneira econômica.” (OC WATERSHEDS CALIFORNIA, 2022).*

transição para uma abordagem mais sustentável, as técnicas LID e BMP, com a finalidade de proporcionar aumento de eficiência para o sistema de drenagem pluvial no ambiente urbano (TASSINARI, 2014), através de uma melhor integração com os processos naturais.

As inundações exacerbadas pelo processo evolutivo urbano acontecem, tipicamente, em bacias com menor dimensão territorial na própria escala urbana. Como resultado, quase todos os grandes e médios municípios em território nacional sofrem problemas por causa do processo evolutivo urbano, sem o devido planejamento e sem seguir os protocolos técnicos adequados para uma urbanização sustentável e sólida (CANHOLI, 2015).

Vale salientar também que, no cenário urbano brasileiro, a drenagem é planejada e executada a fim de atender ambientes em que, na maioria das vezes, a urbanização já está instalada – em fase intermediária, ou até mesmo em fase final, muitas vezes com atraso em relação ao próprio crescimento urbano. Diante deste cenário, encontram-se variados desafios técnicos para a implementação da drenagem pluvial de forma eficiente, desde a criação do projeto até a sua execução. Um obstáculo comum no contexto nacional refere-se à limitação de medidas devido a aspectos físicos, além de desafios relacionados à legislação e/ou atributos sociais, justamente porque a urbanização já chegou no local (BOTELHO, 2017).

Souza, Cruz e Tucci (2012), ao considerarem o processo evolutivo urbano no século vigente, e levarem em consideração também a evolução científica nos campos sanitários, destacam que os gestores responsáveis pela drenagem pluvial possuem responsabilidades e funções fundamentais em relação a questões de saúde, especialmente, na prevenção de patologias por meio de procedimentos técnicos e instrumentos eficazes. Muitas destas responsabilidades estão presentes desde a origem da evolução contemporânea da drenagem urbana, pós-cidade industrial, relacionadas com o princípio higienista, com diretrizes e técnicas que visam agilidade no escoamento de águas das chuvas por meio da canalização destes escoamentos.

A tendência higienista, por exemplo, refere-se a um resultado positivo específico, uma vez que a cidade industrial padecia de inúmeras doenças de veiculação hídrica, por conta das más condições sanitárias. Entre o final do século XX e início do século XXI,

surgiu, porém, uma inquietação mais aguda referente aos impactos causados ao meio ambiente e, nessa esteira, preocupações com uma solução mais sustentável para os sistemas de drenagem se materializaram. Determinados governantes municipais no Brasil decidiram implantar o gerenciamento referente à drenagem pluvial com o apoio da técnica BMP, com a finalidade de adotar um sistema de medidas compensatórias sobre as consequências provocadas pela impermeabilização de áreas superficiais (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012). De fato, o termo “técnicas compensatórias” em drenagem urbana se consolidou no Brasil, como meio para a proposição de sistemas de drenagem urbana sustentável.

2.2 Gerenciamento de Risco em Inundações

O conceito de risco é utilizado em diversas áreas do conhecimento, gerando uma grande variedade de tipos de riscos, como riscos sociais, econômicos, industriais, tecnológicos, naturais e ambientais.

Segundo o dicionário online Michaelis (MICHAELIS, 2021):

Risco: possibilidade de perigo, que ameaça as pessoas ou o meio ambiente; probabilidade de prejuízo ou de insucesso em determinado empreendimento, projeto, coisa etc. em razão de acontecimento incerto, que independe da vontade dos envolvidos; incidente que acarreta indenização, em contratos de seguro; em situação de risco, responsabilidade sobre a perda ou o dano.

Segundo a definição da *United Nations International Strategy for Disaster Reduction* (UNISDR), o risco pode ser definido como a probabilidade de consequências prejudiciais, ou perdas previstas (mortes, ferimentos, propriedades danificadas, meios de subsistência, interrupção de atividades econômicas ou destruição ambiental) resultarem de entre perigos naturais e circunstâncias socioeconômico vulneráveis. Segundo Miguez *et al.* (2018) tal definição tem interpretação similar à do Código de Defesa Civil (BRASIL, 2009), produzido pela Secretaria Nacional de Defesa Civil/Ministério da Integração Nacional, onde, em sua primeira definição, o risco é definido como uma medida de dano potencial ou prejuízo econômico expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência e de intensidade ou grandeza das consequências previsíveis sobre um sistema afetado.

Ciria (2010 *apud* Rezende, 2018) aponta que, por meio de um plano nacional de proteção da infraestrutura (NIPP - *National Infrastructure Protection Plan*), o *US Department of Homeland Security* (DHS) define o risco em função da ameaça, vulnerabilidade e consequência, conforme Equação $Risco = f(A, V, C)$ (2.1).

$$Risco = f(A, V, C) \quad (2.1)$$

Onde A é a ameaça, isto é, evento com potencial de causar danos (perigo); V trata-se da vulnerabilidade, avaliando o grau de susceptibilidade à perturbação e C a consequência, ou seja, impactos sociais, econômicos e ambientais de um evento.

Para Samuels e Gouldby (2009) e Sayers *et al.* (2013), o risco é entendido como a combinação da possibilidade de um evento particular ocorrer e consequente o impacto causado por esse evento. Portanto, o risco apresenta duas componentes - a probabilidade de ocorrência de um evento adverso e as consequências advindas dessa ocorrência, conforme ilustrado na Figura 2.5.



Figura 2.5: Função do risco

O termo risco pode ser interpretado em uma série de definições distintas, dependendo do contexto em que são utilizadas. A multiplicidade de significados associada ao conceito de risco, frequentemente, leva a narrativas equivocadas e tal situação aumenta o grau de complexidade sobre o processo analítico dos riscos. No campo da Engenharia, o conceito de risco relaciona-se com a perspectiva das perdas que podem ocorrer em virtude desta circunstância perigosa (ZONENSEIN, 2007).

Um dos riscos associados a desastres naturais, de forma significativa, no campo da engenharia, está o risco de inundação. A Diretiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e

do Conselho (UNIÃO EUROPEIA, 2007) oferece conceitos relevantes sobre inundação e risco de inundação, conforme descrito a seguir:

Artigo 2.o

Para efeitos da presente directiva, para além das definições de «rio», «bacia hidrográfica», «sub-bacia hidrográfica» e «região hidrográfica» que constam do artigo 2.o da Directiva 2000/60/CE, aplicam-se as seguintes definições:

1. «Inundação»: cobertura temporária por água de uma terra normalmente não coberta por água. Inclui as cheias ocasionadas pelos rios, pelas torrentes de montanha e pelos cursos de água efémeros mediterrânicos, e as inundações ocasionadas pelo mar nas zonas costeiras, e pode excluir as inundações com origem em redes de esgotos;

2. «Risco de inundação»: a combinação da probabilidade de inundações e das suas potenciais consequências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as actividades económicas. (UNIÃO EUROPEIA, 2007, p. 29)

No âmbito científico, por fim, e para marcar aqui a definição que será utilizada no desenvolvimento desta dissertação, o risco trata, geralmente, de um evento com dada probabilidade, associado a um fato específico capaz de gerar efeitos adversos sobre um sistema socioeconômico (SAYERS; YUANYUAN; GALLOWAY; PENNING-ROWSELL; FUXIN; KANG; YIWEI; QUESNE, 2013).

2.2.1 Elementos associados ao risco

A primeira componente participante da construção conceitual do risco de inundações é o perigo, que se refere à probabilidade de ocorrência de uma dada inundação, que é disparada por um evento de chuva (componente integralmente natural), que cai sobre uma bacia e tem suas águas transformadas em escoamento superficial, que provocarão uma inundação, que, por sua vez, atingirá determinada planície de inundação (MIGUEZ *et al.*, 2018), onde sistemas socio-econômico-ambientais podem ser afetados e sofrer danos, configurando estes sistemas como o segundo componente do risco. As consequências dependerão da magnitude da inundação; por exemplo, da profundidade da inundação, da

velocidade do escoamento e da duração do evento; bem como a vulnerabilidade local, que será determinada por fatores naturais, sociais, econômicos e ambientais, que irão agravar o dado risco de sensibilidade do comunidades específicas ao possível dano (TINGSANCHALI, 2012).

Além de expressar a possibilidade de dano material, deve-se reconhecer que consequências mais subjetivas podem surgir sobre um sistema social. É importante considerar o contexto em que ocorre o risco, com possíveis desdobramentos tangíveis e intangíveis. O desastre pressupõe que certas condições de risco existam antecipadamente. Em outras palavras, os desastres são a materialização de riscos pré-existentes. Portanto, a avaliação prévia do risco é importante medida para gestão e mitigação do risco. Por outro lado, quando definidos como a possibilidade de perdas futuras, os desastres podem ser explicados pela pré-existência de ameaças potenciais e certas características de uma sociedade que sofreu certo grau de dano. O nível de risco de uma sociedade está relacionado ao seu nível de desenvolvimento e sua capacidade de alterar os fatores de risco que a afetam. Nesse sentido, os desastres podem ser considerados riscos não adequadamente gerenciados (CARDONA, 2003).

No tocante aos efeitos, os fatores referentes à vulnerabilidade estão relacionados aos recursos expostos ao risco diante de uma ameaça de inundação, bem como à capacidade resistência ao dano (susceptibilidade ou sensibilidade) e à capacidade de recuperação do sistema (resiliência). A susceptibilidade ou sensibilidade é caracterizada pelo nível de dano que pode ser causado em um determinado contexto intrínseco de resistência do sistema, em virtude das consequências geradas por uma inundação, assim como a sensibilidade também pode ser associada à aptidão em apresentar soluções, isto é, buscar alternativas com a máxima eficiência e velocidade possível em cada episódio de inundação, caminhando em direção a respostas mais resilientes (KOKS; JONGMAN; HUSBY; BOTZEN, 2015).

A vulnerabilidade, portanto, combina tanto a susceptibilidade a dano quanto a resiliência do sistema e é caracterizada por circunstâncias de origem física, social, econômica e natural, cujas características definem se uma determinada localidade é mais suscetível aos efeitos causados pela ameaça iminente. É importante frisar que o risco relacionado à inundação é determinado pela relação entre o perigo, as condições

oferecidas pelos recursos expostos, em função do seu grau de vulnerabilidade, em uma combinação que integra atributos característicos do episódio gerado pela natureza com atributos de origem social e econômica, em virtude da exposição do sistema. Os impactos, portanto, podem ser materializados a partir de dois fatores principais: a) Exposição: em virtude dos patrimônios e indivíduos envolvidos na região impactada; b) Vulnerabilidade: em virtude da sensibilidade em razão da sociedade e dos recursos em exposição poderem sofrer danos (de diversos tipos) no período em que acontece o episódio de inundação (TEBALDI, 2014).

Por meio da Figura 2.6, Zonensein (2007) apresenta uma relação de elementos de risco em casos de inundação em um trabalho pioneiro na UFRJ, que buscava a representação do risco sob a lógica da quantificação de perdas e orientação de investimentos em mitigação.

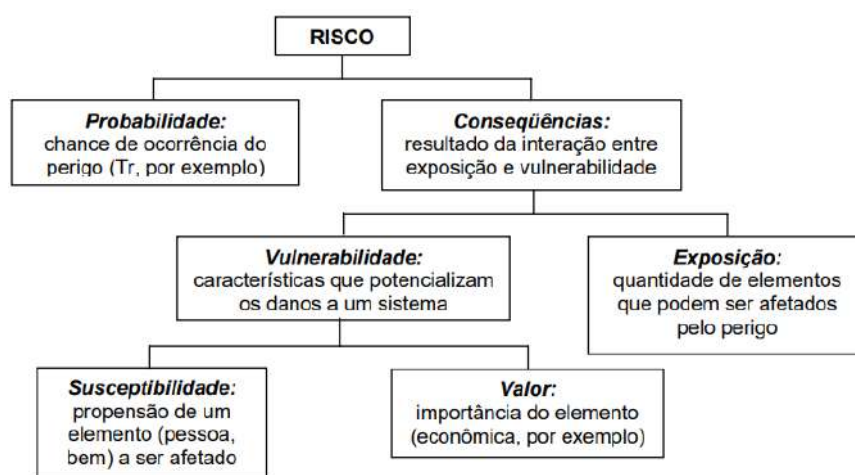


Figura 2.6: Relação de elementos de risco em casos de inundação.

Fonte: Zonensein (2007, p. 7).

Nota-se que esta proposição ainda não introduzia a variável associada à resiliência, que desempenha um papel importante na priorização de proteção de sistemas socioeconômicos mais frágeis.

Em relação aos danos causados no período em que acontece o episódio de inundação, Zonensein (2007) destaca o seguinte:

Danos tangíveis são aqueles cujo valor econômico associado é bem definido, tal como danos físicos a construções (sua estrutura e conteúdo). Já danos à saúde, fatalidades e impactos ambientais são classificados como intangíveis, devido à sua difícil estimação monetária. Danos diretos são os resultantes do contato direto com a água da inundação e referem-se basicamente à deterioração física de bens e pessoas. Os principais danos indiretos, por sua vez, decorrem de perturbações físicas e econômicas do sistema produtivo, além de custos emergenciais por causa da inundação e podem afetar áreas significativamente maiores do que aquela diretamente afetada pela inundação. Incluem custos de limpeza e de serviços de emergência, lucro cessante, transtornos ao tráfego de veículos, interrupção de serviços de telecomunicação e perda de valor da propriedade. (ZONSEIN, 2007, p. 7)

Em geral, os danos podem ser classificados em duas categorias: tangíveis e intangíveis e em diretos e indiretos. Os danos tangíveis são aqueles cujo valor econômico associado é bem definido e podem ser facilmente (ou, pelo menos, concretamente) quantificados, como, por exemplo, os danos físicos a construções, considerando sua estrutura e conteúdo. Já os danos intangíveis são aqueles de difícil estimação monetária, como danos à saúde no longo prazo (inclusive saúde mental, ansiedade e comprometimento do bem-estar), fatalidades e impactos ambientais, por exemplo. Os danos diretos referem-se basicamente à deterioração física de bens e pessoas, como sendo resultantes do contato direto com a água da inundação. Por outro lado, os danos indiretos são aqueles que decorrem de distúrbios físicos e de caráter econômico do sistema produtivo, além de custos circunstanciais, podendo atingir um perímetro muito maior do que o afetado diretamente pela inundação. Em resumo, os danos podem ter diferentes formas e consequências, sendo importante considerar todos os aspectos para avaliar os impactos e planejar medidas de prevenção e mitigação (ROOS; HARTMANN; SPIT; JOHANN, 2017).

Por meio da Figura 2.7, Zonensein (2007) oferece uma relação com exemplos de danos gerados em episódios de inundação, segmentado por cinco setores principais: habitação; comércio e serviços; indústria; serviços públicos e infraestrutura; patrimônio histórico-cultural. Nesta relação classificatória, a autora organizou, ainda, os danos em

tangíveis diretos, tangíveis indiretos, intangíveis diretos e intangíveis indiretos, conforme a seguir:

SETOR	DANOS TANGÍVEIS		DANOS INTANGÍVEIS	
	DIRETOS	INDIRETOS	DIRETOS	INDIRETOS
Habitacional	Danos físicos à construção, estrutura e seu conteúdo	Custos de limpeza, alojamento, medicamentos	Fatalidades	Estado psicológico de estresse e ansiedade; danos a longo prazo à saúde
Comércio e Serviços	Danos físicos à construção, estrutura e seu conteúdo Perdas e danos ao estoque	Custos de limpeza Lucro cessante Desemprego Perda de banco de dados	Fatalidades	Estado psicológico de estresse e ansiedade; danos a longo prazo à saúde
Industrial	Danos físicos à construção, estrutura e seu conteúdo Perdas e danos ao estoque de matérias-primas	Custos de limpeza Lucro cessante Desemprego Perda de banco de dados	Fatalidades	Estado psicológico de estresse e ansiedade; danos a longo prazo à saúde
Serviços públicos e infra-estrutura	Danos físicos à construção, estrutura e seu conteúdo Danos físicos ao patrimônio	Custos de limpeza e de interrupção de serviços Custos de serviços de emergência	Fatalidades	Estado psicológico de estresse, ansiedade e falta de motivação; danos a longo prazo à saúde Inconvenientes de interrupção de serviços
Patrimônio histórico cultural	Danos físicos ao patrimônio	Custos de limpeza e de interrupção de serviços	Fatalidades	Inconvenientes de interrupção de serviços

Figura 2.7: Relação de elementos de risco em casos de inundação.

Fonte: Zonensein (2007, p. 8).

Segundo Pessotto (2020), em alguns casos, são cometidos equívocos interpretativos quanto aos termos risco e perigo, que, apesar de apresentarem semelhanças, apresentam dois conceitos que denotam definições distintas. O conceito associado ao perigo, de maneira geral, indica circunstâncias físicas e/ou tecnológicas que podem gerar danos para os indivíduos, ou ainda, para imóveis e/ou para o biossistema. No contexto da inundação, o perigo está relacionado aos episódios de grande intensidade pluvial, transformados em escoamento por meio de sua passagem pela bacia, com uma determinada regularidade que, conseqüentemente, pode se tornar em provável episódio de inundação. De acordo com o autor,

[...] é necessário que se faça a distinção entre os eventos extremos na natureza, que não são necessariamente perigosos para as pessoas, daqueles de caráter perigoso. Os eventos naturais ocorrem de forma independente das atividades humanas e são objeto de investigação científica de meteorologistas, hidrólogos e geólogos. Por outro lado, sistema social também pode ser considerado como parte operante desses eventos. A interação dos dois cria recursos e, também, perigos. [...] Nas pesquisas realizadas pela geografia dos riscos, o perigo é um evento que pode causar perdas graves no local onde acontece, sendo potencializado em ambientes habitados por pessoas, por causar danos a elas. Essa forma de interpretar o perigo, usando o ser humano como centro de sua definição, devido a sua localização, ação e percepção em relação aos fenômenos naturais, resulta na definição de perigo. (PESSOTTO, 2020, p. 33)

Porém, o perigo por si só, como visto, não representa risco. O risco advém da possibilidade de dano a um sistema e necessariamente envolve o cômputo de consequências negativas. Miguez *et al.* (2018) enfatiza que, no caso das inundações, os perigos estão relacionados à ocorrência de eventos de chuvas intensas, que se transformam em vazão ao passarem pela bacia. Portanto, a identificação do perigo representa a possibilidade de dano e o dano real depende do grau de exposição ao perigo e das características do destinatário. Ou seja, se uma área natural não contiver elementos valiosos que possam ser danificados, não há risco de passagem de inundação. Assim, muitas vezes se fala em risco, em lugar de perigo, ao se referir a eventos de inundações, mas o fato é que uma inundação natural, ainda que de grande magnitude, mas que não afetou nenhum sistema exposto, não representa risco algum, por definição.

Comparativamente a outros tipos de perigos, as inundações apresentam particularidades que as tornam gerenciáveis, ao contrário de outros tipos de desastres naturais cuja probabilidade de ocorrência não pode ser modificada, como no caso de furacões, terremotos, vulcões etc. Embora relacionado com a ocorrência de chuvas intensas, cujos eventos não podem ser geridos, o perigo de inundações é materializado pela cheia, o que significa que há possibilidade de gerenciar os riscos não só focando em aumentar a resistência do sistema e reduzir seus danos, mas também, buscando diminuir o perigo envolvido na formação e passagem da inundação pelo sistema exposto, por meio de uso de medidas de mitigação de inundação e adequado planejamento de uso do solo.

Em nível conceitual, os protocolos de gerenciamento de riscos de enchentes são compostos por diversas partes, incluindo a ação sobre o perigo, onde há o estudo da evolução da água ao longo do caminho para chegar a um determinado local de baixada ou planícies de inundação, assim como ações para reduzir a fragilidade do sistema afetado (REZENDE, 2018).

Segundo a definição de Sayers et al. (2013), a expectativa para a ocorrência de uma cheia não se restringe apenas à possibilidade da chuva intensa, mas também considera a performance do sistema de escoamento, que se preocupa em saber qual é o caminho entre a fonte da inundação e o local afetado. Ademais, à vulnerabilidade de um sistema se acrescenta um componente chave que se refere à capacidade do sistema em se recuperar após um evento, que pode ser compreendida como resiliência. Essa representação detalhada do risco de inundações permitem uma melhor compreensão das possíveis ações para reduzir os riscos, por meio da adoção de medidas fundamentais para diminuir o perigo e, também, medidas de contenção de exposição e de vulnerabilidade para diminuir os danos, estando incluída nas ações sobre a vulnerabilidade tanto as medidas para redução de danos, quanto as de recuperação.

2.2.2 A importância da resiliência em casos de inundação para o aumento de eficiência no planejamento urbano das cidades

A conceituação de resiliência vem se destacando como um importante componente do risco de enchentes, uma vez que se refere à habilidade do sistema em se recuperar após um evento incomum, como por exemplo, uma inundação de grande porte. Desse modo, a resiliência é originalmente considerada como um componente da vulnerabilidade, atuando para reduzir esta vulnerabilidade, uma vez que o aumento da flexibilidade ou da capacidade de recuperação pode e deve contribuir para a redução de danos ao sistema como um todo (VERÓL, 2013). Recentemente, a literatura técnica vem dando destaque a este conceito, que acabou ganhando um patamar próprio na discussão científica, muitas vezes assumindo protagonismo nas discussões de risco.

Em termos de resiliência da infraestrutura, conceito usual em discussões de Engenharia, há um conjunto de fatores que determina a capacidade de um determinado bem ou um conjunto de bens em promover serviços de caráter essencial, mesmo quando

ameaçados por eventos extraordinários, como ocorrente em episódios de inundação. Destaca-se que a resiliência também inclui a velocidade de recuperação e a habilidade do sistema para voltar ao funcionamento normal, após o fim da situação de perigo. Contudo, é relevante dizer que esta é apenas uma ideia parcial do exato entendimento a respeito de resiliência urbana a desastres. O conceito de resiliência, em seu pleno significado, está intimamente ligado a características sociais amplas (e não apenas de funcionamento de infraestrutura), conforme o exposto por Miguez e Veról (2016). Como exemplo, uma definição mais assertiva sobre resiliência urbana no combate às inundações pode ser explicada como a capacidade de uma cidade em absorver a ocorrência de uma enchente e de se reorganizar, caso aconteçam problemas graves de clivagem socioeconômica e de lesões e natureza física, além de prevenir a perda de vidas e prejuízos, e de manter a sua identidade socioeconômica (LIAO, 2012).

Na definição apresentada por Yamagata e Maruyama (2018), resiliência é a proficiência de uma cidade ou de comunidades expostas a episódios de inundação no quesito de resistência, absorção, adaptação e recuperação mais veloz, frente aos efeitos gerados em desastres, incluindo a preservação e a restauração de suas estruturas e funções básicas, como serviços essenciais e sistemas de transporte. Esse ideal pode ser alcançado por meio da implementação de medidas de redução de vulnerabilidade, tais como sistemas de alerta precoce, infraestrutura resistente a enchentes e alagamentos e planos de contingência e capacitação da população para lidar com inundações.

Neste ponto, vale lembrar que a definição de resistência a inundações está mais relacionada com a prevenção de enchentes e o controle de seus impactos, por meio de medidas estruturais, como a construção de barragens e sistemas de drenagem, por exemplo. Já no que tange à resiliência a inundações, esta está mais relacionada com a capacidade de um local de se adaptar aos eventos de inundação, com medidas de planejamento urbano e gestão de riscos. Muitas vezes, medidas menos associadas a obras físicas e mais voltadas para o uso de infraestrutura verde e azul auxiliam na inserção de uma maior elasticidade na resposta dessas medidas a uma inundação. Neste ponto, a combinação dessas duas abordagens pode proporcionar uma melhor gestão de riscos, com soluções mais eficazes e sustentáveis no longo prazo (MIGUEZ; VERÓL, 2016).

Planejamentos urbanísticos que levem em conta e se adaptem aos riscos de inundação podem ajudar a aumentar a capacidade de recuperação das cidades. Para construir cidades mais adaptadas às inundações, é possível utilizar de técnicas que melhorem a relação entre a água, as edificações e o ambiente urbano. Existem duas abordagens que podem contribuir para o aumento da capacidade de solução das cidades no enfrentamento às inundações. Uma delas busca levar as áreas urbanas para locais afastados dos grandes fluxos ou preparando-as para conviver melhor com estas ocorrências, por meio de medidas como a delimitação de zoneamento de regiões que possam ser inundadas, com a finalidade de escapar da construção em áreas mais sensíveis à inundações, proporcionando espaço para que as águas possam escoar e serem absorvidas mais facilmente ou construindo edifícios que resistam à esses eventos. A outra abordagem a ser considerada é a de reduzir a geração do escoamento causado por meio da transformação da chuva em vazão, reorganizando os padrões de escoamento da água. Isso pode ser feito usando técnicas de infiltração e armazenamento, com a implementação de ações de controle na origem, como o uso de paisagens multifuncionais e a construção de áreas de armazenamento e infiltração nos espaços públicos e projetos de infraestrutura verde-azul, bem como, por meio de ações de restauração fluvial (VERÓL, 2013).

A resiliência de uma cidade, portanto, pode ser medida pela sua capacidade de se adaptar e se recuperar dos impactos causados por desastres naturais, embora esta medição seja absolutamente não trivial. Outrossim, uma cidade pode ser considerada resiliente quando se destaca por uma forte liderança e coordenação, com clara definição das responsabilidades na gestão pública de riscos e catástrofes, assim como a participação efetiva de todas as partes envolvidas, com destaque para a responsabilidade do setor político em adotar medidas para produzir as avaliações de risco, que devem fazer parte da rotina administrativa, e que possuem extrema importância na preparação de subsídios para o planejamento urbano e o desenvolvimento de longo prazo, com um plano financeiro adequado para complementar e promover mecanismos de apoio às atividades de adaptação ou readequação urbana.

2.2.3 Gestão de riscos em desastres de inundações urbanas

O gerenciamento de riscos decorrentes de desastres requer a implementação de estratégias que visam prevenir a materialização de riscos futuros. O gerenciamento de riscos atuais e residuais colaboram para o fortalecimento da capacidade de recuperação efetiva. O gerenciamento de riscos é composto por três fases do ciclo de vida de eventos catastróficos: a fase anterior, a fase concomitante e a fase posterior ao evento de grande potencial de danos. A fase anterior abrange atividades correspondentes à prevenção, com o intuito de evitar a exposição do sistema e a ocorrência de danos graves no momento da catástrofe, à mitigação ou atenuação preocupa-se com a minimização dos impactos do evento quando este ocorrer, ao preparo, para estabelecer o planejamento e organização de ações rápidas de alerta e resposta. Por conseguinte, no momento da ocorrência do desastre, são realizados os procedimentos de resposta previamente previstos, de forma simultânea e emergencial. Além dessas providências, também são realizadas ações de recuperação imediata dos serviços básicos e da normalidade. Posteriormente ao desastre, as medidas de recuperação envolvem atividades que envolvem o processo de reestruturação em curto, médio e longo prazo e essa fase contém elementos de recuperação funcional de sistemas, linhas de financiamento para recuperação de perdas e eventual reconstrução de ativos danificados, visando restabelecer os serviços básicos e efetuar reparos a estruturas e redes de infraestrutura danificadas, restaurando o sistema produtivo com o objetivo também de impulsionar a revitalização do setor econômico (ARAÚJO, 2012).

Uma abordagem completa da gestão de riscos decorrentes de desastres naturais baseia-se em cinco etapas principais: (a) o reconhecimento ou identificação, avaliação e acompanhamento de riscos; (b) atenuação de riscos por meio de atos de antecipação e diminuição de riscos; (c) confecção de planos de contingência para ação emergencial durante os eventos; (d) a aplicação dos procedimentos previstos para atendimento emergencial, durante o evento; e (e) retorno pós-catástrofe, a reabilitação e reconstrução de estruturas, convertendo-se em atenuantes de risco em ocorrências futuras. Estas medidas em conjunto formam a gestão de riscos de catástrofes climáticas e trabalha como um ciclo permanente (YAMAGATA; MARUYAMA, 2018). Nesse sentido, destaca-se o

procedimento cíclico referente à gestão de risco e gerenciamento de desastres publicado pelo CEPED/RS-UFRGS (2016), conforme ilustrado por meio da Figura 2.8.

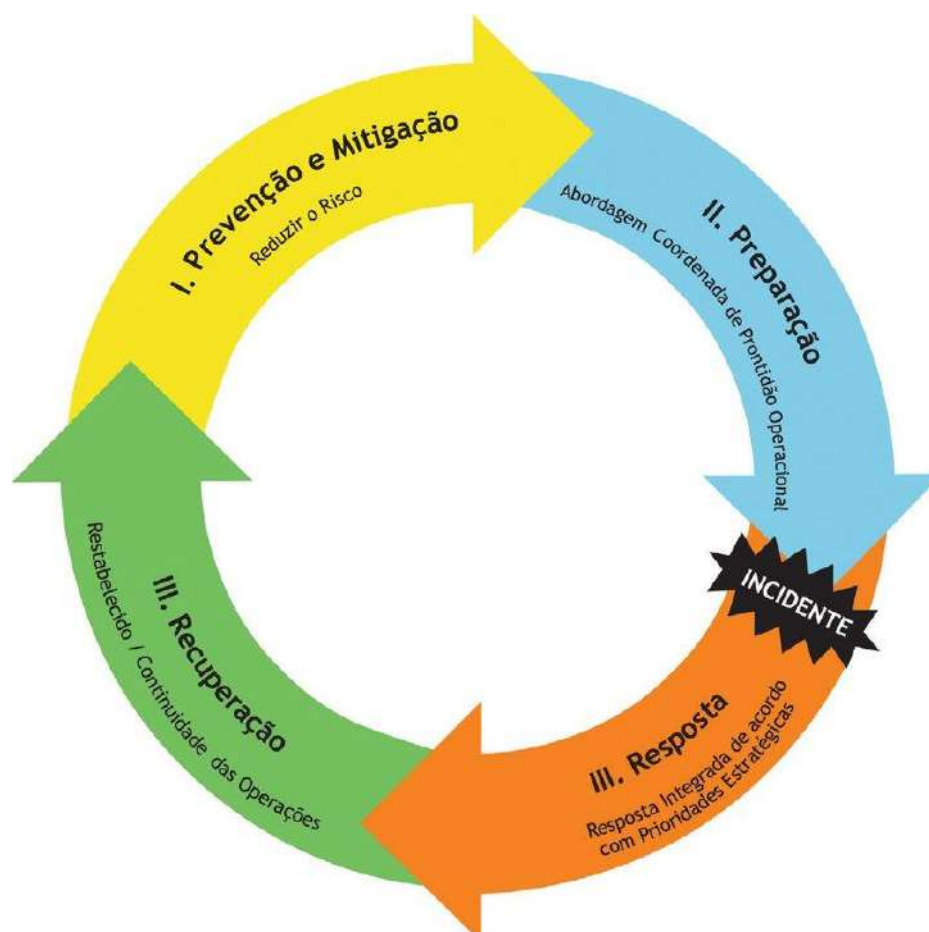


Figura 2.8: Procedimento cíclico referente à gestão de risco e gerenciamento de desastres.

Fonte: CEPED/RS-UFRGS (2016, p. 143).

A prevenção engloba principalmente um conjunto de ações que têm como meta evitar que desastres naturais ou causados pelo homem agravem ainda mais a situação de calamidade. De maneira mais específica, a prevenção abarca atividades que buscam verificar quais localidades apresentam maior sujeição à ocorrência de eventos perigosos, a fim de evitar utilizadas de modo errado. Trata-se, portanto, de uma ação de delimitação de áreas mais críticas, por mapeamento, consequentemente subsidiando o planejamento para sua não ocupação, evitando a exposição, ou o seu não adensamento, evitando agravar o risco já existente, utilizando principalmente medidas não estruturais. Essa fase é considerada a mais significativa na gestão de riscos e no acompanhamento de eventos

naturais gravosos, uma vez que é o momento em que prejuízos futuros podem ser evitados com menos esforços e gastos (MIGUEZ; VERÓL, 2016).

Embora nem todos os impactos adversos das ameaças possam ser completamente prevenidos, é possível limitá-los significativamente em níveis de gravidade.

A etapa de mitigação, por sua vez, a partir da identificação de locais já ocupados e em risco, busca introduzir medidas de redução da vulnerabilidade ou do perigo (nesse caso, atuando na própria mitigação das inundações), de forma a complementar as ações prévias de prevenção, com o intuito de reduzir prejuízos, porém em uma situação em que já há população exposta e consequente risco.

A etapa de preparação na gestão de riscos de desastres, por sua vez, também realizada previamente ao desastre, é fundamental para reduzir perdas de vidas e danos durante eventos adversos. Ela vem complementar as etapas de prevenção e mitigação, agora reconhecendo que nem todo o risco pode ser evitado e que são necessárias medidas complementares para a redução de perdas, quando o risco se materializa através de ocorrência de um desastre. Nem todo o risco pode ser evitado. Essa fase ocorre, portanto, quando uma ameaça iminente é disparada e envolve uma série de medidas e ações para organizar respostas e recuperação. Nessa fase, é importante fazer com que haja conscientização coletiva dos papéis a serem desempenhados, de forma que todos os órgãos públicos, a população e outras partes interessadas estejam cientes de suas responsabilidades, para atuar efetivamente após soarem alarmes testados previamente. Determinadas atividades específicas que acontecem durante a fase de preparação incluem: desenvolvimento de planos de contingência, treinamento de recursos humanos, aquisição de recursos e equipamentos, monitoramento e definição de critérios de alerta, movimentação de grupos e apoio logístico. Tudo isso é feito para garantir que a resposta seja rápida e eficaz, reduzindo os danos causados pelos desastres (MIGUEZ; VERÓL, 2016).

A etapa de resposta em gestão de riscos de desastres é o período em que são realizadas ações imediatas com objetivo de salvar vidas, visando proporcionar atenuantes ao sofrimento e minimizar as perdas, tanto em termos de propriedade, de vidas e ambientais. Essa fase pode durar de algumas horas até meses, conforme se verifica a gravidade e o tipo de catástrofe. Durante a resposta, as equipes atuam diretamente nos

seus efeitos, seguindo protocolos previamente estabelecidos, para coordenar o trabalho entre os órgãos envolvidos. Essas atividades incluem socorro às pessoas em risco iminente, bem como a assistência às pessoas afetadas, limpeza e reorganização de serviços primordiais, avaliação de danos e elaboração de laudos técnicos. As ações realizadas nesta fase visam minimizar os danos causados pelo desastre e ajudar na recuperação das áreas mais afetadas (YAMAGATA; MARUYAMA, 2018).

A fase de recuperação e reconstrução após a ocorrência de um evento climático catastrófico é composta por duas etapas distintas, a saber: a primeira etapa, a recuperação, tem como objetivo imediato recuperar as funções básicas da comunidade atingida, como por exemplo, a mobilidade, o abastecimento de energia e água, o retorno às habitações, o funcionamento de instituições de saúde e ensino, serviços públicos em geral e a organização local. Nesta fase, medidas provisórias são utilizadas para garantir que as pessoas tenham um lugar para viver, estudar e trabalhar, enquanto a área é restaurada. A segunda etapa, a reconstrução, tem como objetivo a restauração da área atingida ao nível de desenvolvimento que existia antes do desastre ou até mesmo superior. Isso envolve uma série de atividades, como reparos e construção de infraestrutura, investimentos econômicos e recuperação do bem-estar e dignidade da população atingida. A fase de recuperação pode durar meses, enquanto que a fase de reconstrução pode prolongar-se por anos. Completando a fase de reconstrução, o ciclo de gerenciamento de riscos de desastres é fechado, iniciando-se novamente na fase de prevenção a novos desastres (MIGUEZ; VERÓL, 2016).

O gerenciamento de risco em episódios de inundações e catástrofes climáticas é um processo que visa coletar informações, identificar, avaliar e analisar riscos, verificar as opções e tomar decisões para o controle, a redução, reconhecer ou reorganizar os riscos de inundações. Por esta razão torna-se uma ação em ato contínuo e incluem adaptações e ajustes para minimizar a probabilidade e a potencial danoso dessas inundações, bem como para elevar o nível de proficiência daqueles que estão sob ameaça mais grave. Existem três tarefas básicas envolvidas na estrutura de gerenciamento de riscos de inundação: verificação de riscos, aferição dos riscos e diminuição dos riscos. A primeira tarefa fornece informações sobre riscos passados, presentes e futuros de inundações enquanto a aferição dos riscos trabalha com a percepção mais precisa desses riscos por meio de

números. No que diz respeito à redução dos riscos, essa parte é atribuída a interferências diretas no processo, cujo potencial visa a diminuição dos riscos. No entanto, é importante entender que estes riscos nunca podem ser eliminados completamente, uma vez que sempre podem ocorrer eventos maiores (ainda não observados), desvios de planejamento, que superam os horizontes previstos, falhas estruturais ou de manutenção etc. (SAYERS *et al.*, 2013).

As mudanças associadas ao clima, a mudança sobre a conjuntura social e econômica e o retrocesso sobre defesas estruturais são fatores que influenciam tomadas de decisão com alto grau de complexidade. Em todas as tomadas decisórias em projetos de grande proporção – como é o caso da infraestrutura para proteção em episódios de inundação –, ocorrem influências sobre as respostas sociais quanto às transformações em médio ou longo prazo. Nesse sentido, quando ocorrem tomadas de decisão equivocadas, a sociedade pode sofrer consequências negativas de forma irreversível, além de custos diversos, não apenas sob a ótica do custo financeiro, pois os prejuízos podem, inclusive, colocar em risco a vida de pessoas. Por tais motivos, Sayers et al. (2013) destacam que o gerenciamento de risco contra inundações trata-se de um “[...] *processo contínuo de ação, monitoramento, revisão e adaptação*”, conforme ilustrado por meio da Figura 2.9.

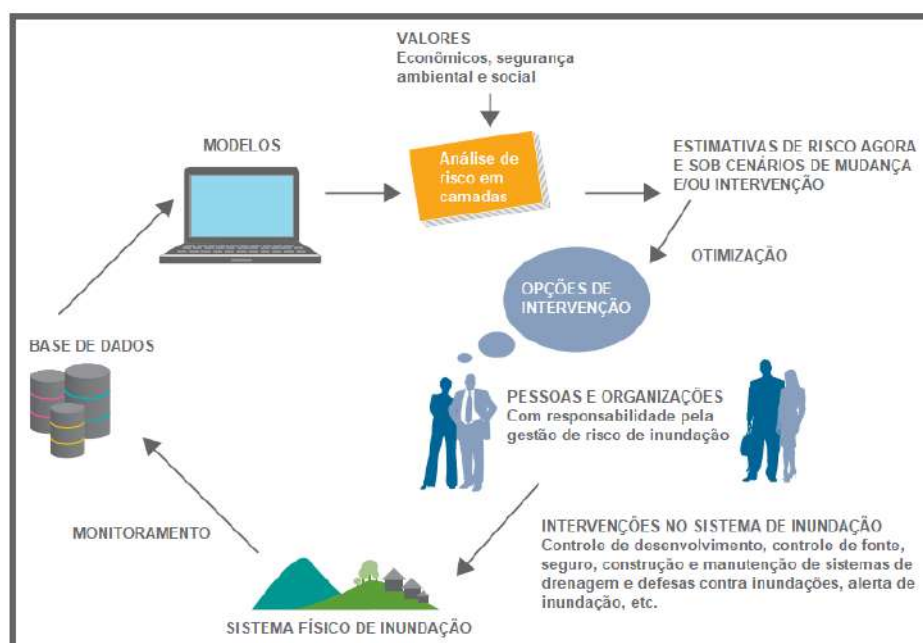


Figura 2.9: Relação de elementos de risco em casos de inundação.

Fonte: Sayers et al. (2013, p. 61).

Segundo Yamagata e Maruyama (2018), a redução de risco de inundações urbanas envolve o uso de medidas estruturais e não estruturais para reduzir os danos causados pelas inundações. As medidas estruturais estão relacionadas a obras de engenharia, tais como a construção de diques, barragens e sistemas de drenagem, para controlar o fluxo de água e prevenir os alagamentos, modificando, portanto, as relações de escoamento. Por outro lado, as medidas não estruturais podem ser categorizadas em quatro objetivos básicos:

- O primeiro objetivo é o planejamento do uso do solo, que contribui tanto na prevenção, quanto na mitigação e na adaptação a inundações urbanas. Isso inclui o controle do uso do solo em áreas de risco, a construção de áreas verdes e espaços permeáveis para aumentar a capacidade de absorção da água, e a incorporação de técnicas de construção sustentável que reduzem o impacto das inundações;
- O segundo objetivo é a maior atingir uma maior conscientização da população para enfrentar as inundações, com campanhas de treinamento para a adoção de medidas preventivas e ações corretivas durante e após os eventos de inundação;
- O terceiro objetivo é o planejamento e gerenciamento de emergências, incluindo a implementação de sistemas de alerta e evacuação em áreas de risco, garantindo que a população seja informada com antecedência e tenha tempo e treinamento suficiente para se preparar e evacuar em segurança;
- O quarto objetivo é a aceleração da recuperação e uso do pós-inundação, para aumentar a resiliência urbana a inundações. Isso inclui o uso de técnicas de reconstrução adaptativa, que tornam as estruturas mais resistentes a inundações futuras, a reabilitação de áreas afetadas para um patamar de maior resistência e capaz de melhorar a qualidade de vida das comunidades afetadas e o estabelecimento de planos de contingência aprimorados para lidar com futuros eventos de inundação.

Yamagata e Maruyama (2018) ressaltam que a gestão de risco em casos de inundação seja aplicada de forma integrada, a fim de que seus elementos constituintes sejam realizados de forma sistêmica e coesa. Ou seja, reconhece-se que a gestão de riscos

funciona como uma espiral em ciclos ascendentes de aprimoramento do processo. Apesar de ser um assunto amplamente debatido, ainda há muitos desafios no gerenciamento eficiente dos riscos de inundação. Um dos principais obstáculos é a presença de múltiplas causas e incertezas relacionadas às alterações ambientais e urbanas, o que torna a avaliação dos riscos de inundação bastante complexa. Outrossim é que as alterações perpetradas na má utilização do solo são preocupantes, pois dificultam não apenas os procedimentos avaliativos sobre os riscos, como também limitam o desempenho dos projetos de controle de inundações vigentes. Outra questão é a tendência de ignorar o potencial de ocorrência de novos riscos no processo de planejamento, o que pode levar a um aumento da vulnerabilidade das áreas afetadas. Todos esses desafios destacam a importância de investir em tecnologias e pesquisas científicas que possam auxiliar no gerenciamento eficiente dos riscos de inundação, oferecendo metodologias capazes de gerar a mensuração de aspectos de risco, vulnerabilidade, susceptibilidade à ocorrência de um evento e/ou ao dano e resiliência.

Os nove princípios para o bom gerenciamento de riscos de cheias, descritos por Sayers *et al.* (2013), são fundamentais para uma gestão eficaz. O primeiro princípio descreve que aceita que a proteção absoluta não é possível, portanto, é importante planejar preventivamente para todas as ocorrências de falhas futuras. O segundo princípio enfatiza a importância de promover algumas inundações como desejáveis, pois permitem que os ambientes naturais vitais permaneçam funcionais e reduzam as chances de inundação em outros lugares que seriam indesejáveis – note-se aqui que há ainda um efeito colateral positivo, pois, áreas que frequentemente inundam são naturalmente não ocupadas. O terceiro princípio destaca a necessidade de basear as decisões em uma compreensão entre aspectos do risco e a sua incerteza, levando em consideração um compromisso entre os riscos reduzidos, as oportunidades promovidas e os recursos necessários para alcançá-los. A incerteza nos dados e modelos fornecidos e utilizados deve ser claramente reconhecida. O quarto princípio reconhece que o futuro poderá ser diferente do passado, enfatizando a importância em criar estratégias moldáveis para enfrentar alterações do clima, sociais ou na utilização do solo, que possam influenciar no risco de inundações – incerteza requer adaptação. O quinto princípio ressalta a importância de implementar um conjunto possível de ações, não confiando em uma única alternativa, incluindo medidas para reduzir a probabilidade de ocorrência do evento e medidas para reduzir as consequências

das inundações. Redundância de ações resulta em maior resiliência. O sexto princípio destaca a necessidade de utilizar recursos limitados de forma eficiente e justa para a redução dos riscos. Já o sétimo princípio enfatiza a importância de se ter clareza sobre as responsabilidades para governança e ação direta. O princípio número oito ressalta a necessidade de transmitir, em caráter de abrangência máxima, o risco e suas incertezas de forma clara, permitindo uma melhor preparação e assegurando o apoio às medidas de prevenção quando necessário – comunicação eficiente é fundamental. Para finalizar, o nono princípio trata da importância de refletir o contexto local e integrar o planejamento de inundações com outros processos de planejamento. A aderência a esses princípios é fundamental para garantir a eficácia e eficiência do gerenciamento de riscos em episódios de inundação.

2.3 A Importância da coesão entre a Drenagem Urbana, o Planejamento Urbano e o Gerenciamento de Risco de Inundação

O uso de princípios sustentáveis e alternativas ecológicas para o projeto de sistemas de drenagem urbana podem ser viabilizados ao integrar tais condicionantes desde as etapas iniciais referente ao planejamento urbano, principalmente, nos processos associados à ocupação e uso do solo (MIGUEZ; DI GREGORIO; VERÓL, 2018).

Tingsanchali (2012) destaca o papel do planejamento urbano, bem como da utilização adequada do solo, com o propósito de diminuir riscos relacionados a episódios de inundação, elevando a capacidade de adaptação dos municípios e evitando prejuízos. As ações de planejamento urbano podem resultar, ao longo do tempo, em medidas mais eficientes e financeiramente mais vantajosas do que os métodos convencionais de controle e reversão de inundações.

O planejamento urbano deve incluir alguns princípios básicos: A bacia fluvial deve ser vista como um parâmetro para o planejamento urbano, ainda que suas limitações do território sejam distintas daqueles considerados pelos limites administrativos do município; os padrões hidrológicos devem ser conhecidos, para que seja possível identificar as restrições naturais; os caminhos de drenagem naturais, bem como as regiões

inundadas devem ser protegidos a habitação nestes locais não deve ser recomendada - estes locais são uma opção como fornecedores de serviços ecossistêmicos, capazes de armazenar temporariamente as águas de inundação e abrigar reservas verdes; a expansão urbana deve ser conduzida pelos padrões hidrológicos nas bacias, a título exemplificativo, zonas que por natureza são mais impermeabilizados podem receber o desenvolvimento urbano com menor impacto no ciclo hidrológico; os recursos naturais devem ser conservados, ao menos na parte superior de montanhas e nas margens dos rios.

Tanto o plano diretor, quanto o zoneamento urbano, tratam de mecanismos fundamentais para a coesão envolvendo a drenagem urbana, o desenvolvimento urbano e o gerenciamento de riscos de inundação. O plano diretor urbano deve estar associado a identificação prévia dos perigos de inundações e precisa concentrar-se na regulação da utilização do solo para não entrar em conflito com zonas de alagamento e com o propósito de preservar as circunstâncias de habitação com menos influências possíveis no ciclo da água (MIGUEZ; VERÓL; BATTEMARCO, 2019).

O zoneamento urbano, em contrapartida, pode estabelecer limitações de habitação com base na periodicidade de enchentes e alagamentos em cada região. O leito menor e as várzeas fluviais, locais frequentemente afetados por inundações, deveriam ser preservadas de maneira natural, evitando qualquer forma de habitação. Já em áreas sujeitas a alagamentos ocasionais, pode-se permitir ações recreativas, instalação de áreas verdes, além de outras utilizações que não gerem danos significativos ou ameaças em caso de alagamentos, e, dessa forma, preserva-se o espaço para a utilização pública e a defesa contra ocupações irregulares. Os locais menos propensos a inundações poderiam ter regras construtivas estabelecidas para lidar com essas inundações esporádicas, por meio da determinação de parcelas de proteção ou pela implementação de ações de preservação específicas para as construções. Por último, as regiões mais protegidas poderiam ser autorizadas para edificações de maneira mais flexível e ampla (SILVA, 2017).

Serrao-Neumann *et al.* (2017) enfatizam a relevância de uma maior conexão entre os recursos hídricos e os processos de planejamento associados à utilização do solo, e salientam a urgência de processos de planejamento atualizados tratem das relações do meio ambiente entre os municípios e suas áreas circundantes, levando em conta

transformações prognósticas e indefinições relacionadas às questões da água. Segundo os pesquisadores, tratar das relações entre meio ambiente e a água implica em considerar que o papel da água no município deve ser entendido e levado em consideração nos processos decisórios relacionados aos espaços urbanos, visando minimizar os efeitos urbanísticos nas reservas de água e expandir a questão da sustentabilidade urbana.

Ter uma visão abrangente do panorama de interrelação entre a cidade e a bacia que a abriga implica em reconhecer que as bases subjacentes (atributos naturais e humanos do meio ambiente e modelos da utilização do solo), as atribuições (serviços obtidos dos ecossistemas) e os valores (referentes ao patrimônio, a ecologia, a sociedade e a culturas) são os elementos que garantem a excelência e a capacidade de recuperação dos espaços. Ademais, os panoramas da natureza têm características inerentes, englobando aspectos relacionados a ecologia a sociedade, a cultura, a estética, a recreação e a economia, os quais devem ser levados em consideração no planejamento associado à utilização do solo (SERRAO-NEUMANN et al., 2017).

Toda paisagem tem em sua composição não somente aquilo que pode ser visto por meio da visão, mas ainda pelo que está camuflado no pensamento humano. Dessa forma, ainda que vários indivíduos estejam olhando para um mesmo ponto, cada um deles terá uma percepção distinta de uma determinada paisagem e, isso ocorre pelo fato de que, ainda que estejam olhando para os mesmos componentes relacionados ao formato, ao tamanho e a estética, essas partes podem ter interpretações diferentes que ocorrem por meio de conexões dentro do pensamento de cada pessoa (SERPA, 2010).

Tardin (2016) salienta a pertinência do entendimento humano acerca do ambiente físico relacionado à paisagem. Para a pesquisadora, as ações da sociedade em relação à paisagem e suas pretensões de intervenção, por meio de um desenvolvimento constante, seriam estabelecidas pela interpretação do local, com um significado particular atribuído por cada sociedade. Por sua vez, os locais não ocupados são vistos como um momento oportuno para a mudança na maneira de ser construída a paisagem. De acordo com a autora, um local não construído, ou um espaço livre, trata-se de toda zona sem edificações e com uma grande potencialidade de reorganizar e qualificar a área urbana, uma vez que pode assumir atribuições significativas, como a de produzir serviços ecossistemas, oferecer alternativas de lazer, contemplação, etc.

Os espaços livres, enquanto parte da estrutura urbana, exibem relações de interconexão e complementação, ainda que não tenham sido projetados ou estabelecidos de maneira sistêmica. O sistema de espaços livres, em contínuo modo de adaptação e ajuste às novas exigências e demandas sociais, é essencial para a sobrevivência do município. Isso é atribuído a três aspectos: é crucial para o funcionamento da vida cotidiana, é determinante na formação da paisagem urbana, componente da configuração urbana, da visualização da localidade, da sua perspectiva histórica e de recordações, e contribui para a formação do âmbito tanto público quanto privado (QUEIROGA, 2011). Ademais, é relevante ressaltar que os espaços livres favorecem a ocupação de locais públicos pelos habitantes, agindo como componentes fomentadores de interações e de coexistência.

Macedo *et al.* (2012) enfatizam os espaços livres como uma das estruturas urbanas fundamentais, visto que, neles e por meio deles, ocorre grande parcela da existência diária, sendo os cenários substanciais de conflitos e decisões sociais. Em relação aos aspectos biológicos e físicos das estruturas de espaços livres, Tardin (2016) ressalta tanto a perspectiva de conservar os fenômenos da natureza quanto a chance de colaborar com a interação entre a questão ecológica e o ambiente urbano no planejamento do território, considerando a importância do aspecto ecológico no processo decisório das intervenções urbanas.

Nessa perspectiva, e associando o uso dos espaços livres à problemática das enchentes urbanas, tais características devem ser incorporadas para preservar o ecossistema da água o máximo possível e avaliar estas reservas de espaço como possíveis locais para receber volumes de armazenamento temporário de inundações, para que o município seja operante tanto no decorrer quanto no término dos eventos de chuva, prevenindo prejuízos e fazendo uso das águas das enchentes como um componente do funcionamento urbano. A proposta central é reservar um lugar para a água no planejamento urbano, admitindo sua dinamicidade nas criações dos espaços edificados e, assim, conviver com a água em um sistema socioambiental complexo, mas funcional (MIGUEZ; VERÓL; BATTEMARCO, 2019).

Além disso, é possível destacar que a união do uso de uma infraestrutura verde-azul, inserida na paisagem urbana através do seu sistema de espaços livres, com as

funções relacionadas à conservação da água e reorganização de escoamentos, possibilita um arranjo que permite colaborar e abordar a problemática das inundações urbanas de maneira equilibrada e pautada na sustentabilidade. Nessa perspectiva, a concepção de paisagem com múltiplas funcionalidades ganha relevância e integra o planejamento paisagístico, as ações recreativas, a preservação do meio ambiente e o gerenciamento de inundações. As paisagens com múltiplas funcionalidades asseguram a utilização sensata do solo urbano, levando em conta que a falta de espaços livres é bastante recorrente em áreas urbanas que sofrem com excedentes de escoamento. Dessa maneira, isso promove a apreciação do valor imobiliário das áreas adjacentes, eleva o bem-estar dos cidadãos, possibilitando um local mais salubre e alcança, assim, os alicerces essenciais de um ambiente sustentável (LOURENÇO, 2013).

No cenário das inundações urbanas, espaços livres permanentes, como áreas verdes preservadas e espaços públicos, podem ter essa concepção colocada em prática adotando, além de suas atribuições primárias, o papel na promoção o gerenciamento do volume de água produzido no ambiente urbano de forma majorada. No que se refere a regulação destes volumes, pode-se mencionar a opção de converter estas áreas em reservatórios temporários de detenção, por meio do rebaixamento de superfícies, ou ainda a formação de lagos perenes com capacidade para reter água adicional, por meio da flutuação de sua superfície livre, estabelecendo-se como reservatórios de retenção (TEBALDI; MIGUEZ; BATTEMARCO, 2015).

Há mais estratégias possíveis associadas à drenagem urbana, com base em princípios de sustentabilidade, a serem destacadas como meios para atingir propósitos multifuncionais. Soluções como pavimentos com alta permeabilidade, jardins pluviais, valas de infiltração, dentre outras medidas, surgem como possibilidades de distribuição descentralizada de medidas “verdes” na escala local, como em calçamentos. Trabalhando de forma integrada com a escala da bacia, essas medidas podem trazer múltiplos benefícios, como a melhora na mobilidade urbana para pedestres (pela captação eficiente onde o escoamento é gerado), a redução do escoamento superficial, e consequentes alagamentos locais, e a retenção de água da chuva para outros fins. Contudo, é necessário destacar que mesmo diante de tantas opções, a integração entre o planejamento urbano e o gerenciamento de risco de inundação ainda é incipiente e requer fortalecimento. A

primeira medida para a implementação dessa estratégia é a participação de mais partes interessadas envolvidas com a prevenção de enchentes, o que pode aprimorar tanto a qualidade quanto a aplicabilidade dos projetos em questão (RAN; NEDOVIC-BUDIC, 2016).

2.4 Estudos Antecedentes

2.4.1 Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações – ISMFI

O Índice de Susceptibilidade do Meio Físico à Inundações (ISMFI) foi desenvolvido por Miranda (2016), com o uso de uma metodologia multicritério, e tem por finalidade representar, de maneira qualitativa e rápida, as áreas naturalmente mais propensas à inundação. Caracteriza-se como ferramenta de planejamento urbano, uma vez que identifica e hierarquiza o território, ao destacar as áreas dentro de uma unidade física ou administrativa mais sujeitas ao acúmulo de águas.

Miranda (2016) ainda aponta que a avaliação das áreas susceptíveis a inundações, juntamente com o contexto dos padrões de urbanização da bacia hidrográfica na qual estão inseridas, permite uma inferência preliminar sobre as bacias prioritárias a serem alvos de estudos detalhados, bem como tipos de medidas (estruturais ou não estruturais) potenciais a serem adotadas, além da indicação de áreas propícias ou restritivas a políticas de ocupação ou adensamento. As etapas de construção do índice estão sintetizadas no fluxograma da Figura 2.10.

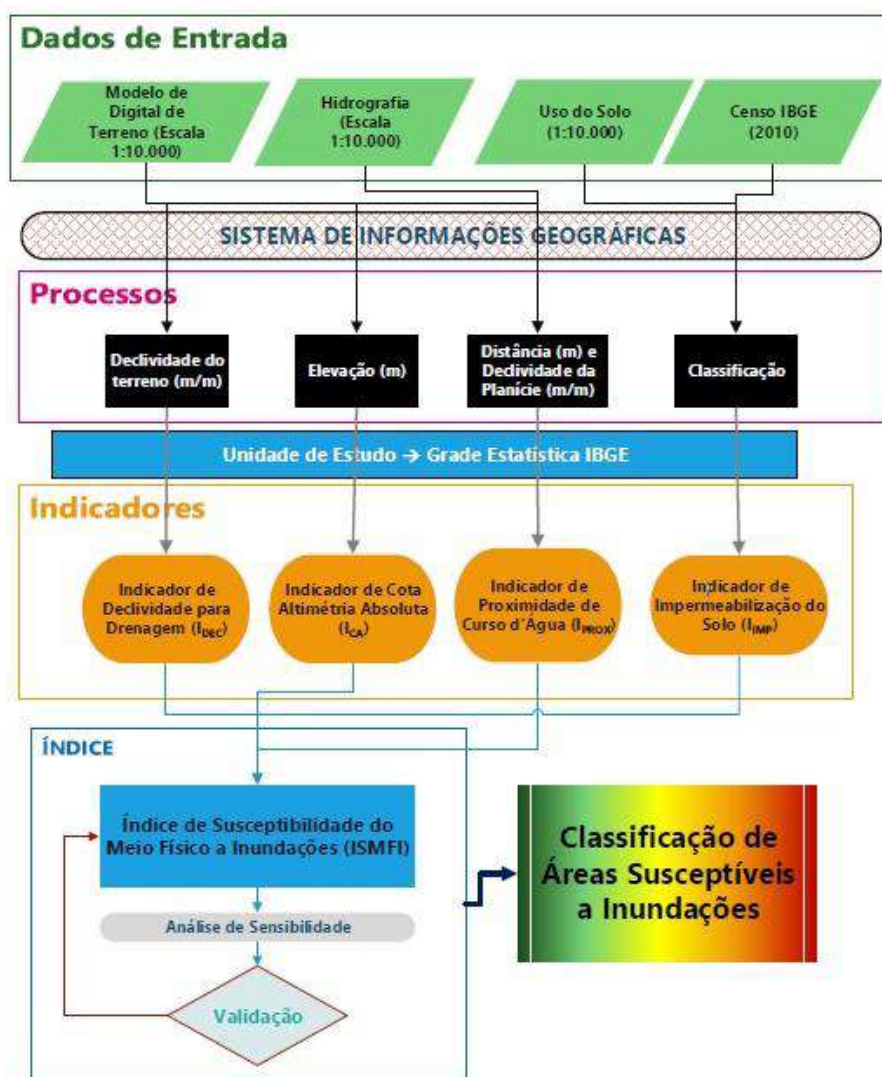


Figura 2.10: Fluxograma da metodologia para construção do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações.

Fonte: Miranda (2016).

O ISMFI é formulado a partir de um produtório, sendo um dos termos do produtório composto por um somatório. A opção por somatórios simples, produtório simples ou uma combinação de ambos é uma decisão de modelagem. A Equação $ISMFI = I_{DEC}^{E1} \cdot (c1 \cdot I_{IMP} + c2 \cdot I_{PROX} + c3 \cdot I_{COTA})^{E2}$ (2.2) apresenta a formulação proposta para o índice.

$$ISMFI = I_{DEC}^{E1} \cdot (c1 \cdot I_{IMP} + c2 \cdot I_{PROX} + c3 \cdot I_{COTA})^{E2} \quad (2.2)$$

Onde: $c1$, $c2$ e $c3$ representam os pesos atribuídos aos indicadores do somatório, que compõe um dos termos do produtório, e, $E1$ e $E2$ são os pesos atribuídos aos dois termos do produtório. Os pesos do somatório somam 1; o mesmo acontece para os pesos do produtório. Ou seja, $E1 + E2 = 1$ e $c1 + c2 + c3 = 1$.

A seguir, a função de cada indicador é explicada individualmente.

- I_{DEC} – Indicador de declividade para drenagem

Miranda (2016) aponta que este indicador é considerado como fator determinante para o acúmulo de água sobre a superfície e, ainda, que é fundamental que se considere a declividade para drenagem do terreno como indicador limitante na composição do índice – por isso este indicador é separado no produtório. Regiões relativamente planas ou com baixas declividades, apresentam a drenagem natural dificultada. Nesse indicador, o território é classificado em função de sua declividade para o escoamento superficial.

- I_{IMP} – Indicador de impermeabilização do solo

O indicador tem por finalidade hierarquizar e representar áreas com diferentes tipos de uso do solo quanto ao grau de impermeabilização, sinalizando, portanto, regiões com baixa capacidade de interceptação, retenção e infiltração dos volumes precipitados e, conseqüentemente, com maior potencial de geração e acúmulo de escoamentos superficiais.

- I_{PROX} – Indicador de proximidade de curso d'água

Diferente do Indicador de declividade para drenagem (I_{DEC}), que analisa a declividade média do terreno, o I_{PROX} considera, de forma combinada, a distância de cursos d'água e a declividade média transversal das áreas próximas, em direção ao curso d'água, buscando representar as características do talvegue e áreas ribeirinhas próximas, avaliando o acesso do excedente pluvial para as planícies adjacentes.

- I_{CA} – Indicador de cota altimétrica absoluta

Terrenos em cotas próximas ao nível do mar, em geral, apresentam baixa eficiência na condução e capacidade de descarga, podendo ainda ter essas características agravadas pelas oscilações de maré, restringindo a saída da drenagem e causando efeito de remanso em canais de drenagem. Dessa forma, o território é classificado quanto a sua cota altimétrica em relação ao nível médio do mar.

Vale ressaltar que, na Equação 2.21, o indicador de declividade foi destacado dos demais e tomado como primeiro termo do produtório, por ser este um elemento fundamental para a formação de áreas alagadas. Se a declividade for alta, não existem condições propícias a alagamentos, uma vez que o terreno será eficiente na condução dos escoamentos. Altas declividades estão associadas a altas velocidades e pequenas lâminas d'água, em geral. Assim, onde o indicador de declividade for considerado como zero (ou seja, em áreas onde, após a normalização, for considerado que a área não é propensa à ocorrência de alagamentos) o índice inteiro resultará em um valor nulo.

A unidade geográfica adotada no estudo original de proposição do ISMFI, para fins de construção dos indicadores foi a Grade Estatística do IBGE (IBGE, 2016). A preferência por esta unidade teve como objetivo principal a escolha de uma unidade representativa estável, com disponibilidade de dados, e passível de acompanhamento ao longo dos anos. Além disso, o recorte das quadrículas torna o processo de integração em bacias hidrográficas razoavelmente fácil.

É importante salientar que a avaliação qualitativa do meio físico a inundações é uma etapa preliminar de análise de risco de inundação, oferecendo uma versão simplificada da avaliação do perigo, que pode ser cruzada com a ocupação da bacia. Porém, o ISMFI reflete a “vulnerabilidade” do meio e não permite a avaliação do impacto de obras de proteção contra inundações realizadas na bacia.

2.4.2 Índice de Resiliência a Inundações em Bacias Urbanas – IRES

O Índice de Resiliência a Inundações (IRES) em bacias urbanas é um índice quantitativo multicritério, com resultado normalizado entre 0 e 1. O IRES foi inicialmente desenvolvido por Tebaldi *et al.* (2015) e contou com atualizações e

complementações por Rezende (2018), sendo a formulação utilizada neste trabalho a de Rezende (2018).

Sua concepção se baseia no conceito de que a resiliência atua na minimização do risco, combinando suas componentes básicas de perigo e vulnerabilidade, consideradas, portanto, no sentido contrário de sua materialização. Com isso, cada um dos três subíndices do IRES é construído a partir de indicadores de exposição, vulnerabilidade e perigo, distribuídos em três grupos de subíndices, que buscam representar as características constitutivas conceituais da resiliência de um sistema, a saber: a resistência do sistema, a capacidade de recuperação material após ocorrência do evento e a capacidade de manter seu funcionamento durante a inundação. Sua formulação está apresentada na Equação 2.3

As propriedades do índice (domínio, formulação e escala) influenciam fortemente na escolha dos indicadores (VERÓL, 2013). O objetivo do índice é fazer com que os indicadores, embora ser de diferentes tipos e apresentar diferentes unidades de medida, possam ser utilizados como norteadores de medidas a serem adotadas para mitigação de problemas e identificação do diagnóstico e da situação pós intervenção.

Na Equação $IRES = a \cdot (1 - Si_R) + b \cdot (1 - Si_C) + c \cdot (1 - Si_F)$, Si_R é o subíndice de risco à capacidade de resistência, Si_C o subíndice de risco à capacidade de recuperação material, Si_F o subíndice de risco à manutenção do funcionamento. Além disso, a , b e c são os pesos relativos a cada subíndice; estes pesos somam o valor 1.

$$IRES = a \cdot (1 - Si_R) + b \cdot (1 - Si_C) + c \cdot (1 - Si_F) \quad (2.3)$$

O organograma da Figura 2.11 ilustra, destacado em azul, os indicadores utilizados.

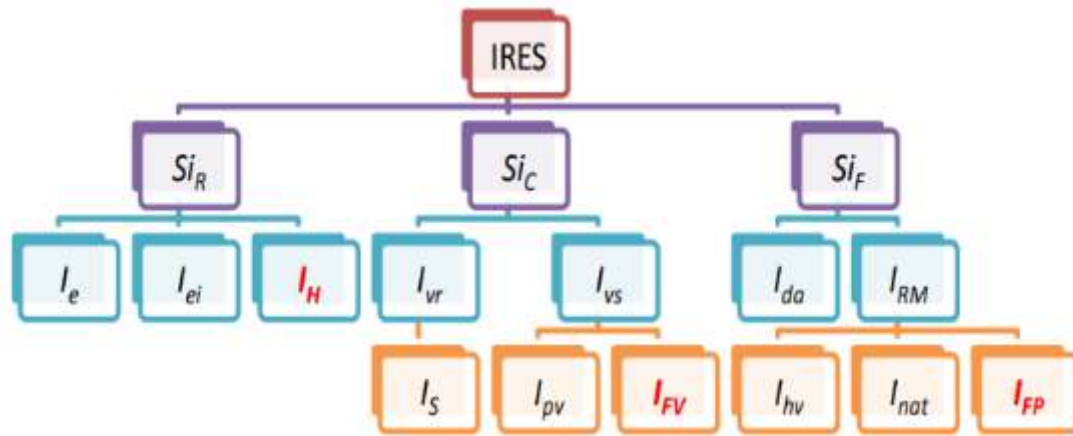


Figura 2.11: Composição geral do IRES

Fonte: REZENDE, 2018.

Os subíndices representam parcelas de risco relacionadas a três fatores de influência para garantia da resiliência às inundações do sistema urbano. Portanto, a composição do IRES busca unir aspectos sociais, econômicos e de resistência do sistema urbano, tal como a capacidade de manutenção de funções e resposta da infraestrutura de drenagem. A seguir, são apresentados os procedimentos de cálculo de cada subíndice que compõe o IRES.

Subíndice de Risco à Capacidade de Resistência (Si_R)

Representa a resistência ao dano, conforme o grau de exposição da população e dos bens existentes na bacia, relacionando a exposição de edificações e de infraestrutura urbana aos prejuízos potenciais de uma dada inundação. São utilizados três indicadores em sua formulação: exposição de edificações (I_e); exposição da infraestrutura urbana (I_{ei}); e profundidade de alagamento (I_H). É calculado de acordo com a Equação $Si_R = [a \cdot (I_e)^{n1} + b \cdot (I_{ei})^{n2}] \cdot I_H^{n3}$ (2.4).

$$Si_R = [a \cdot (I_e)^{n1} + b \cdot (I_{ei})^{n2}] \cdot I_H^{n3} \quad (2.4)$$

Onde a , b , $n1$, $n2$ e $n3$ são pesos associados a cada parcela. Note que as parcelas associadas a este subíndice referem-se à exposição, enquanto o perigo, representado pela profundidade de alagamento é um multiplicador. Maiores resultados implicam em menor

resistência. Por outro lado, não havendo exposição, isto é, se não houver alagamento, o subíndice será anulado e a resiliência torna-se máxima.

- I_e – Indicador de exposição de edificações

Expresso pela densidade da área construída (m^2/ha), o que pode indicar indiretamente o grau de exposição das pessoas na área em estudo. Quanto maior a densidade, mais verticalizada são as construções, o que indica que a presença de edifícios residenciais e/ou comerciais é maior. Para normalizar o indicador, pressupõe-se que o terceiro quartil em relação a toda a amostra seja o de maior impacto no valor da densidade, de forma a reduzir possíveis “achatamentos” na normalização da escala, que pode ser ocasionada por valores extremos. Os demais valores são normalizados de forma linear.

- I_{ei} – Indicador de exposição de infraestrutura urbana

O indicador é expresso pela densidade de vias, em (m/ha). Trata-se de indicador indireto do grau de influência da infraestrutura urbana em uma área específica. Em outras palavras, quanto maior a densidade de vias em uma área, maior a extensão de redes dos serviços de infraestrutura (como abastecimento de água, tratamento de esgoto, iluminação pública, rede elétrica, gás, internet etc.). A normalização também é realizada, de forma semelhante à do indicador anterior (I_e).

- I_H – Indicador de profundidade de alagamento

Representado pela profundidade de alagamento máxima, esse indicador computa a parcela relativa ao potencial de danos do evento de inundação avaliado, ou seja, representa a parcela referente ao perigo. Quanto maior a profundidade de alagamento, maior o dano potencial aos bens e pessoas expostos.

Subíndice de Risco à Capacidade de Recuperação Material (Si_c)

Representa a parcela de capacidade de recuperação de perdas provocadas por inundações, por meio de um indicador de valor relativo, o qual internaliza o perigo, representado pela profundidade de alagamento e relaciona-o com o dano potencial segundo a faixa de renda da população diretamente exposta à inundação. Além disso, ainda é introduzido um indicador de pessoas mais vulneráveis, representadas pela parcela

da população com idade superior a 60 anos e inferior a 15 anos, e relacionado a um indicador de perigo, representado pelo fator de velocidade, o qual indica o potencial de arraste de pessoas segundo o produto da velocidade de escoamento pela profundidade de alagamento. É calculado conforme a Equação $SiC = (I_{vr} \cdot a) + (I_{vs} \cdot b)$ (2.5).

$$SiC = (I_{vr} \cdot a) + (I_{vs} \cdot b) \quad (2.5)$$

Onde a e b são os pesos relativos à importância de cada parcela na composição do subíndice.

- I_{vr} – Indicador de valor relativo

O subíndice valor relativo relaciona indicadores relativos a características da inundação e, em geral, os seus prejuízos resultantes para a população de uma região. Sua metodologia foi baseada em SALGADO (1995). Na Equação $I_{vr} = \frac{(CRE+CRC) \cdot AC \cdot IS}{(12 \cdot RT \cdot CR)}$ (2.6), é apresentada sua formulação, sendo o indicador de susceptibilidade exibido na Equação $IS = \sum_{i=1}^n \frac{n_h \cdot I_A}{n}$ (2.11).

$$I_{vr} = \frac{(CRE+CRC) \cdot AC \cdot IS}{(12 \cdot RT \cdot CR)} \quad (2.6)$$

Onde AC representa a área total construída na região em análise, RT é a renda mensal total na região, CR a capacidade média de reposição da região, dada de acordo com a Tabela 2.2 e as Equações $CRE = [(0,5 \cdot CUB_E) \cdot PED]$ (2.7),

$$PED = 0,081 \cdot \ln(h) + 0,1338 \quad (2.8), \quad CRC = [(0,5 \cdot CUB_C) \cdot PCD] \quad (2.9)$$

e $PCD = 0,3878 \cdot \ln(h) + 0,3788$ (2.10) representam, respectivamente, o custo de danos à edificação, porcentagem da edificação danificada, em função da altura h de inundação, custo de danos ao conteúdo das edificações e porcentagem do conteúdo danificado, em função da altura h de inundação.

$$CRE = [(0,5 \cdot CUB_E) \cdot PED] \quad (2.7)$$

$$PED = 0,081 \cdot \ln(h) + 0,1338 \quad (2.8)$$

$$CRC = [(0,5 \cdot CUB_C) \cdot PCD] \quad (2.9)$$

$$PCD = 0,3878 \cdot \ln(h) + 0,3788 \quad (2.10)$$

Sendo: CUB_E é o custo unitário básico da edificação, segundo classe econômica; e CUB_C é o custo unitário básico do conteúdo, segundo classe econômica.

- I_S – Indicador de susceptibilidade das edificações

Este indicador é representado pela altura média das edificações na região em análise.

$$I_S = \sum_{i=1}^n \frac{n_h \cdot I_A}{n} \quad (2.11)$$

Onde I_A é o indicador de altura da edificação i , dado de acordo com a Tabela 2.3 e n é o número total de edificações.

Tabela 2.2: Capacidade média de reposição de CR, relacionada à faixa de rendimento.

Faixa de rendimento	CR
Até R\$3.000,00	0,0000
De R\$3.000,00 a R\$4.000,00	0,0420
De R\$4.000,00 a R\$6.000,00	0,0768
Maior que R\$6.000,00	0,1996

Fonte: REZENDE, 2018.

Tabela 2.3: Valores do indicador de altura I_A relacionados à altura da edificação H .

Altura da edificação H	Indicador de altura (I_A)
$H < 5,0 \text{ m}$	1,00
$5,0 \text{ m} < H < 7,5 \text{ m}$	0,50
$7,5 \text{ m} < H < 10,0 \text{ m}$	0,33
$10,0 \text{ m} < H < 12,5 \text{ m}$	0,25
$H > 12,5 \text{ m}$	0,10

Fonte: REZENDE, 2018.

- I_{vs} – Indicador de vulnerabilidade social

Este indicador refere-se à parcela da vulnerabilidade social da região, relacionada com a porcentagem de pessoas potencialmente mais vulneráveis a eventos de inundações, sob o ponto de vista físico, considerando a proporção direta da parcela da população de determinada região que possui menos de 15 anos e mais de 60 anos, em relação à população total. Integra-se, ainda, o indicador de perigo, representado aqui pelo Fator de Velocidade, por indicar diretamente o potencial de arraste de pessoas durante uma inundação. A formulação é dada pela Equação $I_{vs} = a \cdot [(I_{pv})^{n1} \cdot (I_{FVv})^{n2}] + b \cdot [(I_{pn})^{n3} \cdot (I_{FVn})^{n4}]$ (2.12).

$$I_{vs} = a \cdot [(I_{pv})^{n1} \cdot (I_{FVv})^{n2}] + b \cdot [(I_{pn})^{n3} \cdot (I_{FVn})^{n4}] \quad (2.12)$$

Onde a , b , $n1$, $n2$, $n3$, $n4$ representam pesos relativos aos subindicadores de pessoas expostas e de perigo, representado pelo fator de velocidade, os quais são calculados pela aplicação das Equações $I_{pv} = \frac{N_{pv}}{P}$ (2.13),

$$I_{pn} = 1 - I_{pv} \quad (2.14), \quad I_{FVv} = 0,9743 \cdot \ln(FV) + 2,3308$$

(2.15) e $I_{FVn} = 1,0554 \cdot \ln(FV) + 1,3596$ (2.16), que representam, respectivamente, o indicador de pessoas vulneráveis, indicador de pessoas não

vulneráveis, indicador de fator de velocidade para pessoas vulneráveis e indicador de fator de velocidade para pessoas não vulneráveis.

$$I_{pv} = \frac{N_{pv}}{P} \quad (2.13)$$

$$I_{pn} = 1 - I_{pv} \quad (2.14)$$

Onde N_{pv} representa o número de pessoas vulneráveis (idade menor de 15 e maior que 60 anos) e P a população total na região em análise.

$$I_{FVv} = 0,9743 \cdot \ln(FV) + 2,3308 \quad (2.15)$$

$$I_{FVn} = 1,0554 \cdot \ln(FV) + 1,3596 \quad (2.16)$$

A Equação $FV=V \cdot H$ (2.17), por sua vez, representa o fator de velocidade, dado pelo produto da velocidade de escoamento V pela profundidade de alagamento H .

$$FV = V \cdot H \quad (2.17)$$

Subíndice de Risco à Manutenção do Funcionamento (Si_F)

Representa a capacidade do sistema em dar continuidade da oferta de parte de seus serviços durante a ocorrência de um evento de inundação. Este subíndice considera o indicador de risco à mobilidade, representado pela relação entre indicadores de hierarquia viária e de não atendimento por transporte por trilho, com o tempo de permanência do alagamento, indicando o grau de impacto da inundação no trânsito de automóveis e de pessoas. Também avalia o impacto no acesso de socorro, por meio da análise de alagamento nos quartéis dos bombeiros e de seu entorno, indicando potenciais

dificuldades na organização de ações de emergência. A formulação é dada pela Equação (2.18).

$$Si_F = (a \cdot I_{RM}) + (b \cdot I_{da}) \quad (2.18)$$

Onde a e b são os pesos relativos a cada parcela.

- I_{RM} – Indicador de risco à mobilidade

Em Representado ela dimensão em que sistemas de transportes são afetados por um evento de inundação, avaliando o grau de impacto sobre o trânsito de automóveis e de pessoas. Para isso, utiliza-se um indicador de hierarquia viária e um indicador de não atendimento por transporte de trilho, relacionando-os com um indicador de perigo de fator de permanência. O indicador é dado pela Equação (2.19)

$$I_{RM} = [(I_{hv} \cdot a) + (I_{nat} \cdot b)]^{n1} \cdot [I_{FP}]^{n2} \quad (2.19)$$

Em que a , b , $n1$ e $n2$ representam os pesos relativos à importância de cada parcela na composição do subíndice.

O indicador de hierarquia viária (I_{hv}) é dado pela maior hierarquia de via encontrada dentro da área de análise, segundo os valores apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Normalização do indicador de hierarquia viária

Hierarquia Viária	I_{hv}
Estrutural	1,00
Arterial Primária	0,94
Arterial Secundária	0,77
Coletora	0,50

Local	0,11
--------------	------

Fonte: Adaptado de REZENDE, 2018.

O indicador de não atendimento por transporte sobre trilhos (I_{nat}) avalia a oferta de estações de metrô ou trem em raios de 1.000 m e 500 m, indicando os locais com maior cobertura desse serviço, que, indiretamente, apresentariam maiores possibilidades de continuidade de trânsito de pessoas durante eventos de inundação.

O indicador I_{nat} é dado pelo complemento do indicador de atendimento, elaborado seguindo um ranqueamento para a oferta de estações, conforme apresentado na Tabela 2.5. A formulação geral é dada pela Equação $I_{nat} = 1 - I_{att}$ (2.20).

$$I_{nat} = 1 - I_{att} \quad (2.20)$$

Tabela 2.5: Oferta de estações e indicador de atendimento de transporte sobre trilho.

Oferta de estações		I_{att}
Nulo	0	0,0
Ruim	2	0,4
Regular	3	0,6
Bom	4	0,8
Ótimo	6	1,0

Fonte: REZENDE (2018).

Rezende (2018) aponta que, dentro das categorias de oferta de estações, foram, ainda, hierarquizadas subcategorias, considerando os raios de influência de cada estação disponível para acesso. Dessa forma, uma área com duas estações a 500m de distância possuem um indicador de atendimento maior que uma área com uma estação a 500m e outra a 1.000m de distância, apesar de ambas possuírem duas ofertas de estações.

A partir da hierarquização, os indicadores apresentados na Tabela 2.5 foram normalizados segundo uma equação logarítmica.

Ainda na Equação 2.19, o indicador de perigo relativo ao fator de permanência (I_{FP}) avalia, indiretamente, a capacidade de funcionamento da rede de drenagem de águas pluviais, avaliando períodos de alagamento de uma determinada região, segundo três classes de profundidade: entre 10cm e 25cm (T1) (afetando pedestres); entre 25cm e 50cm (T2) (paralisando o tráfego); e acima de 50cm (T3) (invadindo pesadamente as edificações). Os períodos de cada classe são normalizados segundo um tempo máximo para o qual é considerado o impacto máximo do alagamento.

- I_{da} – Indicador de dificuldade de acesso de ajuda

Representa, indiretamente, a dificuldade de determinada região em receber ajuda de equipe especializada. No estudo de Rezende (2018), por facilidade de acesso aos dados, são consideradas as instalações do Corpo de Bombeiros do Rio de Janeiro, existentes no interior da bacia de estudo da pesquisa. Cada instalação recebeu uma área de influência, segundo uma distribuição geográfica por meio da aplicação do método dos Polígonos de Thiessen. As áreas de influência são penalizadas quanto ao acesso de ajuda de acordo com a profundidade de alagamento na área onde está instalado o Corpo de Bombeiros e em seu entorno. A normalização do indicador considera um impacto nulo para alagamentos até 15cm de profundidade e impacto máximo para alagamentos superiores a 50cm de profundidade, indicando o impedimento da saída de viaturas.

3 Metodologia

3.1 Proposta metodológica para a construção do aporte ferramental de auxílio ao planejamento urbano frente a inundações

Este item tem por objetivo apresentar, de forma organizada, as etapas dos procedimentos metodológicos para a construção do aporte ferramental de orientação ao planejamento urbano, frente ao problema de inundações e suas consequências. Portanto, é proposta uma descrição passo a passo para orientar aplicações desta metodologia em outras bacias.

1. Delimitação da bacia hidrográfica

Definido o sistema urbano a ser avaliado, devem ser traçadas as bacias hidrográficas contribuintes ao sistema.

2. Delimitação do domínio de interesse

Dentro da bacia hidrográfica, devem ser delimitadas as áreas que serão consideradas para a etapa de modelagem hidrodinâmica, ou seja, onde haverá respostas disponíveis para ajuste/validação da avaliação espacial em larga escala.

3. Diagnóstico urbano preliminar

Caracterização da região em que se pretende atuar; logo, devem ser considerados aspectos demográficos, físico-territoriais, legais, sociais e econômicos.

4. Levantamento de informações socioeconômicas e ambientais

Esta etapa é complementar à etapa 3. Diversos órgãos governamentais disponibilizam informações necessárias para o estudo, como distribuição de renda, densidade populacional e construída, uso e cobertura do solo, hierarquia viária, oferta de serviços públicos etc.

5. Avaliação do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI)

O cálculo do ISMFI, proposto por Miranda (2016), consiste na identificação de áreas naturalmente mais propensas à inundação, identificando e hierarquizando o território. Esse índice será revisto e atualizado no presente estudo

6. Avaliação do Índice de Vulnerabilidade (IV)

Nesta etapa, os dados socioeconômicos e ambientais, coletados na etapa 4, são agrupados em indicadores para compor um índice para o mapeamento da parcela de vulnerabilidade da região. Se houver previsão de simulação de cenários futuros, com implementação de medidas adaptativas no sistema urbano, para aumento da resiliência às inundações, os indicadores podem assumir valores futuros.

7. Avaliação do Índice de Risco Potencial de Inundações (IRPI)

Esta etapa consiste na junção das informações obtidas separadamente, de acordo com a avaliação dos índices calculados nas duas etapas imediatamente anteriores (etapa 5 e etapa 6). Composto pela parcela da vulnerabilidade e da susceptibilidade do meio físico, o índice irá representar o risco potencial de inundações para a situação na bacia hidrográfica em estudo.

8. Proposta de ordenamento da drenagem urbana

Após o diagnóstico das áreas inundáveis, a partir de áreas com potencial risco de inundações, podem ser feitas propostas estruturais e não-estruturais para o ordenamento da drenagem urbana, a fim de mitigar e evitar os malefícios das inundações, de acordo com as deficiências observadas na etapa de diagnóstico.

9. Proposta do zoneamento urbano

Definida as vulnerabilidades, a susceptibilidade e o risco potencial de inundações, considerando este modelo validado, pode-se usar os resultados obtidos para gerar diretrizes para uma proposta de zoneamento urbano, determinando as restrições de ocupação, segundo a expectativa de inundações e alagamentos em cada área. A proposta pode incluir construção de parques alagáveis e/ou de recreação e infraestrutura verde e azul em áreas onde ocorrem inundações eventuais, sem provocar riscos à população. Nas áreas menos sujeitas a inundações, restrições de ocupação, com definição de medidas de proteção individual das edificações e tipificação do material de construção das mesmas são uma opção. Já nas áreas mais seguras, é possível a liberação para construção de forma parcialmente irrestrita.

10. Simulação dos cenários de urbanização

Após a definição da proposta de zoneamento urbano, é considerada a ocorrência de um evento hidrológico intenso, definido por um tempo de recorrência (TR) de referência, em cenários futuros adversos, para fins de nova verificação da funcionalidade das ferramentas de planejamento propostas.

3.2 Revisão do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico, propondo a sua versão v2.0 (ISMFlv2.0)

A suscetibilidade do ambiente físico a inundações é determinada pelas condições naturais e antrópicas da bacia, que incluem a eficiência de conversão da precipitação em

escoamento superficial, o processo de escoamento subsequente às vazões geradas, a proximidade com cursos d'água e a formação de áreas propícias à acumulação de excedentes.

Tipo de solo e características de permeabilidade natural, porcentagem de cobertura vegetal, relevo, tipo de ocupação e uso do solo, grau de impermeabilização e rugosidade do solo são fatores que influenciam a suscetibilidade. Entre outros elementos físicos que impactam a reação da bacia a um determinado cenário de precipitação, tais variáveis determinarão o volume de água disponível para vazão, retenção superficial, velocidade de vazão e tempo de concentração da bacia.

As inundações são mais prováveis de ocorrer em locais com terreno mais plano, próximo a cursos de água, em áreas com maior grau de impermeabilização do solo (natural ou artificialmente produzido) e em baixadas próximas ao nível do mar. A avaliação de áreas propensas a inundações, juntamente com o contexto dos padrões de urbanização em bacias hidrográficas permitem fazer análises sobre o tipo de ocupação ou políticas de adensamento. Esse reconhecimento serviu de base para a elaboração de um índice que permitisse a avaliação espacial e orientasse as fases de planejamento de uso do solo.

Miranda (2016) elaborou o Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI) baseado em técnicas multicritério, com o objetivo de representar de forma qualitativa e rápida regiões propensas a inundações. O índice é classificado como ferramenta de planejamento urbano, pois identifica e classifica o território, identificando os locais dentro de uma unidade física ou administrativa mais vulneráveis a falhas no sistema de drenagem (natural e construído). Entretanto, o autor ressalta que o ISMFI, apesar de refletir a “fragilidade” do meio, não permite avaliar os efeitos quando obras de controle de inundações são introduzidas na bacia. Não se tem o mapeamento de respostas de ações sobre a susceptibilidade natural a inundações. Na prática, se um reservatório é implantado (de forma tradicional, ou como parte de uma infraestrutura verde) ou se um rio é canalizado, esses efeitos não são mapeáveis pelo ISMFI. Nesses casos, porém, resta ainda a informação útil de que áreas protegidas por obras, mas que tem uma marca original de fragilidade para inundações, são áreas sujeitas ao que se convencionou chamar

de risco residual, uma vez que falhas na proteção podem ainda ocorrer (embora com menor probabilidade).

Uma vez que abordagem do índice é projetada para apoiar a tomada de decisão ligando as preferências subjetivas entre as alternativas que estão sendo avaliadas sob a influência de vários critérios, o objetivo da análise multicritério não é resolver um problema escolhendo um único fato, mas apoiar a tomada de decisão – um processo de fazer recomendações específicas de ação para cada tomador de decisão (GOMES *et al.*, 2006).

Na Equação $ISMFI\ v2.0 = [I_{DEC}^{n1} \cdot (p1 \cdot I_{IMP} + p2 \cdot I_{PROX})^{n2}] \cdot I_{COTA}$ (3.1) é apresentada a segunda versão do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI v2.0), onde foram feitos alguns ajustes em sua formulação e adaptações em seus indicadores, a fim de buscar otimizar seu uso. As adaptações feitas são discutidas em sequência.

$$ISMFI\ v2.0 = [I_{DEC}^{n1} \cdot (p1 \cdot I_{IMP} + p2 \cdot I_{PROX})^{n2}] \cdot I_{COTA} \quad (3.1)$$

Onde:

$n1 \rightarrow$ Peso atribuído ao indicador de declividade;

$p1 \rightarrow$ Peso atribuído ao indicador de impermeabilização do solo;

$p2 \rightarrow$ Peso atribuído ao indicador de proximidade de curso d'água;

$n2 \rightarrow$ Peso atribuído ao segundo termo do produtório, composto pelos somatórios ponderados dos indicadores de impermeabilização do solo e proximidade de curso d'água.

Note-se que $n1 + n2 = 1$ e $p1 + p2 = 1$.

Vale observar que o indicador de cota altimétrica absoluta não recebeu um peso para a composição do índice e, diferente do que ocorre no índice original, proposto por Miranda (2016), o indicador vem, nesta revisão e nova formulação, como um modificador do índice, agravando a susceptibilidade em regiões de baixada costeira,

levando em consideração que geralmente os terrenos em cotas próximas ao nível do mar apresentam baixa eficiência na condução e capacidade de descarga, podendo ainda ter essas características agravadas pelas oscilações de maré, restringindo-se, assim, a saída de drenagem e causando efeito de remanso em canais de drenagem. A consideração original do I_{COTA} como um dos componentes do somatório que englobava também a proximidade de cursos d'água e a impermeabilização causava uma possibilidade de distorção dos resultados, ao se avaliar uma porção do território mais longe do mar. Como um multiplicado externo, nesta nova propostas, essa possível distorção se anula e as áreas costeiras ganham um “agravante”, o que faz sentido, quando de sua comparação com o restante do território.

O *ISMFI* é um índice quantitativo que deve variar de 0 a 1. Entretanto, devido a característica modificadora do indicador de cota altimétrica absoluta, este indicador, em específico, varia de 1 a 2, ou seja, ao atuar como multiplicador, este indicador atua desde manter o resultado original até dobrá-lo de valor. Logo, em relação a possíveis valores maiores que 1 que o *ISMFI* passa a poder assumir (matematicamente isso pode ocorrer), é preciso haver um controle de teto a partir de uma equação condicional, expressa pela Equação

$$\begin{aligned} \text{Se } ISMFI \text{ v2.0} > 1 \Rightarrow ISMFI \text{ v2.0} = 1 \\ \text{Se } ISMFI \text{ v2.0} \leq 1 \Rightarrow \text{Retorna o mesmo valor} \end{aligned} \quad (3.2).$$

$$\begin{cases} \text{Se } ISMFI \text{ v2.0} > 1 \Rightarrow ISMFI \text{ v2.0} = 1 \\ \text{Se } ISMFI \text{ v2.0} \leq 1 \Rightarrow \text{Retorna o mesmo valor} \end{cases} \quad (3.2)$$

Os indicadores e composição utilizadas na formulação do índice são descritos nos itens a seguir, mostrando também seu processo de normalização e definição da escala.

3.2.1 Indicador de Declividade para Drenagem (I_{DEC})

Como fator decisivo para o acúmulo de águas superficiais, a declividade do solo deve ser considerada como um indicador limitante para a composição do *ISMFI* v2.0. Áreas relativamente planas ou com declives baixos, apresentam a drenagem natural

dificultada (AVELAR *et al.*, 2011). Por outro lado, em terrenos íngremes, não ocorre acumulação.

Para a elaboração do Indicador de Declividade (I_{DEC}) construiu-se inicialmente um mapa de declividade do terreno, a partir de um Modelo Digital de Terreno (MDT) e aplicou-se a ferramenta “slope”, disponível em *softwares* de análises geoespaciais. Nesse método, a variação máxima de declividade entre os 9 pixels vizinhos é atribuída à célula central, conforme metodologia descrita em Burrough *et al.* (1998).

A metodologia de composição do indicador é a mesma utilizada na pesquisa de Miranda (2016), onde foram realizadas adaptações nas classes de declividade do relevo empregadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2006) tornando-as mais adequadas para uso em relação à drenagem urbana. Já os parâmetros mínimos de declividade para drenagem foram extraídos de normativa técnica expedida pelo órgão de referência no manejo de águas pluviais urbanas do município do Rio de Janeiro, a Fundação Instituto das Águas (RIO-ÁGUAS, 2010).

A EMBRAPA (2006) divide o relevo em 6 faixas de declividade, conforme apresentado na Tabela 3.1. Contudo, tais faixas objetivam a caracterização topográfica e, portanto, não representam com sensibilidade a eficiência na drenagem de águas pluviais no meio urbano.

Tabela 3.1: Classes de declividade segundo da EMBRAPA (2016)

Classes de declividade	Limites percentuais (%)
Plano	0 – 3
Suave Ondulado	3 – 8
Ondulado	8 – 20
Forte Ondulado	20 – 45
Montanhoso	45 – 75

Desta forma, algumas destas faixas foram suprimidas e outras novas incluídas. São apresentadas, na Tabela 3.2, as classes de declividade utilizadas na elaboração do indicador com a respectiva normalização.

Tabela 3.2: Classes de declividade para drenagem e seu valor normalizado

Categorias de declividade para drenagem	Faixas de declividade (%)	Indicador de Declividade para Drenagem (I_{DEC})
Deficiente	0 – 0.5	1.0
Aceitável	0.5 – 1.5	0.75
Boa	1.5 – 3.0	0.50
Muito Boa	3.0 – 8.0	0.25
Ótima	> 8.0	0

Fonte: MIRANDA (2016)

3.2.2 Indicador de Cota Altimétrica Absoluta (I_{COTA})

Terrenos em cotas próximas ao nível do mar, em geral, apresentam baixa eficiência na condução e capacidade de descarga, podendo ainda ter essas características agravadas pelas oscilações de maré, restringindo a saída de drenagem e causando efeito de remanso em canais de drenagem.

Para construção do I_{COTA} definem-se as regiões com cota altimétrica inferior a 2,0m como as mais críticas e, em seguida, com variações iguais de 1m, até chegar à cota 5m, reduz-se o efeito deste indicador, como multiplicador do ISMFI. Tais faixas foram arbitradas,

considerando a redução da influência de maré, a partir da cota absoluta de 5,0m, uma vez que variações de maré no Rio de Janeiro são facilmente cobertas por este patamar. A Tabela 3.3 apresenta a normalização discreta do indicador.

Tabela 3.3: Normalização do Indicador de Cota Altimétrica Absoluta

Intervalos de cota absoluta (m)	Indicador de cota altimétrica absoluta
Menor ou igual a 2 metros	2.00
Maior que 2 e menor ou igual a 3 metros	1.50
Maior que 3 e menor ou igual a 4 metros	1.25
Maior que 4 e menor ou igual a 5 metros	1.10
Maior que 5 metros	1.00

Estes valores propostos podem ser ajustados ou revistos, com a continuidade dos estudos e a modificação da influência de maré de um local para outro da costa. Miranda (2016) aponta que o dentre os quatro indicadores, o I_{COTA} talvez seja o de maior dificuldade de replicabilidade em função do atendimento de especificidades locais.

3.2.3 Indicador de Proximidade de Curso d'Água (I_{PROX})

Por se tratar de eventos naturais, em que os cursos d'água transbordam para várzeas (IPT, 2007), a proximidade aos corpos d'água define áreas com maior probabilidade de serem afetadas por tais eventos.

Determinar os limites afetados por inundações dentro de uma bacia hidrográfica requer estudos hidrológicos e hidrodinâmicos detalhados e, portanto, é trabalhoso, uma vez que estes dados não estejam previamente disponíveis. Diante dessa perspectiva, o Indicador de Proximidade de Curso d'Água (I_{PROX}) cumpre papel de representação das

planícies de inundações e das chamadas “zonas de passagem de cheias” de uma forma estimativa, representado áreas mais provavelmente alagáveis.

Miranda (2016) afirma que, diferente do Indicador de Declividade para Drenagem (I_{DEC}), que analise a declividade média do terreno, o I_{PROX} considera a declividade média de cada quadrícula (do modelo digital de terreno) em direção ao curso d’água, combinada com sua respectiva distância ao curso d’água, buscando representar o acesso do excedente pluvial para áreas vizinhas.

Portanto, para a metodologia de implementação do indicador, a distância e a inclinação transversal são determinadas criando um ponto no centroide de cada quadrícula, assumindo os valores produzidos pela média das elevações em seu recorte espacial. Por fim, é determinada a declividade entre a malha e as cotas da superfície do curso d’água. A Tabela 3.4 apresenta os valores do indicador arbitrados para as respectivas faixas de declividade e distância consideradas, seguindo, em partes, a formulação original proposta por Miranda (2016).

Tabela 3.4: Indicador de Proximidade de Curso d’Água (IPROX)

Distância (m)	Declividade (%)				
	Menor que 0.5	Entre 0.5 e 1.5	Entre 1.5 e 3	Entre 3 e 8	Maior que 8
<=30	1	1	1	1	0.75
50	1	1	1	0.75	0.5
100	1	1	0.75	0.5	0.25
200	1	0.75	0.5	0.25	0
300	0.75	0.5	0.25	0	0
400	0.5	0.25	0	0	0
500	0.25	0	0	0	0
1000	0	0	0	0	0
>1000	0	0	0	0	0

3.2.4 Indicador de Impermeabilização do Solo (I_{IMP})

A impermeabilização proporciona um forte impacto no uso do solo. Devido ao rápido processo de urbanização, é recorrente a remoção do solo superficial para instalar fundações das construções que ali irão se erguer, restringindo o processo de infiltração e favorecendo o escoamento superficial.

Além disso, a impermeabilização do solo reduz a quantidade de água da chuva que pode ser absorvida pelo solo e, em casos extremos, pode impedir totalmente a absorção. Um solo muito impermeável diminui consideravelmente o tempo que a água leva para chegar aos rios, aumentando seus volumes máximos e consequentemente aumentando o risco de inundações (COMISSÃO EUROPEIA, 2014).

Bacias rurais produzem pouco escoamento se comparado a bacias urbanas, conforme ilustrado na Figura 3.1, pois as bacias rurais possuem o solo com maior capacidade de infiltração, já as bacias urbanas possuem uma fraca infiltração por conta da alta porcentagem de impermeabilização do solo.

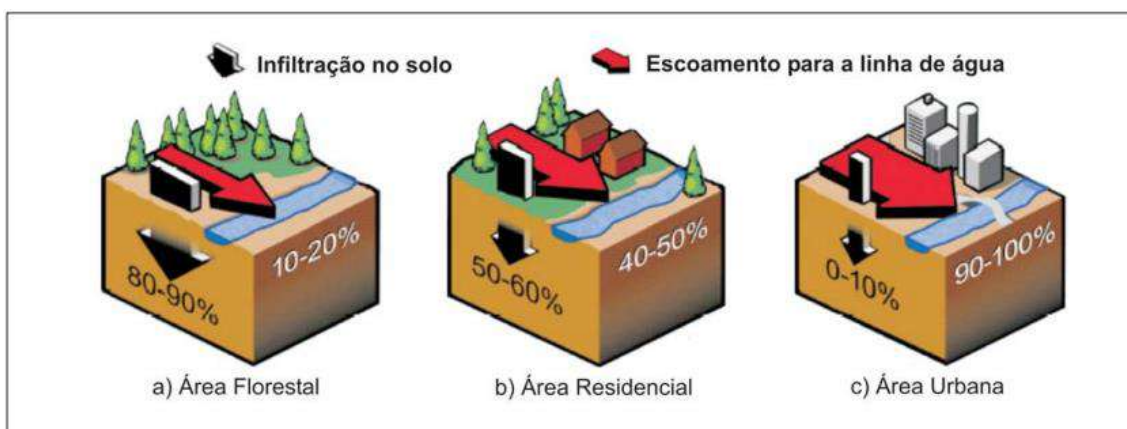


Figura 3.1: Alterações hidrológicas como consequência do processo de urbanização e impermeabilização do solo.

Fonte: Adaptado de Marsh (1983)

A atribuição de valores médios de escoamento superficial, de acordo com o uso e cobertura do solo, constitui-se de metodologia regularmente usada em estudos hidrológicos, como exemplifica o uso do coeficiente de *Runoff* (C), em português, Coeficiente de Escoamento Superficial.

A determinação do Coeficiente de Escoamento Superficial é normalmente obtida de tabelas elaboradas com base nas características da bacia hidrográfica (ou da área de drenagem), como resultados de experimentos de campo. A seguir, apresenta-se a Tabela 3.5, contendo os valores recomendados pela ASCE (American Society of Civil Engineers).

Tabela 3.5: Valores de C recomendados pela ASCE (1969)

Superfície	Característica	Intervalo	C valor esperado
Pavimento	Asfalto	0.70 - 0.95	0.83
	Concreto	0.80 - 0.95	0.88
	Calçadas	0.75 - 0.85	0.80
	Telhado	0.75 - 0.95	0.85
Cobertura: Grama solo arenoso	Pequena declividade (2%)	0.05 - 0.10	0.08
	Declividade Média (2 a 7%)	0.10 - 0.15	0.13
	Forte declividade (7%)	0.15 - 0.20	0.18
Cobertura: Grama solo pesado	Pequena declividade (2%)	0.13 - 0.17	0.15
	Declividade Média (2 a 7%)	0.18 - 0.22	0.20
	Forte declividade (7%)	0.25 - 0.35	0.30

Fonte: Adaptado de ASCE (1969)

3.3 Índice de Vulnerabilidade (IV)

O Índice de Vulnerabilidade (IV) foi desenvolvido com base em uma metodologia multicritério, e tem por finalidade, identificar a exposição e vulnerabilidade social. Caracteriza-se como ferramenta de planejamento urbano para áreas já habitadas. A identificação de áreas vulneráveis a inundações urbanas é tratada usualmente na literatura como a identificação de características que potencializam o dano ao sistema urbano.

Pode-se considerar que a vulnerabilidade é composta pela suscetibilidade intrínseca a danos de elementos do sistema, pelo valor desses elementos e pela resiliência (BERTILSSON *et al.*, 2019). Birkmann (2005) apresenta cinco diferentes interpretações para a vulnerabilidade: a primeira considera a vulnerabilidade como uma característica intrínseca do elemento afetado dentro do conceito de risco; a segunda analisa a vulnerabilidade como o nível de suscetibilidade a sofrer danos; a terceira é baseada em uma visão dualística que contrasta a suscetibilidade a danos e a resiliência; a quarta

individualiza uma estrutura múltipla que considera a exposição, suscetibilidade, capacidade de resposta e adaptação; e a quinta tem caráter multidimensional, abordando as características físicas, sociais, econômicas, ambientais e institucionais da vulnerabilidade, em uma interpretação mais abrangente.

Nessa perspectiva, o uso dos indicadores torna-se de extrema importância para o mapeamento da vulnerabilidade a inundações e o índice, mostrado na Equação 3.1, é formulado considerando a quinta abordagem proposta por Birkmann (2005). Os indicadores propostos, usando Rezende (2018) como referência, dependem inteiramente de informações sociais, econômicas e/ou ambientais.

A Figura 3.2 ilustra, destacado em azul sobre o esquema original do IRES (Rezende, 2018), os indicadores utilizados nesta pesquisa, para o mapeamento da vulnerabilidade a inundações. Para a composição deste índice, além dos indicadores importados do IRES, foi incorporado um indicador de renda familiar, a fim de verificar a vulnerabilidade econômica dos habitantes da bacia. Entretanto, note que, na formulação original do IRES, o indicador de renda é substancialmente mensurado quando se avalia o indicador de valor relativo, observando a renda total da região em análise, o que interfere diretamente na capacidade de reposição dos danos e perdas materiais causados por um evento de inundação. Ademais, uma modificação é realizada no indicador de dificuldade de acesso a ajuda, conforme proposto no IRES sendo, na composição deste novo índice, um indicador de dificuldade de acesso a abrigo.

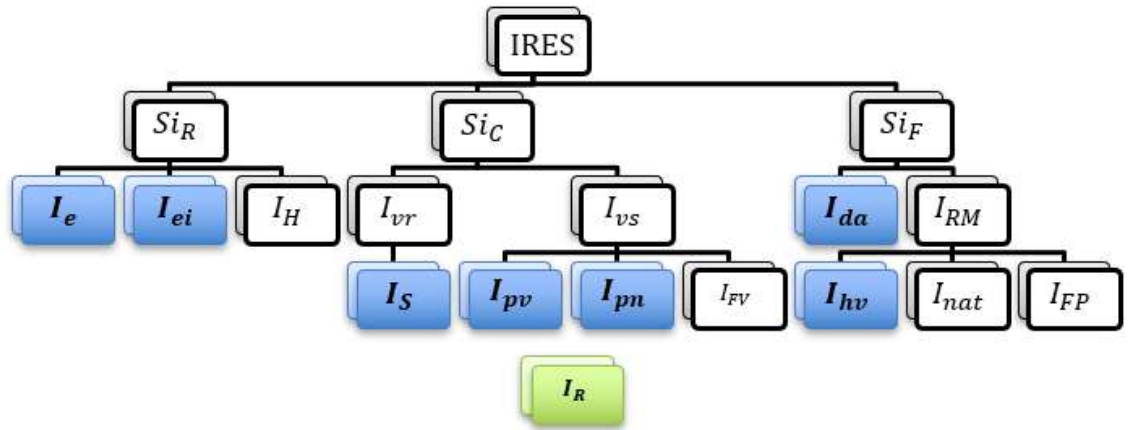


Figura 3.2: Composição geral do IRES adaptada para a composição do IV.

Fonte: Adaptado de REZENDE (2018).

A seguir, a Equação $IV = a \cdot (I_e^{n1} \cdot I_S^{n2}) + (b \cdot I_{pv} + c \cdot I_R) + d \cdot I_{hv} + e \cdot I_{ei} + f \cdot I_{da}$ (3.3) apresenta a formulação geral do IV. Em seguida, as Equações $SiE = (I_e^{n1} \cdot I_S^{n2})$ (3.4) e $SiS = (b \cdot I_{pv} + c \cdot I_R)$ (3.5), de seus subíndices e indicadores.

$$IV = a \cdot (I_e^{n1} \cdot I_S^{n2}) + (b \cdot I_{pv} + c \cdot I_R) + d \cdot I_{hv} + e \cdot I_{ei} + f \cdot I_{da} \quad (3.3)$$

Na Equação $IV = a \cdot (I_e^{n1} \cdot I_S^{n2}) + (b \cdot I_{pv} + c \cdot I_R) + d \cdot I_{hv} + e \cdot I_{ei} + f \cdot I_{da}$ (3.3), a, b, c, d, e, f são pesos que somam 1,0, e $n1$ e $n2$ também são pesos que somam 1. O IV varia de 0 a 1.

A parcela referente aos indicadores de exposição e suscetibilidade das edificações, indicada na Equação $SiE = (I_e^{n1} \cdot I_S^{n2})$ (3.4), compõe o Subíndice de Vulnerabilidade Estrutural (Si_E). Já a parcela composta pelos indicadores de pessoas vulneráveis e renda familiar, expresso na Equação $SiS = (b \cdot I_{pv} + c \cdot I_R)$ (3.5), é nomeado de Subíndice de Vulnerabilidade Socioeconômica (Si_S).

$$Si_E = (I_e^{n1} \cdot I_S^{n2}) \quad (3.4)$$

$$Si_S = (b \cdot I_{pv} + c \cdot I_R) \quad (3.5)$$

3.3.1 Indicador de exposição de edificações (I_e)

Expresso pela densidade construída (m^2/ha), pode indicar indiretamente o grau de exposição das pessoas na área em estudo. Quanto maior a densidade, mais verticalizada são as construções, indicando que a taxa de ocupação de edifícios residenciais ou comerciais é maior e mais pessoas são afetadas, direta ou indiretamente. Para normalizar o indicador, pressupõe-se que o terceiro quartil em relação a toda a amostra seja tomado como teto para o de maior impacto, de forma a reduzir possíveis “achatamentos” na escala, que poderiam ser ocasionados por valores extremos pontuais. Os demais valores são normalizados de forma linear. A título de ilustração, a Figura 3.3 mostra um exemplo desta normalização já aplicado para a bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, que será objeto do caso de estudo desta dissertação.

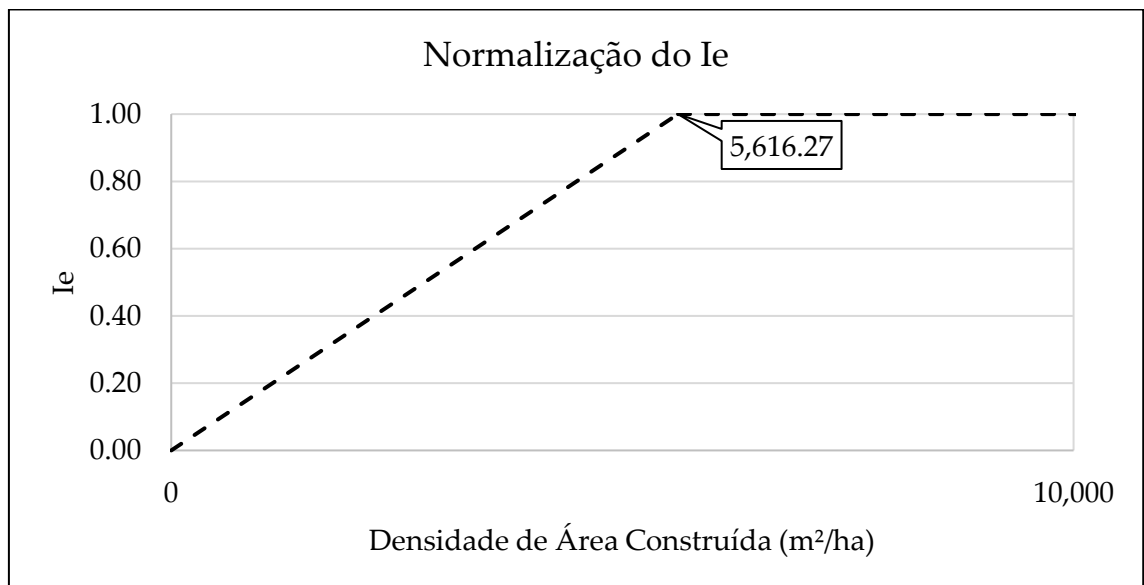


Figura 3.3: Normalização do indicador de exposição de edificações.

3.3.2 Indicador de exposição de infraestrutura urbana (I_{ei})

O indicador é expresso pela densidade de vias, em m/ha . Trata-se de um indicador indireto do grau de influência da infraestrutura urbana em uma área específica. Em outras palavras, quanto maior a densidade de vias em uma área, maior a cobertura esperada dos serviços de infraestrutura (como abastecimento de água, tratamento de

esgoto, iluminação pública, rede de cabos, etc.). Semelhante ao indicador anterior (I_e), a normalização deste indicador foi realizada considerando a exposição máxima limitada ao valor do terceiro quartil da amostra. A título de ilustração, a Figura 3.4 **Figura 3.3** mostra um exemplo desta normalização já aplicado para a bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, que será objeto do caso de estudo desta dissertação. como representado na.

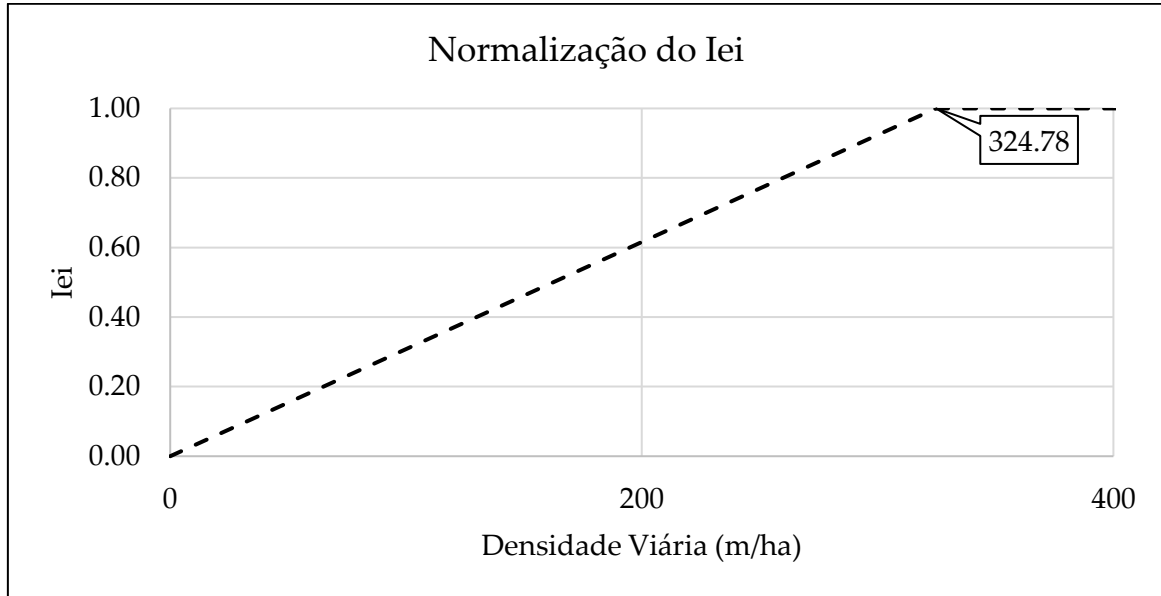


Figura 3.4: Normalização do indicador de exposição de infraestrutura urbana.

3.3.3 Indicador de susceptibilidade das edificações (I_s)

Exprime indiretamente o número médio de pavimentos de uma determinada área, e quanto menor a altura média do edifício, maior o impacto sobre o edifício, que estará mais próximo de estar inteiramente exposto ao contato com a água. As informações sobre a altura dos edifícios podem ser obtidas, em geral, junto ao setor de urbanismo das prefeituras. Este indicador atua em conjunto com o I_e , de forma a indicar o dano potencial a que a edificação está realmente exposta, segundo o número de seus pavimentos. O indicador de susceptibilidade das edificações é calculado por meio da Equação $IS=$

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_h \cdot I_A}{n} \quad (3.6).$$

$$I_s = \sum_{i=1}^n \frac{n_h \cdot I_A}{n} \quad (3.6)$$

Onde n_h é o número de edificações em cada intervalo de altura (h), I_A é o indicador de altura da edificação i , dado de acordo com a Tabela 3.6 e n é o número total de edificações.

Tabela 3.6: Valores do Indicador de Altura (I_A), relacionados à altura da edificação H

Altura da edificação (h)	Menor que 5 metros	Entre 5 e 7,5 metros	Entre 7,5 e 10,0 metros	Entre 10,0 e 12,5 metros	Acima de 12,5 metros
Indicador de Altura (I_A)	1,00	0,50	0,33	0,25	0,10

Fonte: REZENDE (2018).

3.3.4 Indicador de pessoas vulneráveis (I_{pv})

O indicador de pessoas vulneráveis representa uma parcela da vulnerabilidade social da região em estudo, de acordo com o percentual de pessoas possivelmente mais vulneráveis a eventos de inundação, sob o ponto de vista físico. Para o indicador de grupo vulnerável é considerada a proporção direta da população com menos de 15 e mais de 60 anos, em relação à população total da região, como expresso pela Equação $I_{pv} = \frac{N_{pv}}{P}$ (3.7). As informações desse indicador advêm obtidas do banco de dados do Censo Demográfico 2010 (IBGE, 2010).

$$I_{pv} = \frac{N_{pv}}{P} \quad (3.7)$$

Onde N_{pv} refere-se ao número de pessoas vulneráveis (isto é, pessoas com idade menor que 15 e maior que 60 anos) e P é a população total na região em estudo.

3.3.5 Indicador de renda familiar (I_R)

Caracteriza a vulnerabilidade econômica dos habitantes, dada de acordo com o rendimento, por faixa salarial, das residências na região em análise. Os valores da vulnerabilidade econômica são normalizados de acordo com a Tabela 3.7. O cálculo do indicador para a unidade de análise considera a média ponderada das faixas salariais dos residentes. Note que, como apontado anteriormente, este indicador não compõe a formulação original do IRES, sendo adicionado como nova contribuição para a composição do IV, a partir da análise de diferentes indicadores socioeconômicos encontrados na pesquisa bibliográfica.

Tabela 3.7: Valores de vulnerabilidade econômica normalizados

Faixa Salarial	Sem renda	Até 2 salários mínimos	2 a 5 salários mínimos	5 a 10 salários mínimos	Acima de 10 salários mínimos
Nota	1,00	0,75	0,50	0,25	0

3.3.6 Indicador de hierarquia viária (I_{hv})

Expresso pela maior hierarquia de via encontrada dentro da área de referência e normalizado de acordo com os valores apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Normalização do indicador de hierarquia viária (I_{hv})

Hierarquia Viária	Estrutural	Arterial Primária	Arterial Secundária	Coletora	Local
-------------------	------------	-------------------	---------------------	----------	-------

Indicador de					
Hierarquia	1,00	0,94	0,77	0,50	0,11
Viária (I_{hv})					

Fonte: Adaptado de REZENDE (2018).

3.3.7 Indicador de dificuldade de acesso a abrigo (I_{da})

Neste trabalho, o indicador de dificuldade de acesso a abrigo representa, indiretamente, a dificuldade da população de uma determinada área em se abrigar em algum ambiente seguro. Na presente pesquisa, por facilidade de acesso aos dados, são consideradas as escolas municipais e estaduais que possuem em sua infraestrutura mais de 10 salas e quadras e pátios cobertos. Para o cálculo do indicador, foi avaliada a área de abrangência das escolas em um raio de 1.000 m, conforme apresentado na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Ranqueamento da área de abrangência das escolas

Área de abrangência	Não atendida	Atendida pelo raio de uma escola	Atendida pelo raio de duas escolas	Atendida pelo raio de três ou mais escolas
Nota	1,00	0,75	0,50	0,15

3.4 Índice de Risco Potencial de Inundações (IRPI)

O risco, como já visto anteriormente, é definido como as perdas esperadas (de vida, pessoas afetadas, danos à propriedade e interrupção da atividade econômica) devido a um perigo particular afetando uma dada área em um tempo de referência. O risco é o produto de perigo e vulnerabilidade e pode ser transformado em uma relação matemática UM DHA (1992 *apud* Kelman, 2003).

Entretanto, medir o risco é um processo complexo que envolve a análise de dados interdisciplinares, contabilizando aspectos diversos, como características socioeconômicas, físicas e ambientais de uma área (REZENDE *et al.*, 2019). Uma alternativa para a gestão do risco de inundações passa pela formulação de índices integradores, utilizando indicadores simplificados, que combinam as componentes do risco, a fim de estimar, aproximadamente, quais locais tendem a ser mais frágeis e susceptíveis a danos, orientando o processo de gestão e, nesse processo, definindo a necessidade eventual de estudos detalhados para os locais mais críticos.

Seguindo essa perspectiva, de oferecer uma avaliação simplificada e rápida do risco, um índice de risco potencial a inundações é proposto seguindo o entendimento de risco apontado por UM DH (1992, *apud* Kelman, 2003), possuindo, como base, os dois índices já apresentados previamente: o Índice de Vulnerabilidade, formulado considerando a quinta abordagem da vulnerabilidade, proposta por Birkmann (2005), a partir de indicadores disponíveis no IRES (REZENDE, 2018) e aqui complementados e reorganizados para representar a parcela da vulnerabilidade, e o Índice de Susceptibilidade do Meio Físico, em sua segunda versão (ISMFI v2.0), representando a parcela do perigo potencial. A metodologia utilizada para a formulação do Índice de Risco Potencial de Inundações (IRPI) é ilustrada na Figura 3.5.

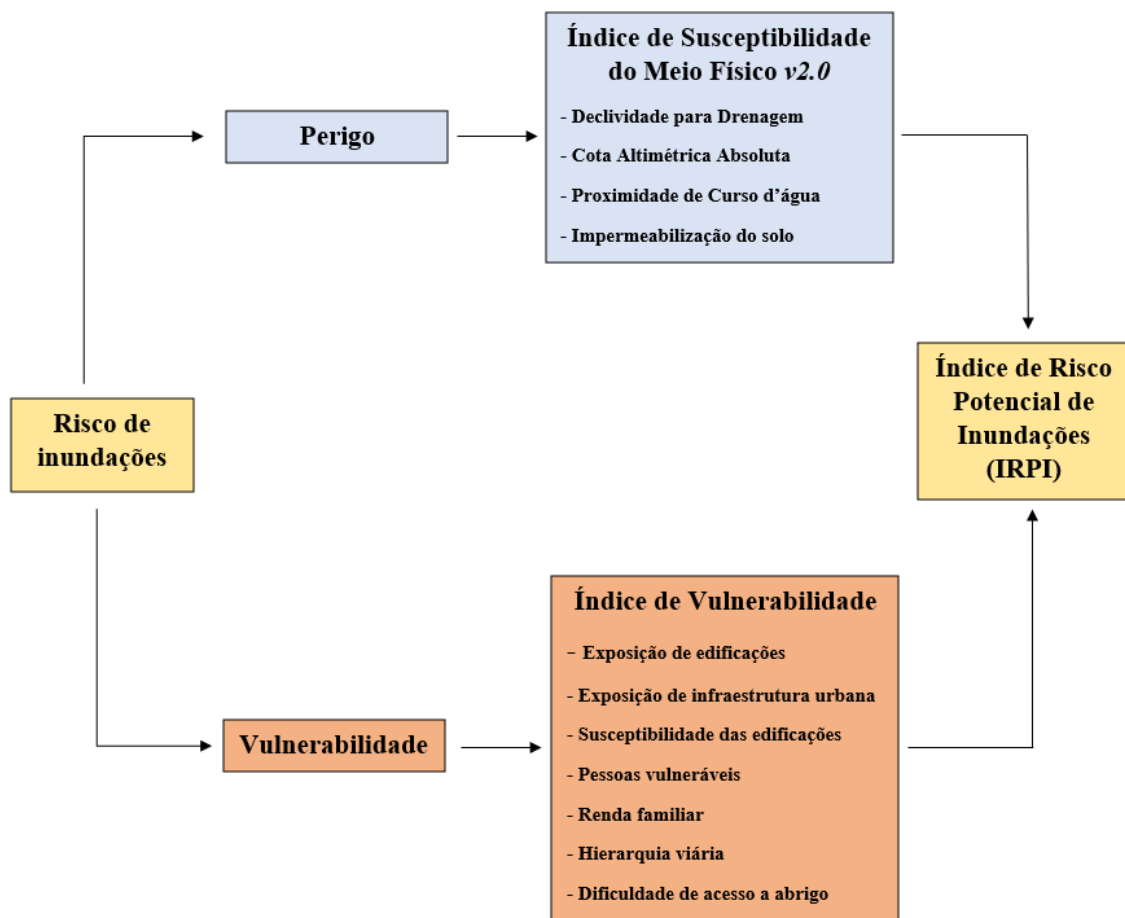


Figura 3.5: Esquema de formulação metodológica do Índice de Risco Potencial de Inundações (IRPI)

A formulação do IRPI é apresentada na Equação $IRPI = (IV)^{p1} \cdot (ISMFI\ v2.0)^{p2}$ (3.8).

$$IRPI = (IV)^{p1} \cdot (ISMFI\ v2.0)^{p2} \quad (3.8)$$

Onde p1 e p2 são pesos relativos à importância de cada subíndice, de acordo com a decisão do técnico/modelador, dos stakeholders e da comunidade envolvida, dependendo do processo de decisão. A dinâmica de atribuição dos pesos para cada subíndice do IRPI vai influenciar diretamente qual é o fator que terá maior contribuição no risco avaliado.

Este índice representa um instrumento com grande potencial para os tomadores de decisão, pois pode identificar áreas que enfrentam problemas de maior risco potencial

de inundações, o que contribui para uma distribuição mais adequada de investimentos de capital e esforços para a diminuição da vulnerabilidade e o gerenciamento do risco de inundações, além de oferecer orientações diretas para o zoneamento de uso do solo.

3.5 Proposição de diretrizes conceituais para o planejamento urbano

O planejamento urbano configura-se como um processo de extrema importância para os centros urbanos atualmente, auxiliando na ocupação racional e no equilíbrio ambiental. Não deveria ser desvinculado das políticas de desenvolvimento, pois está diretamente relacionado à qualidade de vida (HONDA *et al.*, 2015). O planejamento urbano precisa estar apoiado em uma discussão baseada na relação de uso e ocupação do solo urbano e a produção da habitação de interesse social em cidades médias, considerando as questões ambientais.

É importante reconhecer, portanto, assim como Fontes e Barbassa (2003), que alguns dos problemas associados às inundações urbanas podem ser minimizados ou mesmo evitados se os responsáveis pelo planejamento derem mais atenção ao manejo da drenagem nas áreas urbanas. Isso pode ser possível, incorporando esse conhecimento nas atividades iniciais do processo de planejamento urbano, principalmente no que diz respeito ao uso e ocupação do solo.

De acordo com Silva (2017), o uso do solo admite uma variedade tão grande quanto as atividades da própria sociedade. A Lei de Uso e Ocupação do Solo define as normas gerais para o desenvolvimento da cidade.

Para Takeda (2013), o uso e ocupação do solo urbano têm por principais finalidades:

- Organizar o território potencializando as aptidões, compatibilidades, contiguidades, e as complementariedades das diversas atividades urbanas;
- Controlar a densidade populacional e a ocupação do solo pelas construções;
- Otimizar os deslocamentos e melhorar a mobilidade urbana;
- Preservar o meio ambiente e a qualidade de vida urbana;
- Minimizar a possibilidade de desastres ambientais.

Tingsanchali (2012), por exemplo, evidencia a importância do papel do planejamento urbano e de outros processos de gestão do uso do solo urbano na redução do risco de inundações, com o consequente aumento da resiliência das cidades. Além disso, o ato de considerar o risco de desastres no contexto do processo de planejamento urbano representa uma evolução no sentido de se antecipar a possíveis situações danosas e construir a resiliência de um sistema (MIGUEZ *et al.*, 2018).

Segundo Miguez *et al.* (2015), um planejamento urbano deve englobar algumas premissas gerais:

- A bacia hidrográfica deve ser considerada como referência para o planejamento urbano, mesmo que seus limites territoriais não coincidam com os limites administrativos municipais;
- Os padrões de escoamento e o comportamento das bacias hidrográficas devem ser mapeados, para reconhecer os limites impostos pela natureza;
- Os caminhos de escoamento natural e as planícies de inundação devem ser preservados e a sua ocupação deve ser evitada – uma possibilidade para ocupar e proteger essas áreas enquanto fornecem capacidade de armazenamento é a criação de parques naturais ou urbanos (ou híbridos);
- O desenvolvimento urbano deve ser orientado pelos padrões de escoamento das bacias hidrográficas – por exemplo, locais que são naturalmente mais impermeáveis, atribuíveis às características do solo, são responsáveis por gerar maiores volumes de escoamento e podem ser definidos como prioridades para a expansão urbana, que resultará em menor alteração dos padrões naturais;
- A vegetação natural deve ser preservada, pelo menos nos topos de morro e nas áreas ribeirinhas;
- As taxas de impermeabilização devem ser controladas na expansão urbana – a introdução de medidas de drenagem urbana sustentável, por exemplo, pode compensar as mudanças urbanas no ciclo natural da água, sempre que necessário.

Battemarco (2020) aponta que o Plano Diretor e o Zoneamento se configuram como instrumentos elementares na interface entre o planejamento urbano e a drenagem e a redução de riscos de inundação. De acordo com Miguez *et al.* (2016), o Plano Diretor Urbano deve estar ciente do mapeamento de cheias e precisa focar no controle do uso do

solo para não conflitar com as áreas alagáveis. Em contrapartida, o zoneamento urbano, por sua vez, pode determinar as restrições de ocupação, segundo a frequência de inundações e alagamentos em cada área.

Para Souza e Sobreira (2014), a aptidão à urbanização pode ser definida como a capacidade do solo de suportar a ocupação urbana, com o mínimo de impacto e o mais alto nível de segurança. A análise de aptidão, portanto, inicia-se com o mapeamento de características demográficas, sociais e atributos do meio físico, e tem sua etapa final com a implementação das chamadas medidas de controle, que reúnem ações que podem ser tomadas, sejam elas baseadas ou não em intervenções físicas, de maneira a mitigar os impactos das inundações sobre o meio.

Logo, diante dos impactos da urbanização e consequentes modelos de aumento das velocidades de escoamento, gerando aumento das vazões máximas, transporte de maiores volumes e redução do tempo de concentração, novas concepções para sistemas de drenagem urbana sustentáveis têm suas discussões visando abordar o tratamento de águas pluviais urbanas de uma maneira menos impactante, buscando por padrões de escoamento (TUCCI, 2007).

A definição legal de Drenagem Urbana pode ser encontrada na Lei do Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020), onde lê-se, no Art. 3º: “I – saneamento básico: conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de: (...) d) drenagem e manejo das águas pluviais urbanas: constituídos pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes.”

Segundo Tucci (2012), a drenagem urbana, no seu sentido intrínseco, pode ser mensurada como o conjunto de medidas, que tem por objetivo minimizar os riscos a que as populações estão sujeitas, ocasionadas pela intensa urbanização, diminuindo os prejuízos causados por inundações e permitindo o desenvolvimento urbano de forma harmônica, planejada e sustentável.

Tradicionalmente, por uma questão histórica, que surge da necessidade de sanear o ambiente urbano no contexto pós-Revolução Industrial, a definição clássica de drenagem implica em captar, conduzir e descarregar, em segurança, as águas pluviais que caem sobre uma dada área e ali não são desejadas. Entretanto, mais modernamente, entende-se que adicionalmente às funções básicas, é necessário considerar o funcionamento do ciclo hidrológico, zelar pela qualidade ambiental e integrar o sistema de drenagem ao processo de desenho da paisagem urbana.

A partir de 1970, os paradigmas tradicionais começam a ser quebrados, uma vez que se sobressai a visão de que medidas tradicionais de canalização tendem a transferir problemas, no espaço (para outros locais) e no tempo (para gerações futuras). Para Prodanoff (2011), hoje, felizmente, despontam novas práticas sob uma ótica inovadora no gerenciamento das cheias urbanas, em diversas cidades do mundo. Trata-se de uma visão focada no desenvolvimento sustentável da drenagem urbana com o objetivo de restituir parcialmente o ciclo hidrológico natural a estágios próximos ao da fase de pré-urbanização. Portanto, com a evolução dos conceitos de drenagem, surgem novos conceitos, dentre os quais pode-se citar:

- *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS) – O SUDS (ELLIOTT e TROWSDALE, 2007; WOODS-BALLARD *et al.*, 2007), originado na Inglaterra, propõe tanto a redução dos problemas de qualidade e quantidade, quanto a maximização das oportunidades de revitalização do espaço urbano e incremento da biodiversidade. Esta última preocupação introduz a possibilidade de articulação destas soluções com a questão da requalificação fluvial.
- *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) – O WSUD, concebido na Austrália (ARGUE, 2004) tenta integrar as ciências sociais e físicas em uma proposição de gerenciamento holístico para águas urbanas, considerando conjuntamente a oferta de água potável, os esgotos e a drenagem das águas pluviais, desde a escala do lote até a escala da bacia, envolvendo o desenho de edificações e da própria paisagem, alinhando medidas estruturais e não estruturais
- *Green Infrastructure* (GI) – A infraestrutura verde (GI) tem sua conceituação originada em 2007 para atender aos regulamentos da Lei da Água Limpa, quando a Agência de Proteção Ambiental dos EUA definiu a infraestrutura verde como

um conjunto de melhores práticas para o gerenciamento de águas pluviais. O conceito de infraestrutura verde surgiu pela necessidade de assegurar a provisão de serviços ecossistêmicos em paisagens antrópicas (COLDING, 2011 *apud* AHERN *et al.*, 2014).

- *Best Management Practices* (BMP) – O termo surge em 1972, em resposta à crescente preocupação pública com a poluição grave e generalizada da água. Miguez (2005) define BMP como um conjunto planejado de ações implementadas na bacia, com o objetivo de atenuar os impactos da urbanização, considerando não somente preocupações com a quantidade de água, mas também com a qualidade das águas.
- *Low Impact Development* (LID) – O termo surge na América do Norte em 1977 e na Nova Zelândia nos anos 2000. Coffman *et al.*, (1998) aponta que o conceito visa à sustentabilidade dos projetos de controle de inundações com o objetivo de criar uma “paisagem funcional” capaz de agrupar características de projeto que buscam simular as funções de infiltração e armazenamento da bacia pré-urbanizada.

Os sistemas de drenagem urbana sustentável são dispositivos e técnicas desenvolvidos acerca do seguinte tripé: quantidade, qualidade e amenidade/biodiversidade, as quais devem ser alcançadas de maneira equilibrada (WOODS-BALLARD *et al.*, 2007). A Figura 3.6 ilustra, de forma comparativa, as técnicas de drenagem apresentadas acima.

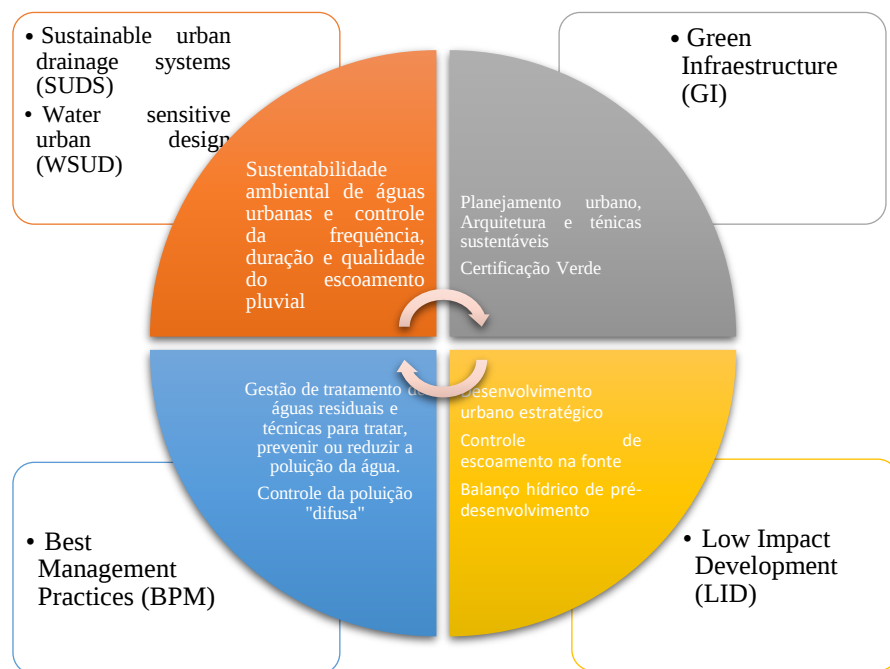


Figura 3.6.: Comparativo entre as técnicas de drenagem.

Fonte: Adaptado de Gutierrez & Ramos (2019).

Miguez *et al.* (2018) destacam que, nos locais onde o risco ainda não está instalado, ou seja, em locais que permeiam a malha urbana e que ainda não foram ocupados, ou em áreas destinadas à expansão urbana, torna-se necessário um instrumento que permita evitar que se aprovelem loteamentos em áreas potencialmente susceptíveis a perigos naturais.

Conceitualmente, segundo Miguez *et al.* (2018), uma planície de inundação é geralmente dividida em pelo menos duas áreas distintas. A primeira é chamada de “zona de passagem da cheia” (*floodway*) e está associada a uma área onde as inundações ocorrem com frequência. A outra é chamada “franja de inundação” (*flood fringe*), que constitui áreas que podem ser inundadas durante tempestades mais severas, embora principalmente apenas com efeito de armazenamento. As análises e recomendações do planejamento e zoneamento urbano da área em estudo desta pesquisa seguem este arcabouço teórico, nesta divisão conceitual.

Portanto, considerando esta introdução mais longa e geral, com objetivo de mostrar um conjunto amplo e não exaustivo de possibilidades de ações de planejamento, propõe-se considerar um conjunto básico de diretrizes, a partir da aplicação do IRPI, bem como da avaliação individual de suas parcelas:

- Nas áreas de maior perigo, não deve ser permitida a habitação, sendo uma área preferencial de preservação, podendo, porém estas serem utilizadas para recreação, por exemplo, desde que o projeto preveja a possibilidade de alagamento frequente e considere as necessidades de limpeza e manutenção pós-evento.
- Onde o perigo já encontra ocupações e, portanto, já há risco potencial, a densificação deve ser evitada e medidas de controle de inundação devem ser consideradas. Neste caso, estudo detalhados complementares são necessários.
- As regiões de perigo médio, preferencialmente não devem ser ocupadas, sendo o seu uso preferencial para parques inundáveis. Com uma frequência de inundação mediana, justifica-se a implantação de parques multifuncionais, para uso urbano na ausência de grandes chuvas.
- Em regiões de média susceptibilidade de inundação e presença de população, pode-se propor medidas de mitigação de inundação, ou, mais adequadamente, medidas individuais de proteção para as habitações, dada a frequência menos significativa de alagamentos.
- Em áreas de baixo risco, há uma pequena chance de inundação, sendo afetada apenas por inundações incomuns e baixas velocidades. Logo, nesta faixa podem-se dispensar medidas individuais de proteção para as habitações, mas deve-se manter um alerta sobre a eventual possibilidade de inundação, para evitar maiores danos nos eventuais eventos esporádicos que vierem a ocorrer.

4 Estudo de caso: Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, Rio de Janeiro (RJ)

4.1 Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu está situada na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro e é parte integrante da macrorregião de drenagem da Baía de Sepetiba. Esta área abrange diversos bairros, incluindo Guaratiba, Pedra de Guaratiba, Campo Grande, Senador Vasconcelos, Santíssimo e Senador Camará, com os bairros de Campo Grande e Guaratiba sendo os mais abrangentes. Conforme consta no Plano Urbanístico Básico (2021), essa região faz parte da área de planejamento AP-5, a qual é caracterizada por ser uma antiga zona rural do município, onde a urbanização ocorre principalmente entre a população de baixa e média renda, com a presença de loteamentos irregulares e clandestinos, conforme ilustrado na Figura 4.1: **Localização geográfica da Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu.**

Fonte: Relatório Diagnóstico (2021)..

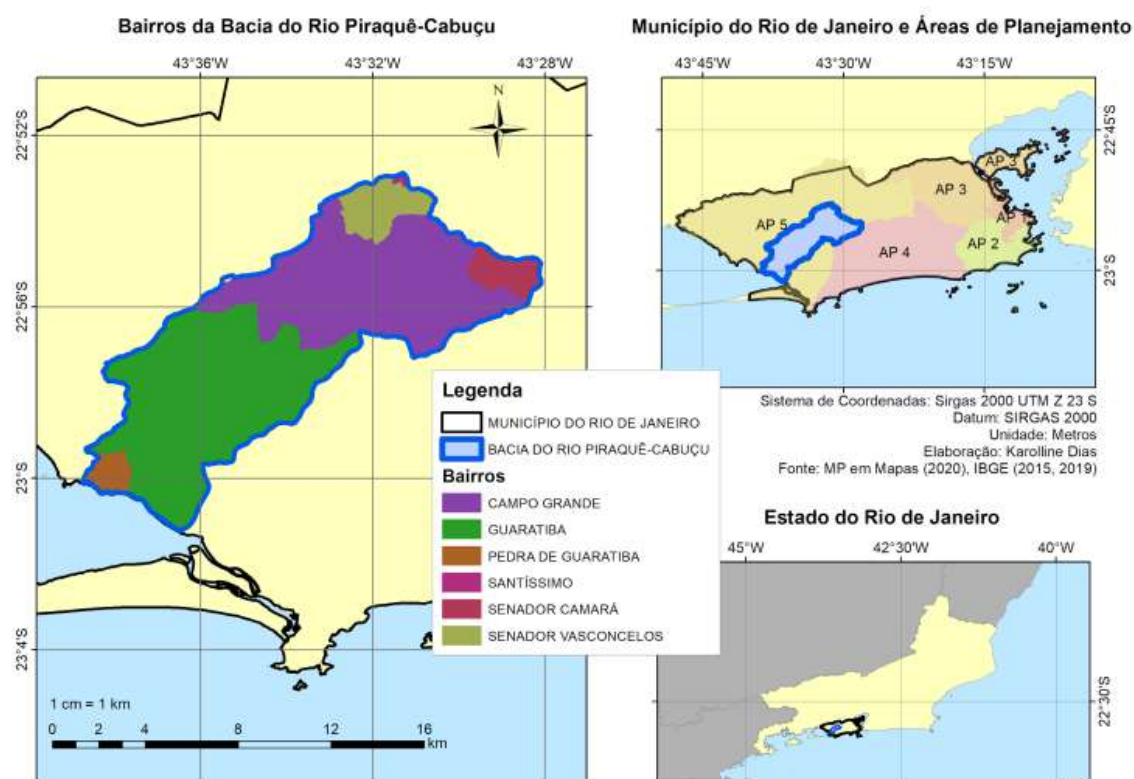


Figura 4.1: Localização geográfica da Bacia do Rio Piraguê-Cabuçu.

Fonte: Relatório Diagnóstico (2021).

A bacia hidrográfica em questão apresenta uma grande extensão territorial, englobando também áreas de preservação, tais como o Parque Estadual da Pedra Branca (PEPB) e reservas biológicas de manguezais, próximas à sua foz. Além disso, há zonas de amortecimento, o Parque Natural Municipal da Serra da Capoeira Grande e áreas de proteção ambiental, conforme ilustrado na Figura 4.2, o que revela a importância da conservação ambiental nessa região. Com uma área de drenagem de 108 km², o rio Piraguê-Cabuçu é o principal curso d'água da bacia, com uma extensão de aproximadamente 23 km (PDMAP, 2012). A nascente do rio localiza-se na Serra do Lameirão, dentro do Parque Estadual da Pedra Branca, e sua foz desagua na Baía de Sepetiba. O curso atravessa áreas urbanizadas a montante e a jusante, com presença de ocupações irregulares que são mais vulneráveis a inundações. Segundo Nunes (1992), o rio Piraguê-Cabuçu conta com a contribuição de vários afluentes, sendo o Rio da Prata o mais importante, além de pequenos cursos d'água originados do Maciço da Pedra Branca e das Serras Inhoaíba, Cantagalo e Capoeira Grande.

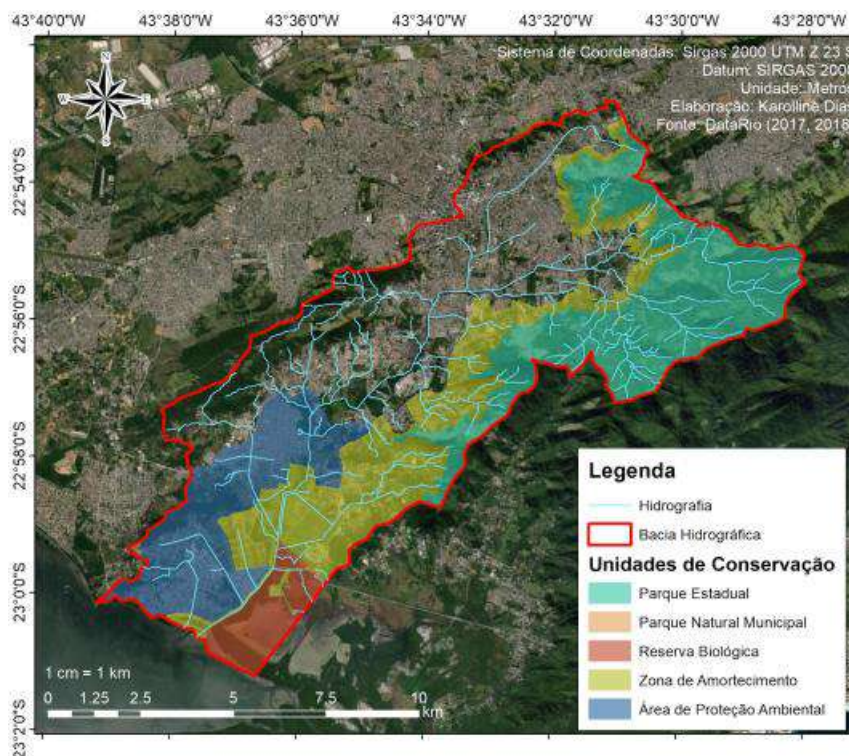


Figura 4.2: Unidades de conservação na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu.

Fonte: Relatório Diagnóstico (2021)

A bacia hidrográfica em questão apresenta áreas naturalmente alagadiças junto a sua foz, o que pode ser atribuído à sua configuração geográfica. Conforme apontado pelo Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais do Rio de Janeiro (PDMAP, 2012), grande parte da área de manguezais está situada abaixo da cota de 0,5 metros, que é considerada a cota de influência direta da maré. Como resultado, essa região é frequentemente invadida por águas provenientes da Baía de Sepetiba. Adicionalmente, em áreas de manguezais, podem ser identificadas áreas de apicuns, que são planícies hipersalinas com ausência de plantas vasculares, como destacado por Dias-Brito *et. al.*, 1982 *apud* Pellegrini (2000).

A bacia do Rio Piraquê-Cabuçu vem sendo impactada por um processo crescente de degradação ambiental associado à ocupação urbana desordenada, com graves consequências para a qualidade hídrica da região. Além disso, a poluição é intensificada pela falta de políticas habitacionais efetivas para as populações de baixa renda, que se encontram à margem das decisões governamentais e sem saneamento adequado. A disposição inadequada de resíduos sólidos e o despejo de esgotos domésticos no curso do

rio contribuem para o agravamento da situação, especialmente em períodos de chuva intensa.

4.1.1 Aspectos Históricos

A região conhecida atualmente como Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro foi ocupada há algumas décadas e se estabeleceu como uma área agrícola, com destaque para o cultivo de cana-de-açúcar nos séculos XV e XVI. No século XVIII, houve uma transição para a produção de café, laranja, mandioca, arroz entre outros, e as proximidades da Baía de Sepetiba foram palco de acontecimentos marcantes relacionados às primeiras ações de ocupação das terras litorâneas. Na área em questão, o desenvolvimento inicial foi impulsionado pelos sesmeiros, que receberam porções de terras.

Conforme citado por Lima *apud* Mansur (2008), os sesmeiros eram sujeitos a obrigações, dentre elas a construção de caminhos públicos e privados para acesso a fontes, pontes e portos. Essas medidas, muito possivelmente, foram as primeiras intervenções de engenharia realizadas nos rios e córregos da região. Entretanto, os contratempos relacionados às enchentes são recorrentes na Zona Oeste do Rio de Janeiro desde as primeiras décadas do século XVI, conforme indicado por Mansur (2008, p. 63):

Assim como a conquista do centro da cidade do Rio de Janeiro foi uma árdua luta contra os pântanos e mangues que dominavam a região, a história não foi diferente para os desbravadores do chamado “sertão carioca”.

Esse fato reflete as características naturais da região, que apresenta desafios à ocupação, devido às suas feições naturais. Como em toda a cidade do Rio de Janeiro, os rios são uma presença constante, criando potencial de paisagens deslumbrantes, com suas águas e vegetação, mas também contribuindo para as inundações. A partir deste contexto histórico, foram identificados dois pontos iniciais de crescimento populacional na região da Zona Oeste do Rio de Janeiro. Um deles localizava-se no bairro de Campo Grande e o outro, no bairro da Pedra de Guaratiba, pertencente à região de Guaratiba.

Durante longo período, a Zona Oeste permaneceu negligenciada e isolada do restante da cidade, sendo de fato considerada uma área rural. Até o período pós-guerra, o bairro de Campo Grande continuou composto por grandes pomares de laranja. Contudo,

a partir das décadas de 1940 e 1950, com a queda do cultivo, iniciou-se o processo de subdivisão das grandes propriedades, com as terras sendo fragmentadas e comercializadas. Esse processo, como esclarece Cardoso (2009), já indicava o surgimento de uma periferia rural-urbana, atraindo para o bairro indústrias e, conseqüentemente, uma população que buscava espaço diante do grande adensamento na região central do Rio de Janeiro.

O processo de ocupação da Zona Oeste pode ser compreendido por meio da ampliação dos meios de transporte e da conexão entre as áreas mais distantes da região com outras áreas da cidade. Conforme relatado pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro (2017), um marco importante no processo de ocupação e urbanização ocorreu no século XIX, com a instalação do ramal da Central e suas sucessivas estações, que atualmente chegam até Mangaratiba. Até meados do século XX, a região permaneceu pouco habitada, mas, a partir da década de 1970, houve um gradual aumento populacional, impulsionado pela especulação imobiliária e pela implantação de infraestrutura urbana que conectou a região com outras áreas da cidade, reduzindo o isolamento dos bairros estudados.

De acordo com Mansur (2011), a dragagem do fundo da Baía de Sepetiba foi o primeiro passo para a implantação do porto, que permitiria a entrada de navios de grande porte. A construção do porto foi de grande importância para a economia do Estado; entretanto, a degradação ambiental resultou em grandes prejuízos aos serviços ecossistêmicos, ocasionando alterações nas comunidades que viviam da dinâmica natural da região.

Ao longo do século XX, a Zona Oeste foi gradualmente se consolidando como uma área estratégica para a cidade, deixando de ser considerada apenas um “sertão”. Conforme estabelecido pelo Plano Diretor Municipal, embora a região apresente restrições quanto ao adensamento populacional, intensidade construtiva e instalação de atividades econômicas, subordinadas à capacidade das redes de infraestrutura e proteção ambiental e paisagística, o controle da expansão ainda expõe os habitantes aos possíveis desdobramentos de ocupações em áreas de risco, com instalações precárias e loteamentos irregulares.

4.1.2 Características socioeconômicas e ambientais

De acordo com as informações fornecidas pelo IBGE a partir dos dados do Censo de 2010, a bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu conta com um total de 237.553 habitantes. A distribuição espacial dessa população pode ser visualizada por meio do mapa ilustrado na Figura 4.3.

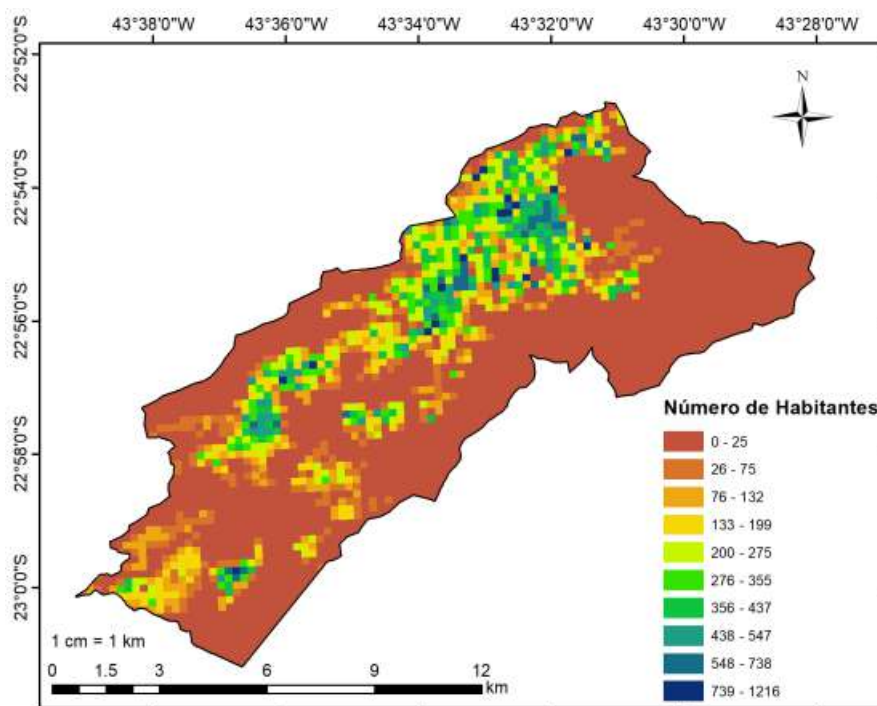


Figura 4.3: Distribuição espacial da população da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu

Fonte: Grupo de planejamento urbano-territorial para incremento da resiliência a inundações.

A região em questão é caracterizada pela presença de um núcleo comercial robusto no bairro de Campo Grande, o qual é apontado por Nacif e Antunes (2010) citados por Ribeiro (2017) como responsável por uma certa segregação socioespacial no bairro. De acordo com os autores, as áreas centrais comerciais e com infraestrutura melhor acabam sendo mais valorizadas e abrigando uma parcela da população com renda mais elevada, enquanto o crescimento de lotes irregulares e moradias construídas mais precariamente ocorre nas áreas periféricas e sem adequada infraestrutura.

Além da existência de um centro comercial desenvolvido, existem também uma zona industrial a montante e uma comunidade pesqueira a jusante, mostrando a diversidade socioeconômica ao longo de toda a bacia. Tal diversidade é passível de ser

também observada por meio de um mapeamento de renda *per capita* da região, conforme ilustrado na Figura 4.4. Os dados utilizados foram obtidos no Censo de 2010 e, embora datados de mais de uma década atrás, ainda são capazes de descrever o comportamento típico da área em estudo.

RENDA PER CARPITA DOS DOMICÍLIOS NA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU - CENSO 2010

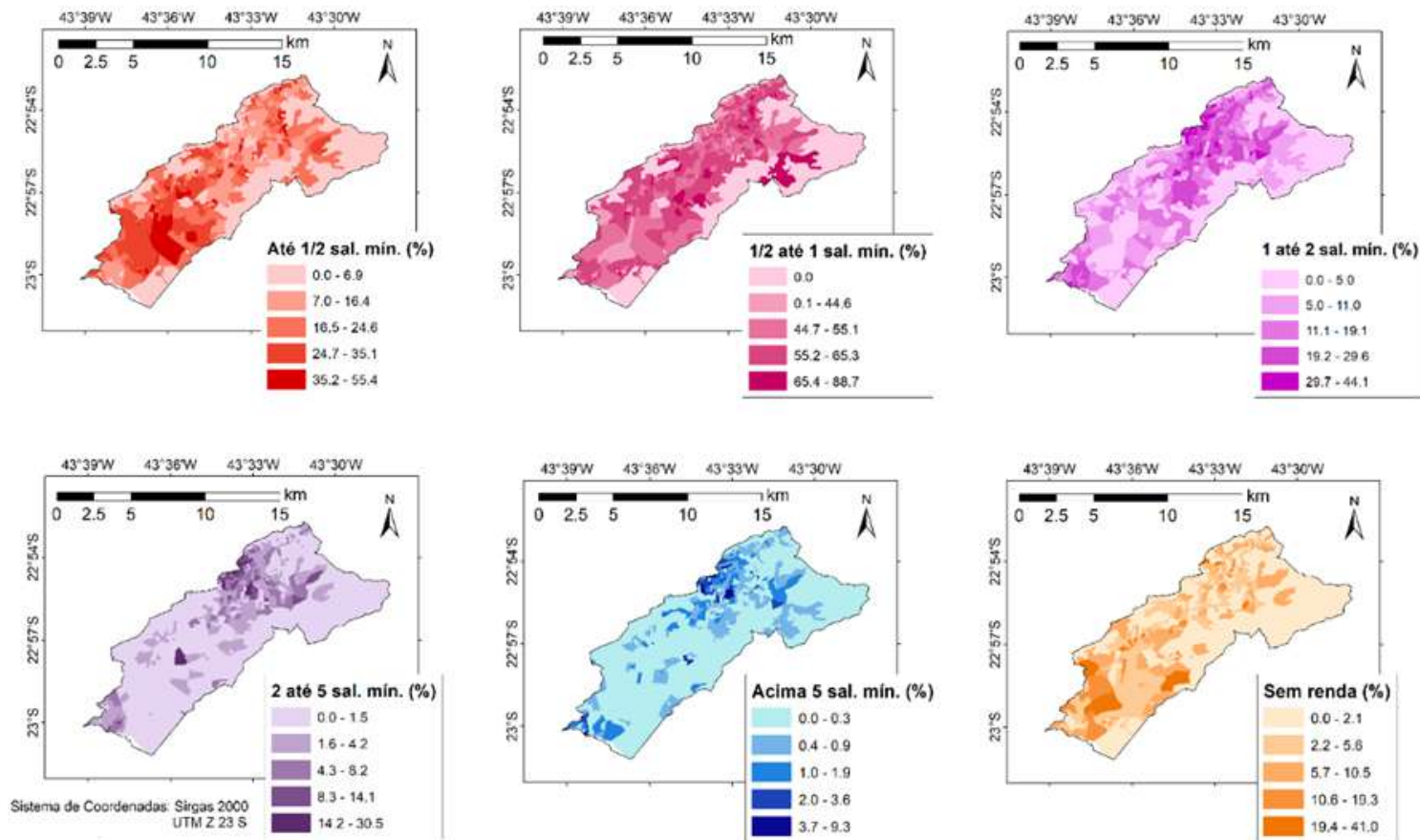


Figura 4.4: Renda per capita dos habitantes da bacia do Rio Pirquê-Cabuçu, de acordo com o Censo 2010.

Fonte: Grupo de planejamento urbano-territorial para incremento da resiliência a inundações.

Conforme ilustrado na Figura 4.4, a maioria dos residentes possui uma renda de até 2 salários-mínimos, e há uma porcentagem significativa de indivíduos sem qualquer fonte de renda. Além disso, observa-se uma tendência à predominância de renda mais baixa na área a jusante, com até 55,4% dos habitantes vivendo com uma renda de até meio salário-mínimo. Em contraste, a concentração de renda mais alta é evidente na região noroeste da bacia, onde o bairro de Campo Grande e o centro comercial estão localizados. Tais dados, embora coletados no Censo de 2010, são capazes de retratar o perfil socioeconômico da região.

4.1.3 Uso e ocupação do solo

Conforme descrito no item 4.1.1, o processo de intensificação da urbanização na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu teve seu início nas décadas de 1940 e 1950, no bairro de Campo Grande, anteriormente dedicado ao cultivo agrícola. Já em Guaratiba, a urbanização foi estimulada principalmente na década de 1960, com a implementação da Avenida das Américas. Esse processo pode ser entendido como resultado da expansão urbana da cidade do Rio de Janeiro, que buscou ampliar suas áreas de influência e infraestrutura, levando à intensificação da ocupação e transformação das paisagens rurais em áreas urbanas.

Considerando a perspectiva apresentada, é possível constatar que a região atraiu uma população que buscava refúgio da alta densidade populacional do centro do Rio de Janeiro. A presença de empresas importantes como a Gerdau e Michelin, além do complexo industrial de Santa Cruz, foram determinantes para o impulsionamento do processo de ocupação na região, nas últimas décadas. Contudo, tal processo ocorreu de forma rápida e desordenada, resultando em diversas áreas de favelização e ocupações irregulares.

Em relação ao bairro de Pedra de Guaratiba, cuja economia é baseada tradicionalmente na atividade pesqueira na Baía de Sepetiba, pode-se afirmar que este sofreu os efeitos da urbanização nas áreas vizinhas. Apesar de apresentar uma população menor, o bairro também passou por um processo desordenado de expansão urbana, resultando em impactos ambientais.

Nesse contexto, de acordo com Ribeiro (2017), a dinâmica socioeconômica local tem estimulado o setor imobiliário, fomentando o crescimento e a expansão urbana. Com base no processo evolutivo mencionado, a Figura 4.5 exibe o mapa de uso do solo e cobertura vegetal na bacia, conforme mapeamento realizado pela Prefeitura em 2016.

É possível observar que em meio à grande área urbana, ainda prevalecem diversas áreas de vegetação nativa na região, principalmente onde o relevo é mais acentuado e nos manguezais. Contudo, também é perceptível que, em meio a essas áreas verdes, especialmente na região do Parque Estadual da Pedra Branca (PEPB), surgem áreas de uso agrícola; existem moradores que residem no Pico da Pedra Branca há mais de três gerações. Essa permanência, conforme argumentado por Fernandez (2009) *apud* Ribeiro (2017), deve-se, em parte, ao fato de esses moradores terem se instalado na região muito antes da criação do Parque e também por serem responsáveis pela preservação ambiental e a proteção de suas fronteiras. No entanto, essa é uma abertura para a ocorrência de impactos ambientais.

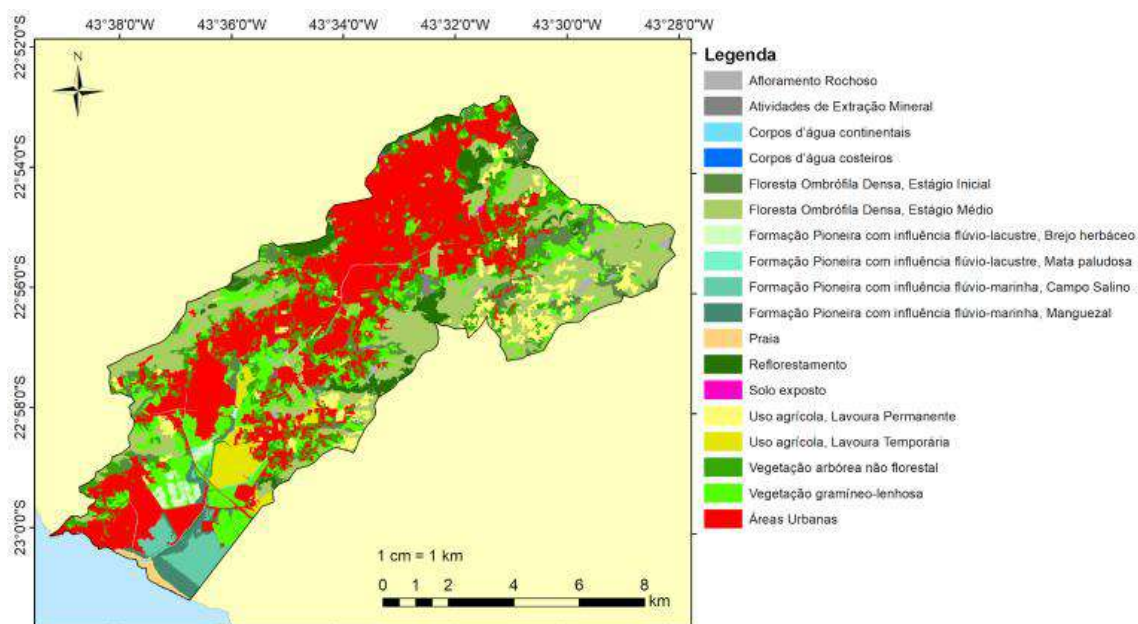


Figura 4.5: Cobertura vegetal e uso das terras na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu segundo monitoramento da Prefeitura do Rio de Janeiro em 2016.

Fonte: Grupo de planejamento urbano-territorial para incremento da resiliência a inundações.

Existem outras áreas na bacia, além daquela destinada à agricultura nas proximidades da cabeceira do Rio da Prata do Cabuçu, que também são utilizadas para fins agrícolas a jusante. Adicionalmente, há áreas dedicadas ao reflorestamento, as quais

fazem parte de uma iniciativa promovida pela Prefeitura do Rio de Janeiro. É importante destacar que a extração mineral é outra atividade realizada na bacia, a qual pode acarretar danos significativos ao ecossistema local. A degradação do solo resultante pode levar ao acúmulo de sedimentos no leito do rio e, conseqüentemente, ao seu assoreamento. Assim, diante deste cenário, é possível identificar algumas áreas críticas.

Como síntese desses dados, pode-se observar a Tabela 4.1, apresentada pelo PDMAP (2012), construída a partir de informações do Instituto Pereira Passos e Rio Águas.

Tabela 4.1: Uso e Ocupação do solo nos bairros da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu

Bairros	Área total do bairro (km²)	Área do bairro na BPC (km²)	% área urbana consolidada	% área urbana não consolidada e comunidades	% áreas de florestas, matas e parques	% área agrícola	% outras áreas
Campo Grande	118,781	50,803	29,08%	43,82%	26,79%	0,00%	0,31%
Senador Vasconcelos	6,407	6,378	43,61%	50,20%	6,19%	0,00%	0,00%
Guaratiba	137,141	43,74	6,49%	40,29%	16,88%	1,49%	34,85%
Pedra de Guaratiba	3,408	2,755	32,64%	55,02%	7,97%	0,00%	4,37%
Senador Camará	13,211	4,359	48,10%	43,10%	19,68%	0,00%	1,26%
Santíssimo	8,598	0,652	38,65%	59,60%	0,77%	0,00%	1,02%
Área total da BPC		108,687					

Fonte: Rio de Janeiro – PDMAP (2012)

Em relação às áreas urbanizadas da bacia, é possível direcionar a atenção para as ocupações irregulares e favelas, que são regiões mais vulneráveis e que carecem de planejamento urbano e de redes de infraestrutura. Na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, conforme ilustrado na Figura 4.6, a problemática dessas ocupações é ainda mais crítica, uma vez que uma parte delas está situada em áreas de proteção ambiental, gerando impactos extremamente prejudiciais aos ecossistemas. A maior área em vermelho, apresentada no trecho da unidade de paisagem da Figura 4.6, refere-se ao loteamento Jardim Maravilha, o qual, como já mencionado, sofre com inundações frequentes.

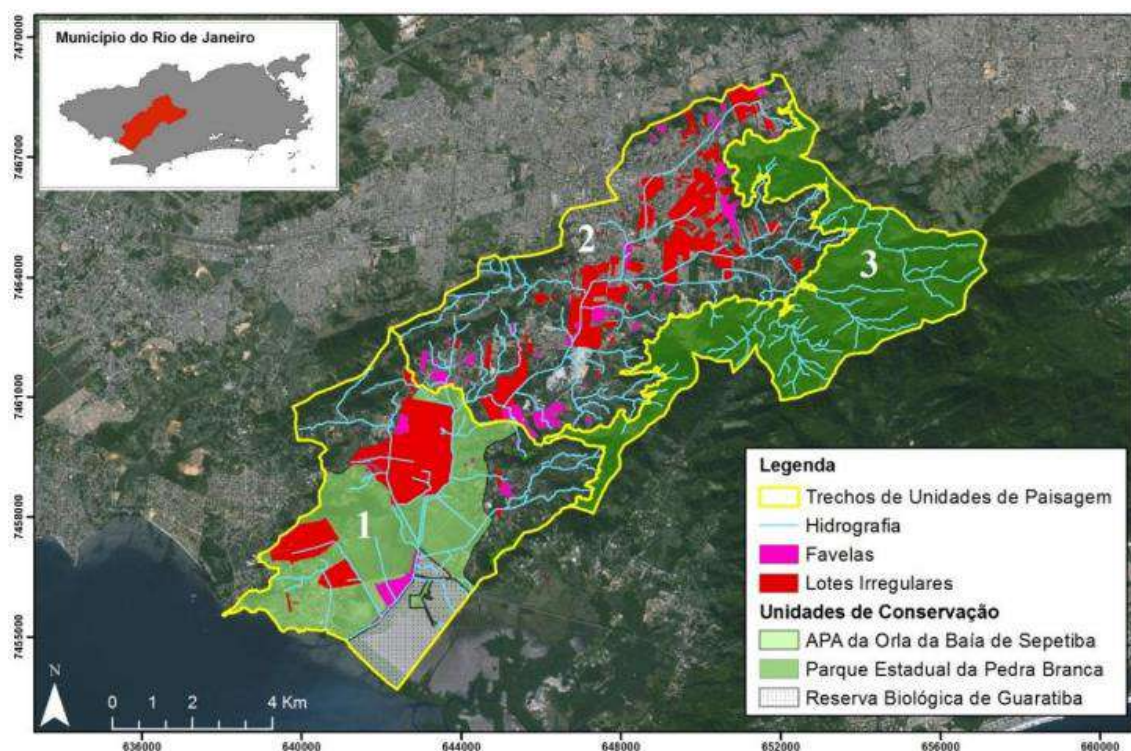


Figura 4.6: Áreas protegidas e Ocupações irregulares dentro dos trechos de unidades de paisagem.

Fonte: Ribeiro (2017)

4.1.4 Hidrografia

A nascente do Rio Piraquê-Cabuçu localiza-se na Serra do Lameirão, dentro do Parque Estadual da Pedra Branca. A vertente norte origina-se no bairro de Senador Camará, através do curso do Rio Cabuçu, enquanto a vertente sul tem início pelo curso do Rio da Prata do Cabuçu. A partir da confluência desses dois cursos, o rio flui pelo bairro de Campo Grande e atravessa Guaratiba, sendo denominado Piraquê a partir desse ponto, desembocando finalmente na Baía de Sepetiba.

O Rio Piraquê-Cabuçu é alimentado por múltiplos afluentes ao longo de seu curso, e o PDMAP (2012) apresenta uma tabela (vide Tabela 4.2: **Principais sub-bacias do Rio Piraquê-Cabuçu**) com as principais sub-bacias, suas áreas de drenagem e extensão de seus talvegues. A distribuição geográfica dessas subdivisões ao longo da bacia pode ser visualizada na Figura 4.7.

Tabela 4.2: Principais sub-bacias do Rio Piraquê-Cabuçu

Sub-bacia	Área (km ²)	Extensão do Talvegue principal (km)
Rio Cabuçu, a montante da confluência com o Rio Cabuçu Mirim	9,8	6,825
Rio Cabuçu Mirim	2,25	3,080
Rio da Prata do Cabuçu	30,48	12,121
Rio Cantagalo	4,08	4,385
Rio da Chacrinha	5,59	4,816
Rio Consulado	1,9	1,946
Rio dos Porcos	8,31	5,635
Valão das Cinzas	8,608	6,725
Rio Piraquê-Cabuçu	110,56	21,834

Fonte: Rio de Janeiro – PDMAP, 2012

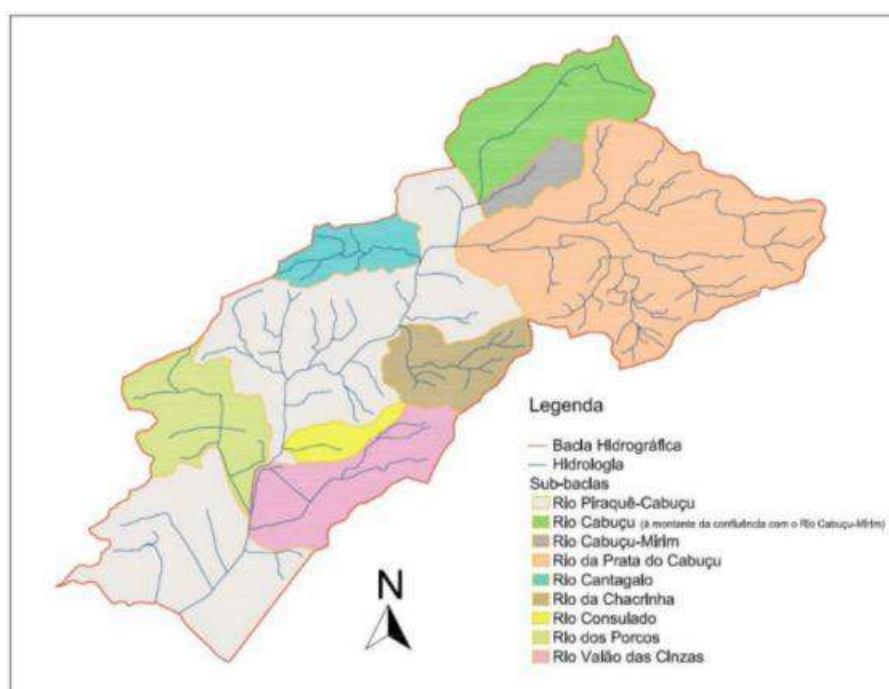


Figura 4.7: Principais sub-bacias da Bacia Hidrográfica do rio Piraquê-Cabuçu.

Fonte: Rio de Janeiro – PDMAP (2012) adaptado de RIBEIRO (2017).

Conforme descrito pelo PDMAP (2012), o rio Piraquê-Cabuçu pode ser subdividido em três trechos principais, a saber: Piraquê-Cabuçu Superior, Médio Piraquê-Cabuçu e Piraquê-Cabuçu Inferior, conforme representado na Figura 4.8.

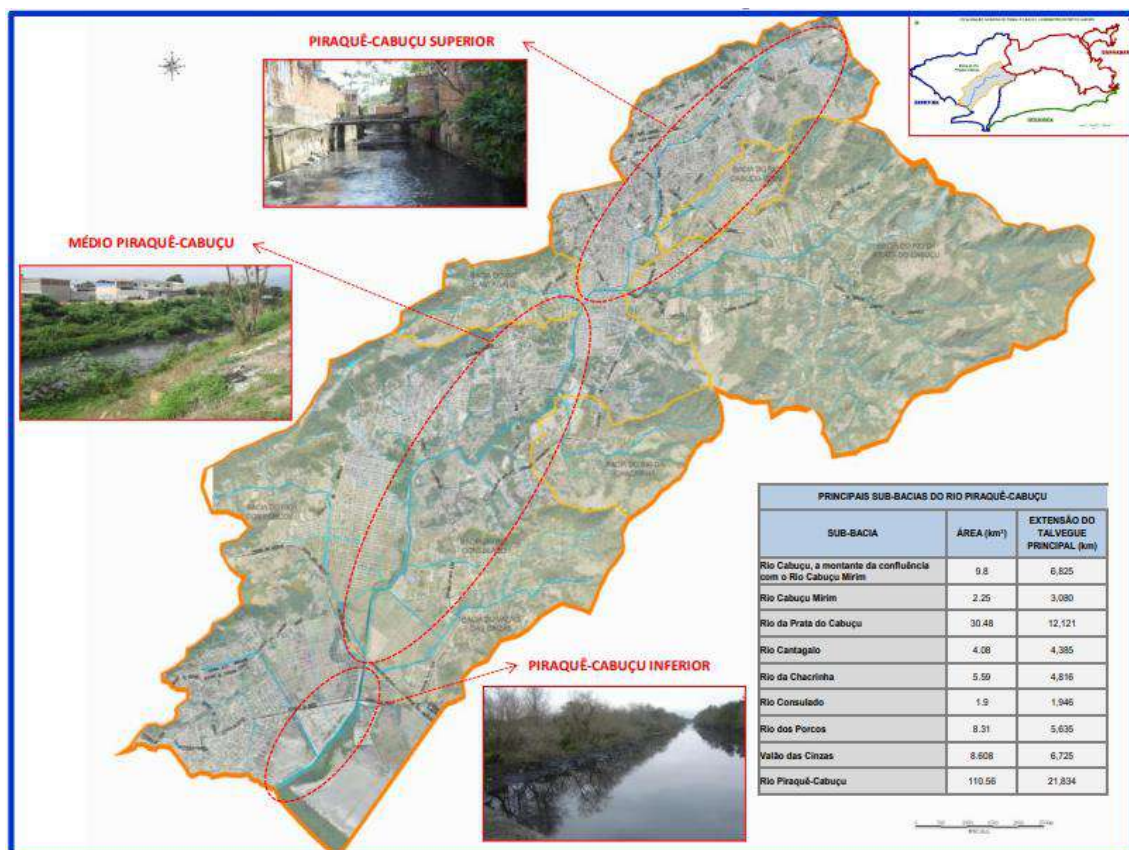


Figura 4.8: Divisão em trechos do Rio Piraguê-Cabuçu.

Fonte: Rio de Janeiro – PDMAP (2012).

O primeiro trecho, denominado superior, abrange as nascentes dos rios Cabuçu, Cabuçu Mirim e Prata do Cabuçu. Esse trecho apresenta urbanização consolidada, com edificações regulares nas margens e vias públicas acompanhando o curso do rio. Ademais, ao longo de quase toda a sua extensão, o escoamento é realizado por meio de canais de concreto. A região mais bem conservada quanto à ocupação humana encontra-se, sobretudo, nas cabeceiras do Rio da Prata do Cabuçu. De forma geral, nesse trecho, existem déficits de capacidade do sistema hidráulico ao longo de quase toda a extensão do trecho urbanizado.

O segundo trecho do rio, denominado médio, compreende as sub-bacias dos Rios Cantagalo, Chacrinha, Consulado e dos Porcos. É uma região em expansão urbana, caracterizada por múltiplos pontos de ocupação desordenada, que resultaram na supressão da mata ciliar. Destaca-se a área do sub-bairro Jardim Maravilha, que sofre frequentes inundações. O escoamento do rio, no trecho médio, ocorre predominantemente em seção natural, com vegetação ciliar preservada em suas margens. Há o alagamento natural do

leito maior, ocasionando inundações nas áreas marginais ocupadas e déficits de capacidade do sistema hidráulico ao longo de toda a extensão do trecho urbanizável.

Por último, o trecho inferior é composto pela sub-bacia do Rio Valão das Cinzas e pelo Canal do Jardim-Garrido, apresentando um curso em seção natural com baixas declividades, características de regiões de desembocadura. Em suas margens, pode-se encontrar, predominantemente, vegetação de mangue, mais preservada na margem esquerda, onde se localiza a Reserva Biológica, e com áreas invadidas na margem direita, que são periodicamente afetadas por inundações e possuem pontos de expansão. Nesse trecho, o alagamento das áreas de manguezal em ambas as margens do rio é um fenômeno natural, ocasionado tanto pelo afluxo de vazões de montante quanto pelos efeitos das marés provenientes da Baía de Sepetiba. Esse processo resulta em inundações periódicas nas áreas invadidas do Jardim Garrido.

5 Resultados

5.1 Aplicação do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico v2.0 (ISMFlv2.0)

O mapeamento do indicador de declividade para drenagem (I_{DEC}), ilustrado na Figura 5.1, foi capaz de representar com rigor as variações de declividade. O resultado mostra a alta declividade da área de proteção ambiental do Parque Estadual da Pedra Branca, a montante da bacia. As áreas de menores declividades podem ser observadas, por exemplo, a jusante da bacia, próximo à área de mangue da Baía de Sepetiba e nas regiões ribeirinhas ao longo do curso do rio, aonde a população mais se concentra.

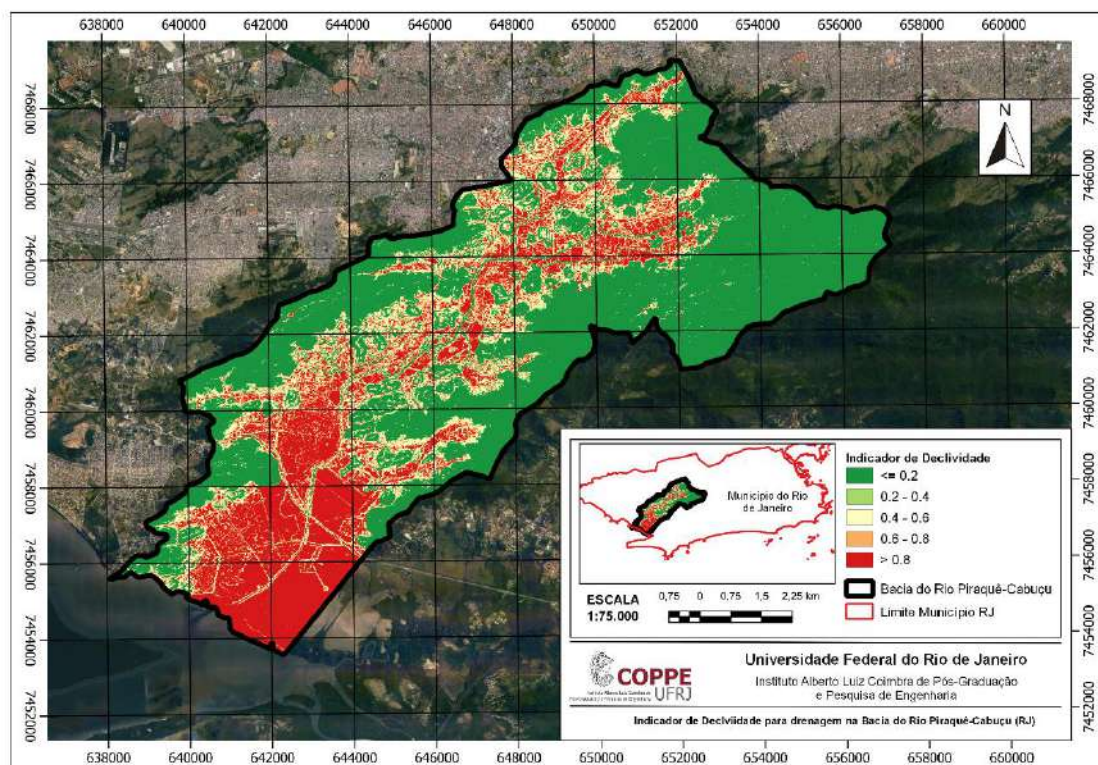


Figura 5.1: Mapa com distribuição espacial do indicador de declividade para drenagem (I_{DEC})

A partir do mapa da Figura 5.2, pode-se observar que o indicador de cota altimétrica identificou as áreas sujeitas às variações sazonais de maré da Baía de Sepetiba.

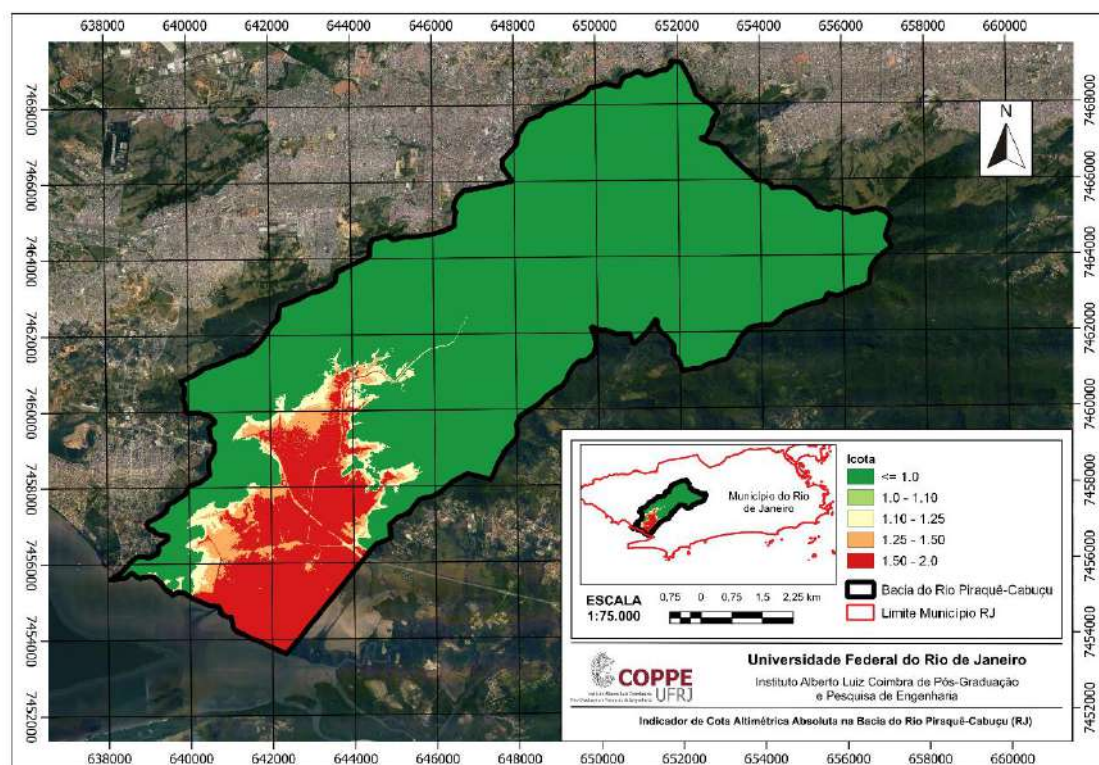


Figura 5.2: Mapa com distribuição espacial do indicador de cota altimétrica absoluta (Icota)

Analisando o mapa do indicador de proximidade de curso d'água, ilustrado na Figura 5.3, pode-se notar que, de maneira geral, foi possível uma boa representação das planícies de inundação e seus cursos d'água.

Vale observar que a região do Jardim Maravilha e da Favela do Jardim Garrido, que possui grande histórico de eventos de inundação, são áreas em que todo o seu entorno possui os maiores valores do indicador. A região de baixada, de forma geral, como a área de mangue da Baía de Sepetiba, que é uma região naturalmente inundável também pôde ser bem representada pelo indicador.

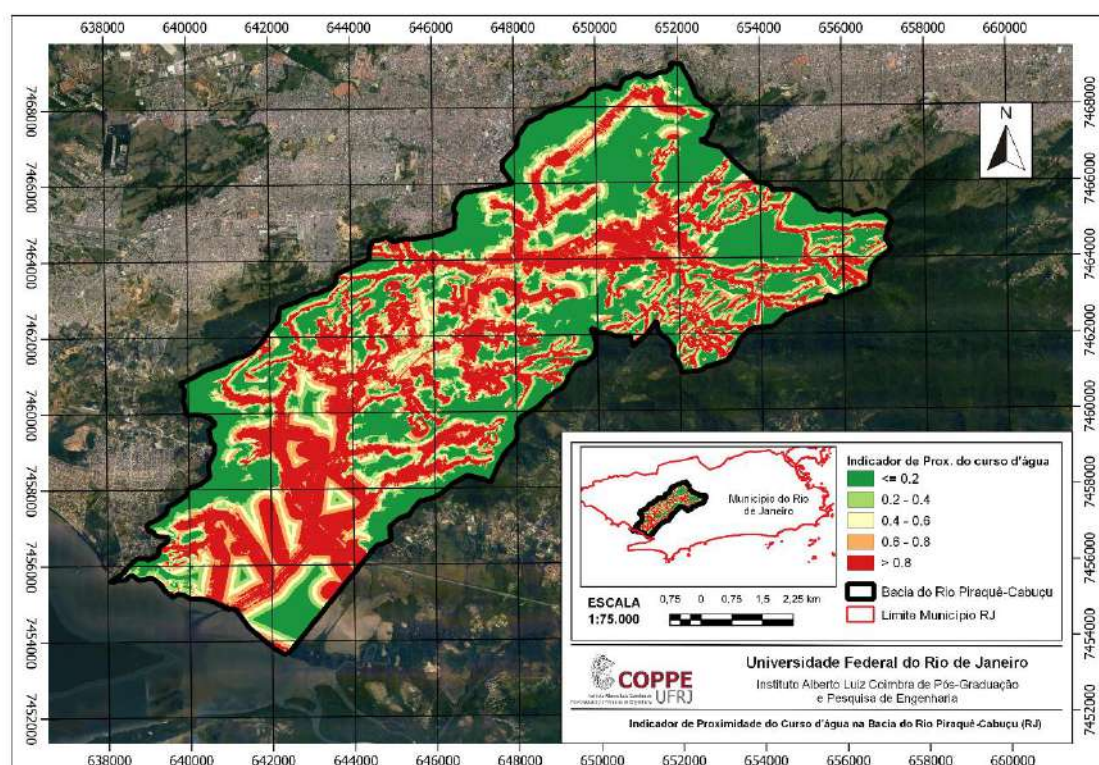


Figura 5.3: Mapa com distribuição espacial do indicador de proximidade de curso d'água (Iprox)

Para construção do I_{IMP} utilizou-se do Mapa de Uso e Ocupação do Solo do Município do Rio de Janeiro do ano de 2016 disponibilizado na plataforma Armazém de Dados do Instituto Pereira Passos (IPP), conforme ilustrado no mapa da Figura 4.5.

O Indicador de Impermeabilização do Solo tem por finalidade representar e hierarquizar áreas com diferentes tipos de uso do solo quanto ao grau de impermeabilização, permitindo inferir sobre sua capacidade de interceptação, retenção e infiltração dos volumes precipitados e, consequentemente, seu potencial de geração e acúmulo de volumes escoados superficialmente. A Tabela 5.1 apresenta as faixas de classes do I_{IMP} .

Tabela 5.1: Faixas de classes de impermeabilização do solo e Coeficiente de *Runoff*.

Classes	Especificações	Coeficiente de <i>Runoff</i>
Afloramento Rochoso	-	0.9
Atividades de Extração Mineral	-	0.6
Corpos d'água continentais	-	1

Corpos d'água costeiros	-	1
Floresta Ombrófila Densa	Declive baixo	0.45
	Declive médio	0.25
	Declive alto	0.3
Formações Pioneiras	-	0.25
Praia	-	0.05
Reflorestamento	-	0.35
Solo exposto	Declive baixo	0.2
	Declive alto	0.3
Uso agrícola	Declive baixo	0.25
	Declive alto	0.4
Vegetação arbórea não florestal	Declive baixo	0.25
	Declive médio	0.32
	Declive alto	0.4
Vegetação gramíneo-lenhosa	Declive baixo	0.15
	Declive alto	0.35
Áreas Urbanas	Baixa densidade com espaços verdes	0.4
	Média densidade com alguns espaços verdes	0.6
	Alta densidade com nenhum ou poucos espaços verdes	0.8

A Figura 5.4 mostra o mapeamento resultante para o grau de impermeabilização da região, em função dos diferentes usos do solo existentes na Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu.

Notam-se valores próximos do máximo do indicador de impermeabilização justamente nas áreas onde existe maior concentração urbana. A principal região, com os maiores valores do indicador, é a região a montante da bacia, onde já existe uma urbanização consolidada, principalmente no bairro de Campo Grande. De forma similar, mas em menor grau, ocorre o mesmo na região a jusante da bacia, com destaque para as regiões do sub-bairro do Jardim Maravilha e a Favela do Jardim Garrido.

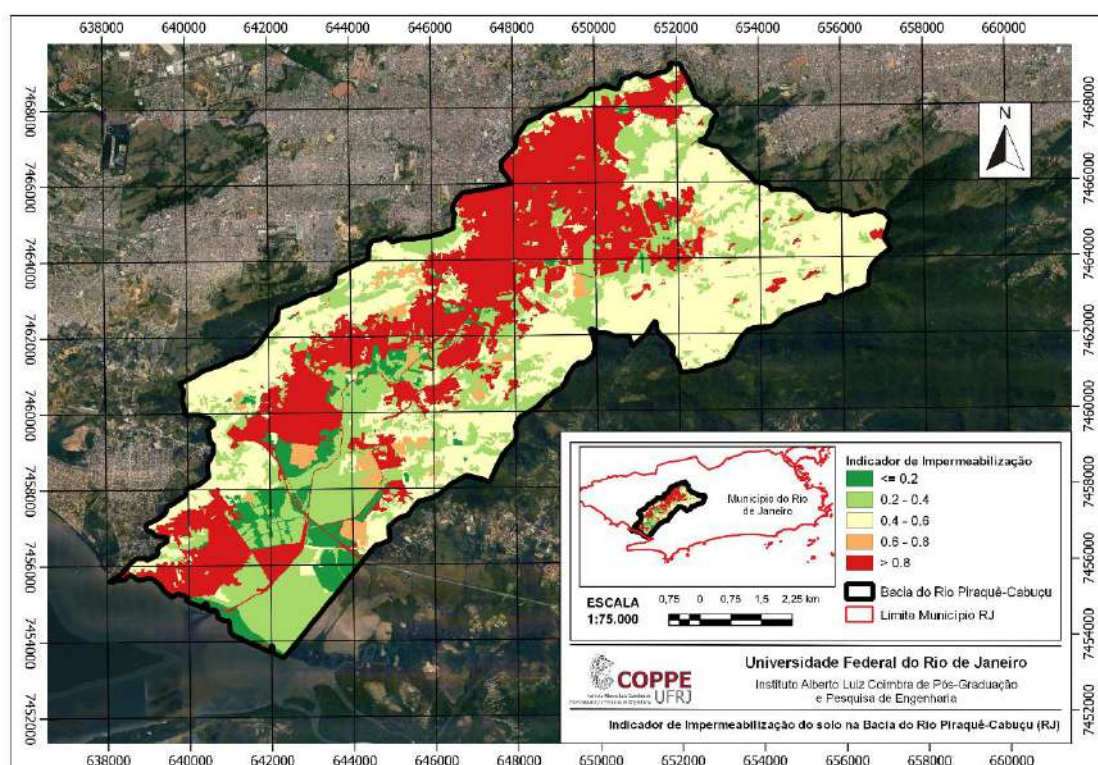


Figura 5.4: Mapa com distribuição espacial do indicador impermeabilização do solo (IIMP)

Para o mapeamento do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0, a escolha para a composição dos pesos é feita já tomando como base o estudo de MIRANDA (2016). Entretanto, também foram realizados testes de sensibilidade para verificar a melhor escolha do peso, conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Testes de sensibilidade dos pesos adotados na composição do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0 (ISMFI v2.0)

Descrição	<i>n1</i>	<i>p1</i>	<i>p2</i>	<i>n2</i>
Teste 1	0.5	0.5	0.5	0.5
Teste 2	0.5	0.5	0.33	0.67
Teste 3	0.5	0.5	0.67	0.33
Teste 4	0.67	0.33	0.5	0.5
Teste 5	0.67	0.33	0.33	0.67
Teste 6	0.67	0.33	0.67	0.33

Teste 7	0.33	0.67	0.5	0.5
Teste 8	0.33	0.67	0.67	0.33
Teste 9	0.4	0.6	0.6	0.4
Teste 10	0.6	0.4	0.6	0.4

A priori, percebe-se que faria mais sentido pesar o indicador de proximidade de curso d'água do que o indicador de impermeabilização do solo, uma vez que a proximidade do curso d'água afeta bem mais que apenas a impermeabilização. A partir dessa análise, pode-se inferir também que o indicador de declividade deve ser o mais pesado e não a soma dos indicadores de proximidade e impermeabilização, com isso, a distribuição de pesos para o ISMFI v2.0 fica detalhada conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Pesos adotados na composição do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0 (ISMFI v2.0)

Descrição	<i>n1</i>	<i>p1</i>	<i>p2</i>	<i>n2</i>
Peso	0.6	0.4	0.6	0.4

Portanto, a Equação $ISMFI\ v2.0 = [I_{DEC}^{n1} \cdot (p1 \cdot I_{IMP} + p2 \cdot I_{PROX})^{n2}] \cdot I_{COTA}$ (3.1) passa a ser expressa pela Equação $ISMFI\ v2.0 = [I_{DEC}^{0.6} \cdot (0.4 \cdot I_{IMP} + 0.6 \cdot I_{PROX})^{0.4}] \cdot I_{COTA}$ (5.1), já com a combinação de pesos adotados para cada indicador.

$$ISMFI\ v2.0 = [I_{DEC}^{0.6} \cdot (0.4 \cdot I_{IMP} + 0.6 \cdot I_{PROX})^{0.4}] \cdot I_{COTA} \quad (5.1)$$

A escolha de um peso mais alto para os indicadores de declividade e proximidade do curso d'água deve-se, por, pragmaticamente, não ocorrer inundações onde a declividade é mais alta, e que as inundações de rios e canais são mais intensas que os alagamentos por falhas de microdrenagem e retenções locais. O mapeamento do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações é ilustrado na Figura 5.5.

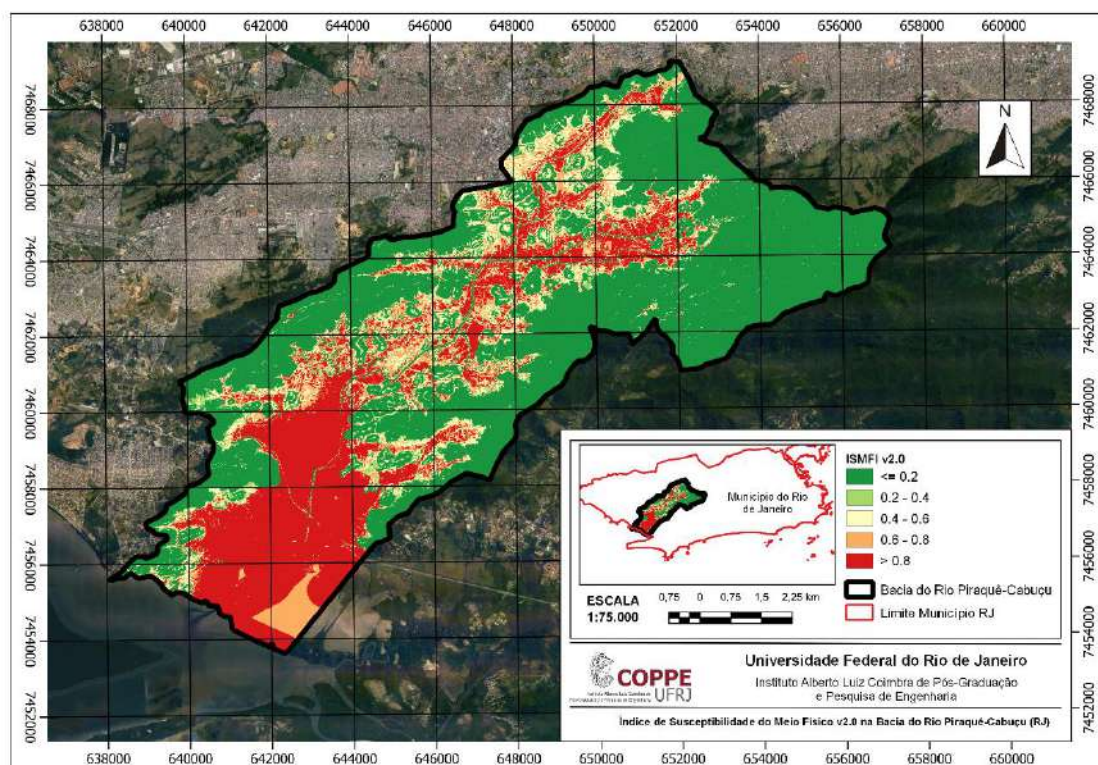


Figura 5.5: Mapa com distribuição espacial do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0 (ISMFI v2.0)

A partir da análise do mapeamento do ISMFI v2.0 podem ser observados valores superiores a 0.8 ao longo de todo o curso do rio na bacia, indicando um alto nível de susceptibilidade na região.

A montante da bacia, valores próximos do máximo podem ser observados devido a uma combinação entre proximidade do curso d'água e impermeabilização. A jusante da bacia, a região é muito mais crítica, com a concorrência simultânea de todos os fatores do ISMFI.

A Figura 5.6 ilustra a comparação do mapeamento do ISMFI v2.0 com os locais de inundação mapeados pela Rio-Águas, pelo Plano Diretor de 2012. Pode-se perceber, a partir da imagem, uma validação do índice, uma vez que todos os locais com registros de inundação (referentes a locais ocupados) são cobertos pela mancha crítica do índice. Áreas não ocupadas não geram registros, o que impede a confirmação espacial completa, mas estas áreas desocupadas que foram identificadas como críticas devem merecer atenção especial no planejamento do desenvolvimento urbano da região. Observam-se

apenas alguns pontos isolados a montante da bacia, onde a susceptibilidade varia entre 0.6 e valores maiores que 0.8, em contrapartida, na região a jusante, onde a região é indicada como mais crítica pelo índice, existem mais locais com inundação registrada.

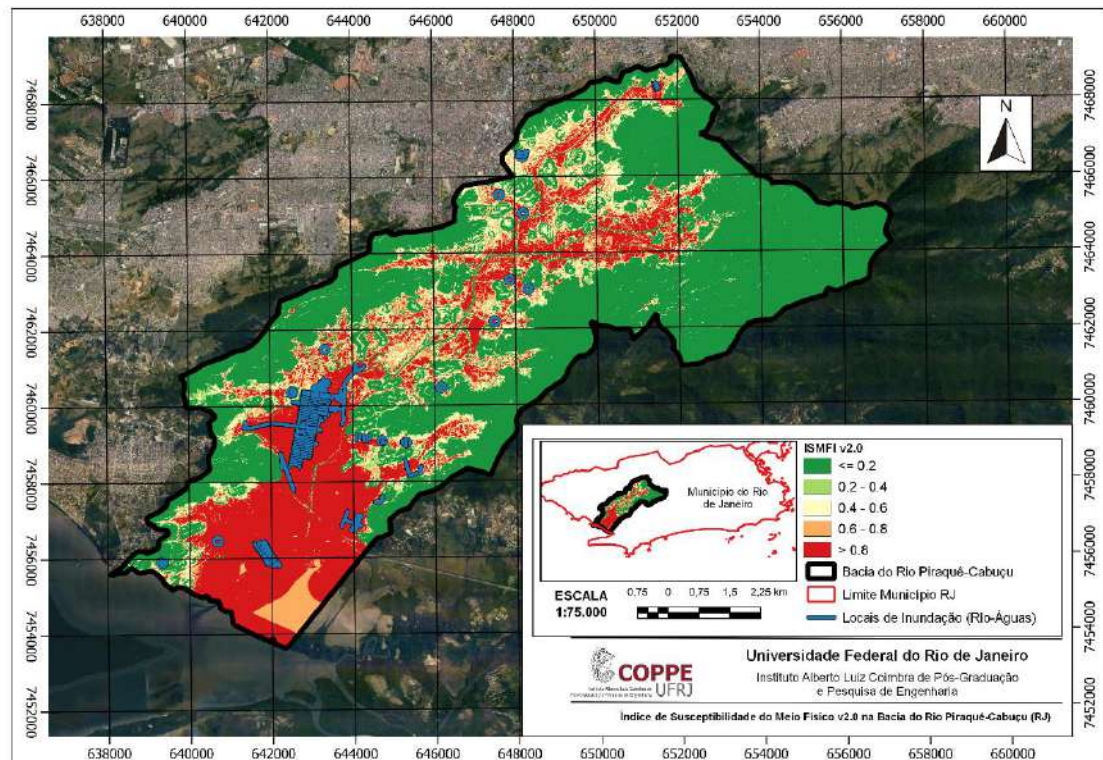


Figura 5.6: Mapa com distribuição espacial do ISMFI v2.0 em comparação com os Locais de Inundação da Rio-Águas.

5.2 Aplicação do Índice de Vulnerabilidade (IV)

A partir dos mapas ilustrados na Figura 5.7, é possível observar que o indicador de exposição de edificações e de exposição de infraestrutura urbana indicam uma maior vulnerabilidade mais a montante da bacia, onde existe maior concentração urbana e, consequentemente, mais serviços de infraestrutura e edificações expostos. Essa região compreende, em grande parte, os bairros de Campo Grande e Guaratiba, que já possuem um processo de urbanização consolidado. As regiões do sub-bairro do Jardim Maravilha e a Favela do Jardim Garrido, a jusante da bacia, aparecem também como duas regiões com os valores dos indicadores acima de 0.8, expondo uma grande parcela de

vulnerabilidade destas regiões, que é, em sua maior parte, tomada por ocupações irregulares e descontrolado no crescimento urbano.

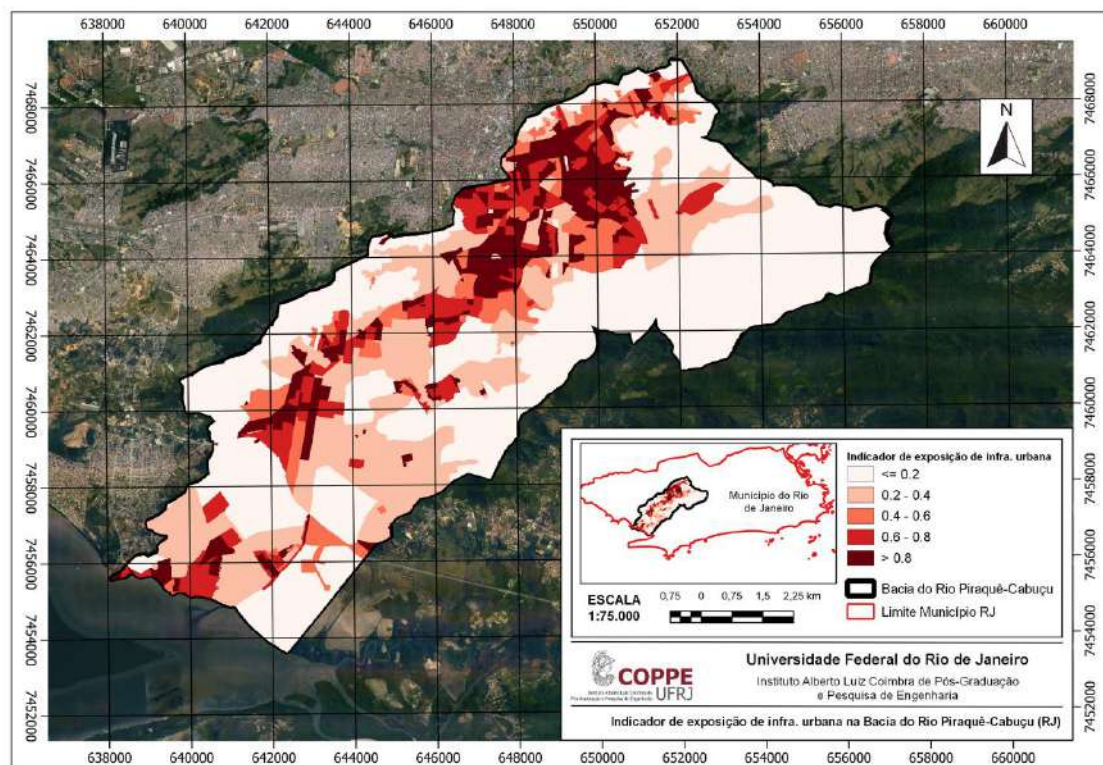
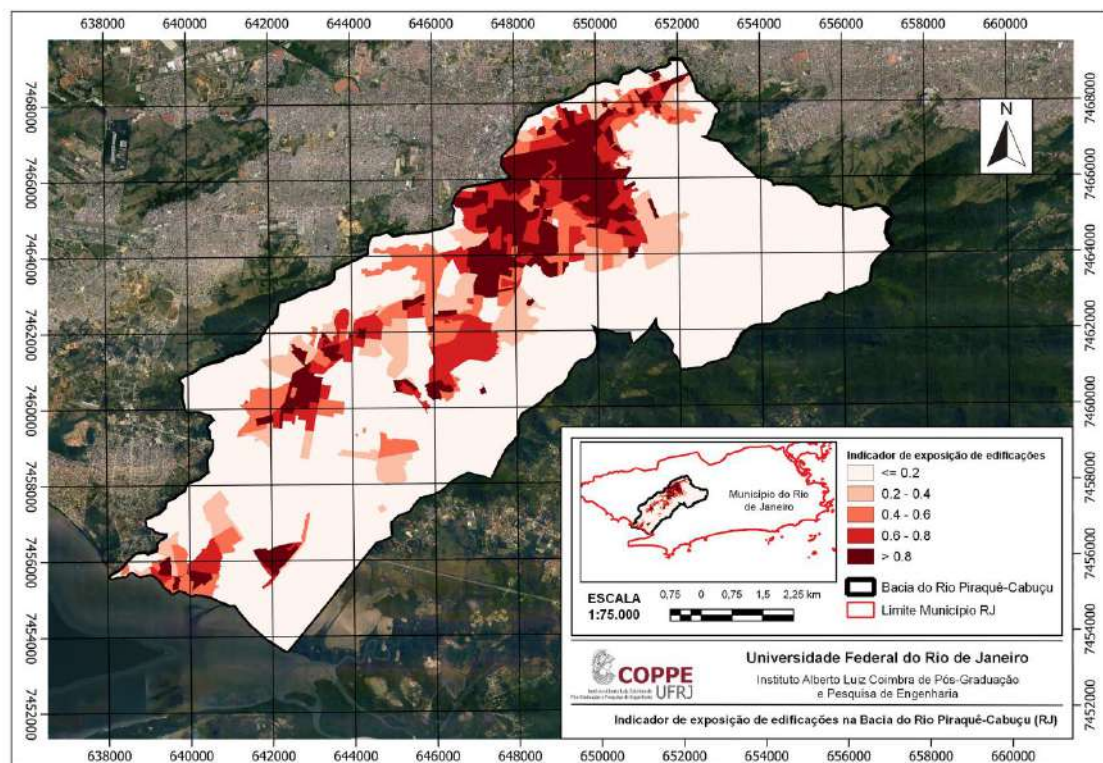


Figura 5.7: Mapas com distribuição espacial dos indicadores de exposição de edificações (I_e) e de infraestrutura urbana (I_{ei}).

Analisando o indicador de susceptibilidade, ilustrado na Figura 5.8, verifica-se valores próximos de 1 em toda a bacia, indicando que as edificações na bacia são pouco verticalizadas. O fato das edificações serem, em grande parte, pouco verticalizadas expõe mais pessoas e bens a eventos de cheia. O segundo mapa da Figura 5.8 apresenta a espacialização do indicador de pessoas vulneráveis, que representa a propensão de um determinado grupo mais frágil de pessoas que podem sofrer danos durante um evento de inundação.

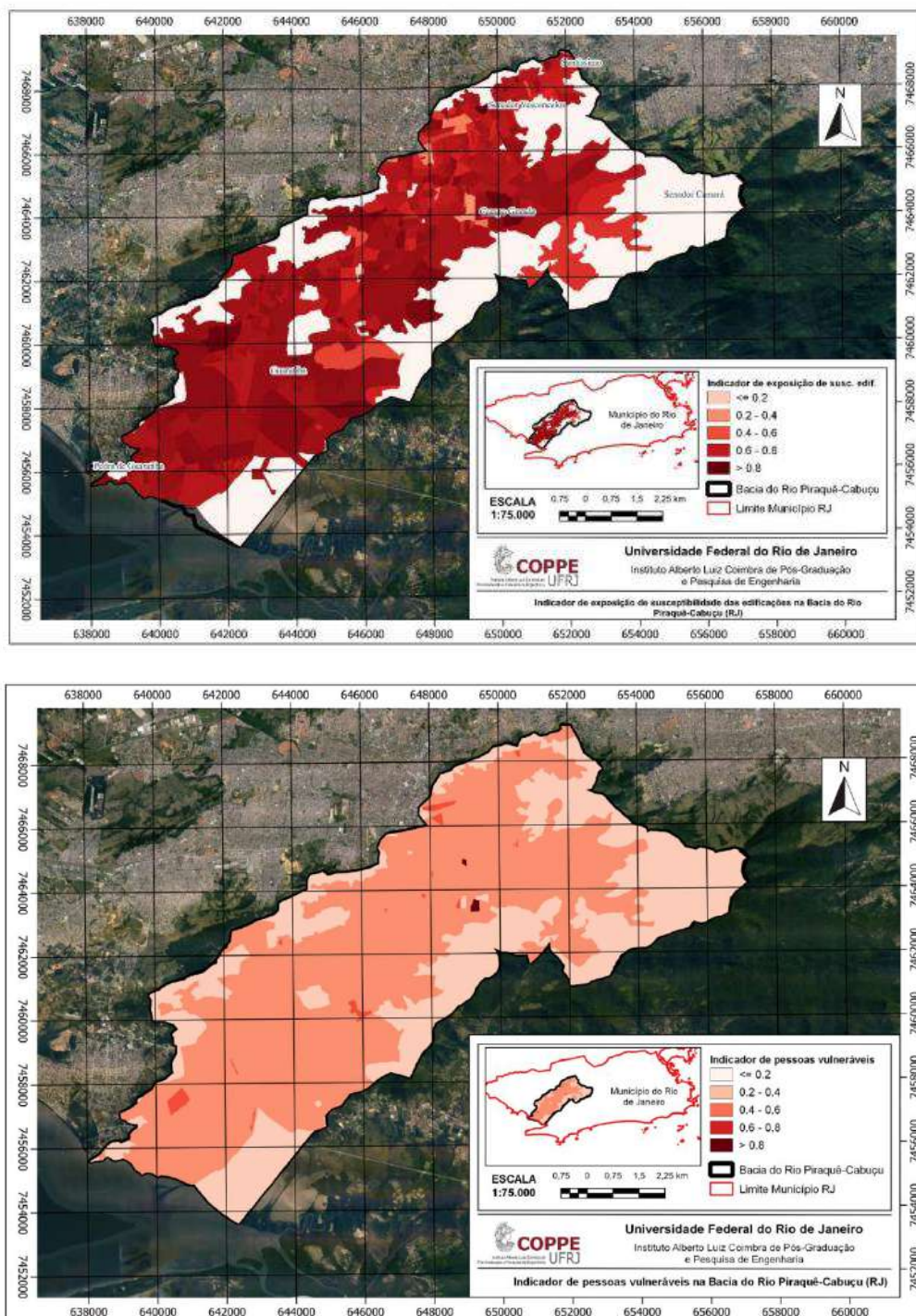


Figura 5.8: Mapas com distribuição espacial dos indicadores de susceptibilidade das edificações (I_s) e de pessoas vulneráveis (I_{pv}).

Analisando os mapas da Figura 5.9, pode-se observar que o indicador de hierarquia viária ilustra ligações entre os centros de alcance metropolitanos e as ligações entre estes e as vias de hierarquia superior (estruturais). Além disso, ao observar o indicador de renda familiar, pode-se verificar rendas mais altas a jusante da bacia, na região costeira e alguns pontos da região mais a montante indicam renda mais baixa. Este indicador tem uma análise importante no que tange à vulnerabilidade; afinal, indica indiretamente o poder de recuperação das vítimas de eventos de inundação.

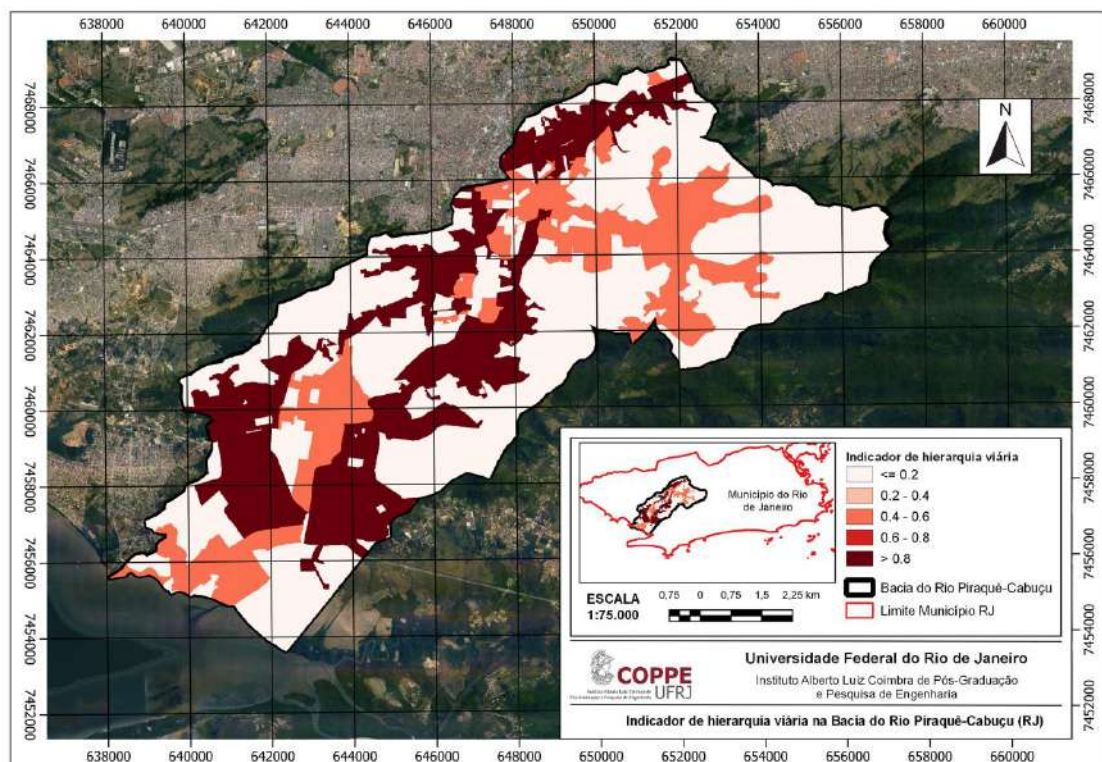
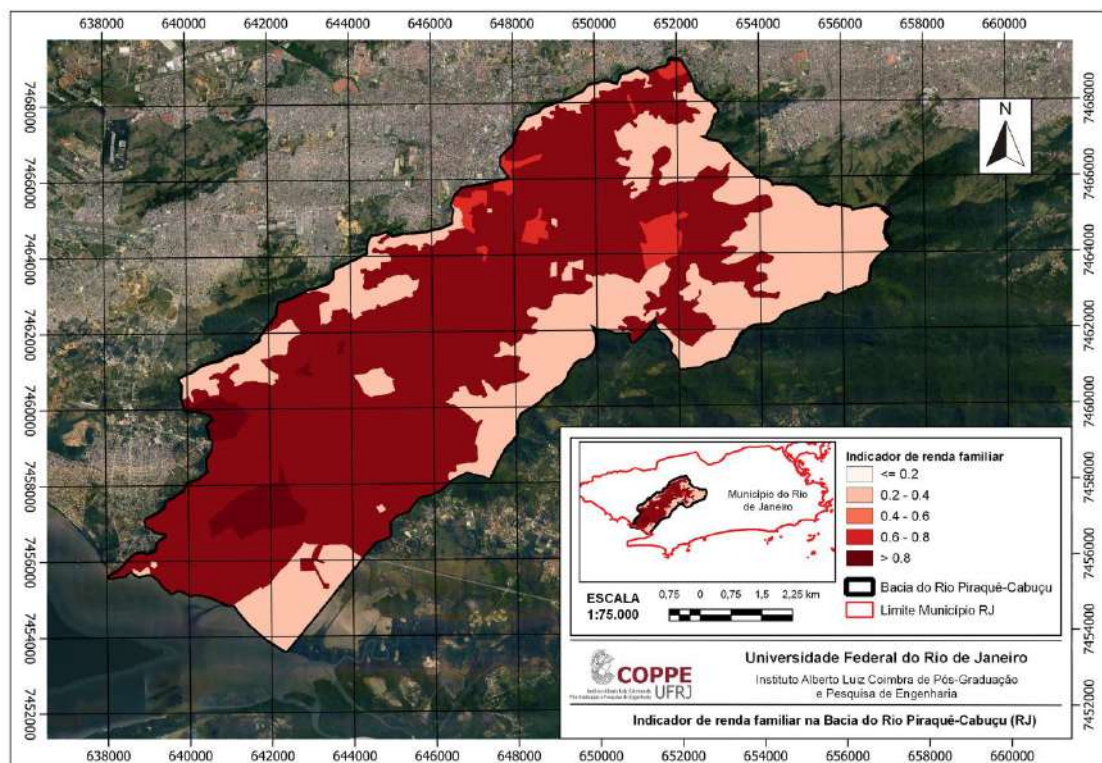


Figura 5.9: Mapas com distribuição espacial dos indicadores de renda familiar (I_r) e de hierarquia viária (I_{hv}).

Observando o mapa da Figura 5.10, é possível notar que ele se comporta como um complemento do indicador de exposição de infraestrutura urbana (ilustrado na Figura 5.7); afinal, as regiões que estão mais distantes dos centros urbanos, isto é, longe da infraestrutura urbana, possuem maior dificuldade de acesso à abrigo. É possível observar que existe uma maior concentração de escolas a montante da bacia; portanto, maior abrangência no raio de acesso a possíveis abrigos. O mesmo ocorre, em menor grau, no trecho médio e a jusante da bacia.

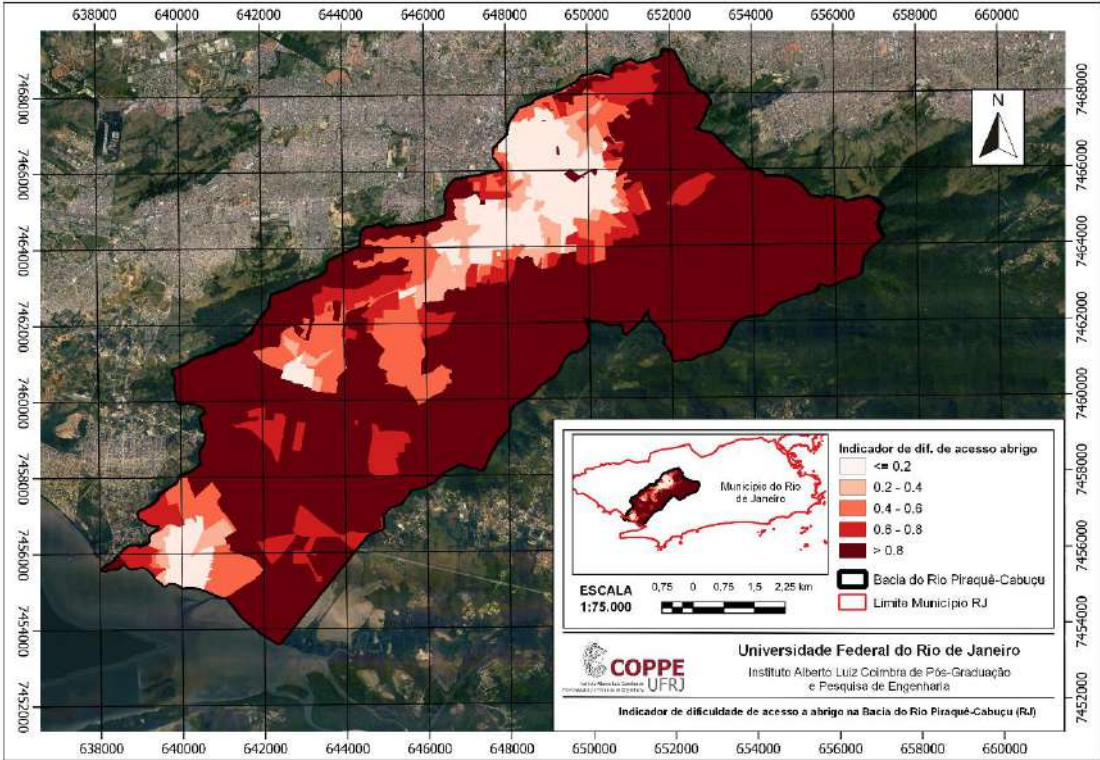


Figura 5.10: Mapa com distribuição espacial do indicador de dificuldade de acesso a abrigo (I_{da}).

Para o mapeamento do Índice de Vulnerabilidade, a escolha para a composição dos pesos é apoiada no estudo de Moreira e Kobiyama (2021), onde é realizada uma análise sobre os indicadores de vulnerabilidade às inundações mais empregados no Brasil. Os valores adotados para cada peso são ilustrados na Tabela 5.3: **Pesos adotados na composição do Índice de Vulnerabilidade (IV)**

Tabela 5.3: Pesos adotados na composição do Índice de Vulnerabilidade (IV)

Descrição	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>n1</i>	<i>n2</i>
-----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------

Peso	0,25	0,10	0,30	0,05	0,25	0,05	0,6	0,4
-------------	------	------	------	------	------	------	-----	-----

Portanto, a Equação $IV = a \cdot (I_e^{n1} \cdot I_s^{n2}) + (b \cdot I_{pv} + c \cdot I_R) + d \cdot I_{hv} + e \cdot I_{ei} + f \cdot I_{da}$ (3.3) passa a ser vista da forma como expressa pela Equação

$IV = 0.25 \cdot (I_e^{0.6} \cdot I_s^{0.4}) + (0.1 \cdot I_{pv} + 0.3 \cdot I_R) + 0.05 \cdot I_{hv} + 0.25 \cdot I_{ei} + 0.4 \cdot I_{da}$ (5.2), já com a distribuição dos pesos adotados para cada indicadores.

$$IV = 0.25 \cdot (I_e^{0.6} \cdot I_s^{0.4}) + (0.1 \cdot I_{pv} + 0.3 \cdot I_R) + 0.05 \cdot I_{hv} + 0.25 \cdot I_{ei} + 0.4 \cdot I_{da} \quad (5.2)$$

Destaca-se que a escolha de um peso maior para o indicador de renda se deveu pela importância de análise da vulnerabilidade econômica dos habitantes, uma vez que uma população com menor poder aquisitivo tende a ter uma recuperação mais lenta após o desastre. Além disso, foram adotados pesos iguais e relevantes para as parcelas referentes, respectivamente, aos indicadores de exposição de infraestrutura e susceptibilidade das edificações, indicando uma atenção maior aos danos às edificações e as infraestruturas do sistema urbano, que afetam diretamente a população. Destaca-se, porém, que esta escolha de pesos é passível de alteração, conforme caso em estudo e interesses de gestores, stakeholders e comunidade local. O objetivo aqui é apenas oferecer uma alternativa, dentre várias possíveis, para fins de avaliação de funcionamento da metodologia proposta.

O mapeamento resultante da aplicação do Índice de Vulnerabilidade é ilustrado na Figura 5.11.

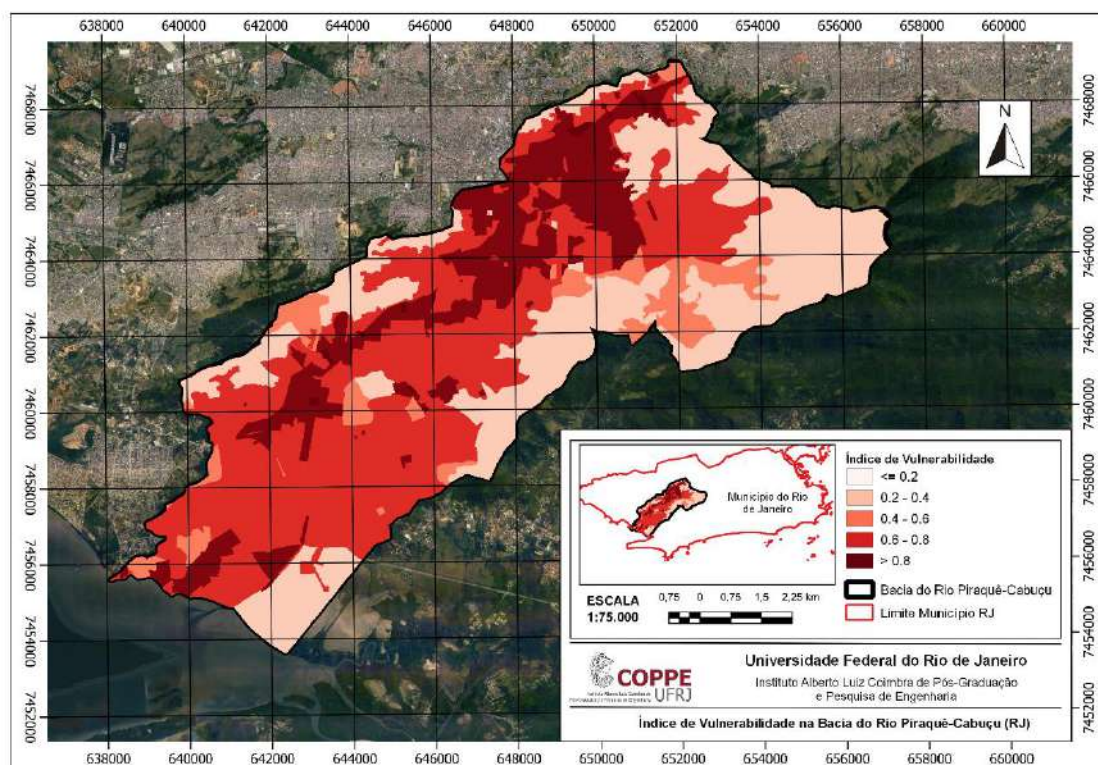


Figura 5.11: Mapa com distribuição espacial do Índice de Vulnerabilidade (IV)

A partir do mapeamento da vulnerabilidade, pode-se notar uma concentração maior de áreas críticas a montante da bacia, justamente na região onde a urbanização é mais consolidada e existe, consequentemente, um número maior de pessoas (que podem ser atingidas por eventos de inundação) e infraestruturas expostas.

Além disso, nota-se também uma parcela significativa de vulnerabilidade na região do Jardim Maravilha, a jusante da bacia, onde houve forte expansão urbana induzida pelo poder público desde a década de 50, sem, porém, ter havido apropriados investimentos em infraestrutura e controle sobre as formas de ocupação do solo. É preciso um destaque também para a região da Favela do Jardim Garrido, também a jusante da bacia, onde os padrões de ocupação são, em geral, irregulares, às margens do rio e, em relação a estrutura física e ambiental, já é uma região naturalmente alagável por conta da área de mangue próxima a esta região.

5.3 Aplicação do Índice de Risco Potencial de Inundações (IRPI)

O mapeamento do Índice de Risco Potencial de Inundações (IRPI) na Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, conforme ilustrado na Figura 5.12, reverbera as análises feitas a partir de cada um dos indicadores dos subíndices que compõem este índice ao longo do estudo. Isto é, as regiões especificadas como críticas por diversos indicadores (Jardim Maravilha e Favela do Jardim Garrido, ambas a jusante da bacia), apresentam altos níveis de risco potencial, segundo o resultado final do índice.

No entanto, em geral, quase toda a parte mais plana da bacia apresenta níveis entre médio e alto (variando principalmente entre 0.6 e 0.8) de risco potencial de inundação. A montante, valores entre 0.6 e 0.8 compõem grande parte do território, principalmente ao processo de urbanização consolidado e a presença de uma rede de drenagem ramificada. No trecho médio, os valores flutuam entre 0.4 e 0.6, sendo uma região com índice mediano de risco, mas que requer atenção por estar ainda em expansão. Nesse caso, os resultados individuais do ISMFI v2.0 são um alerta, para fins da orientação deste desenvolvimento. A jusante da bacia, o cenário é o pior, tanto por adensar a população mais vulnerável quanto por causa das características físicas da região (declividade baixa, influência de maré, região de mangue).

A região do trecho médio da bacia é a área com menor densidade populacional, o que acaba diminuindo os efeitos do Índice de Vulnerabilidade.

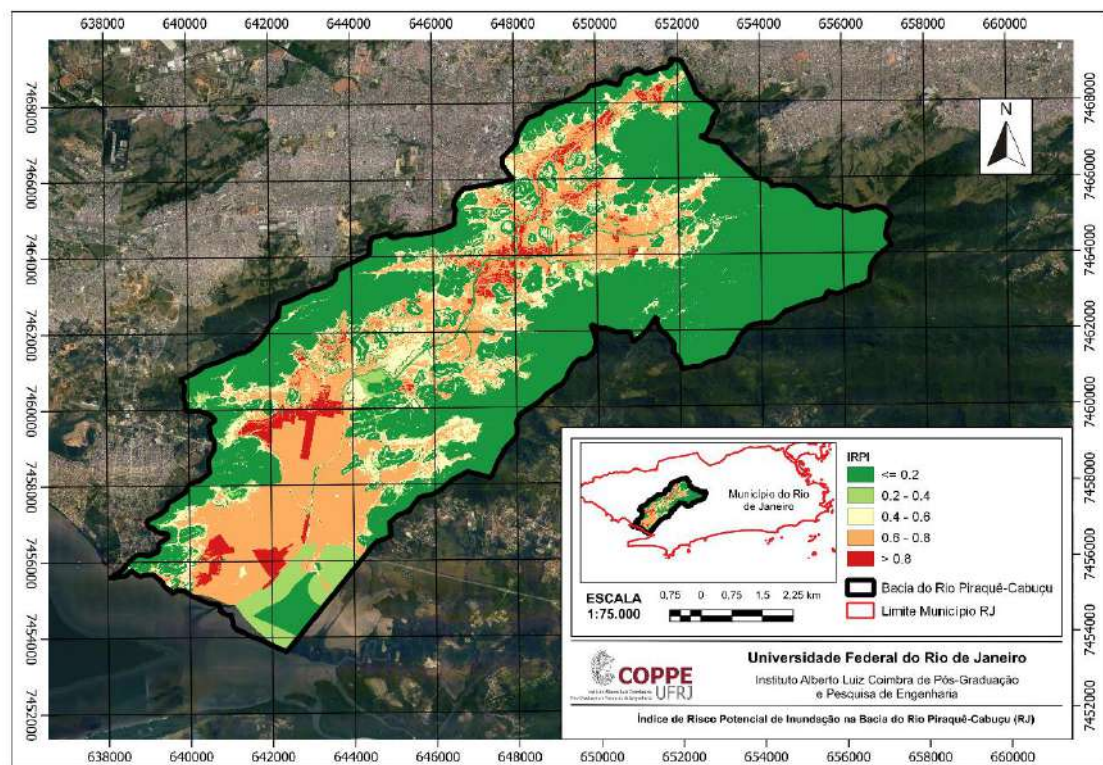


Figura 5.12: Mapa com distribuição espacial do Índice de Risco Potencial de Inundação (IRPI)

Na .

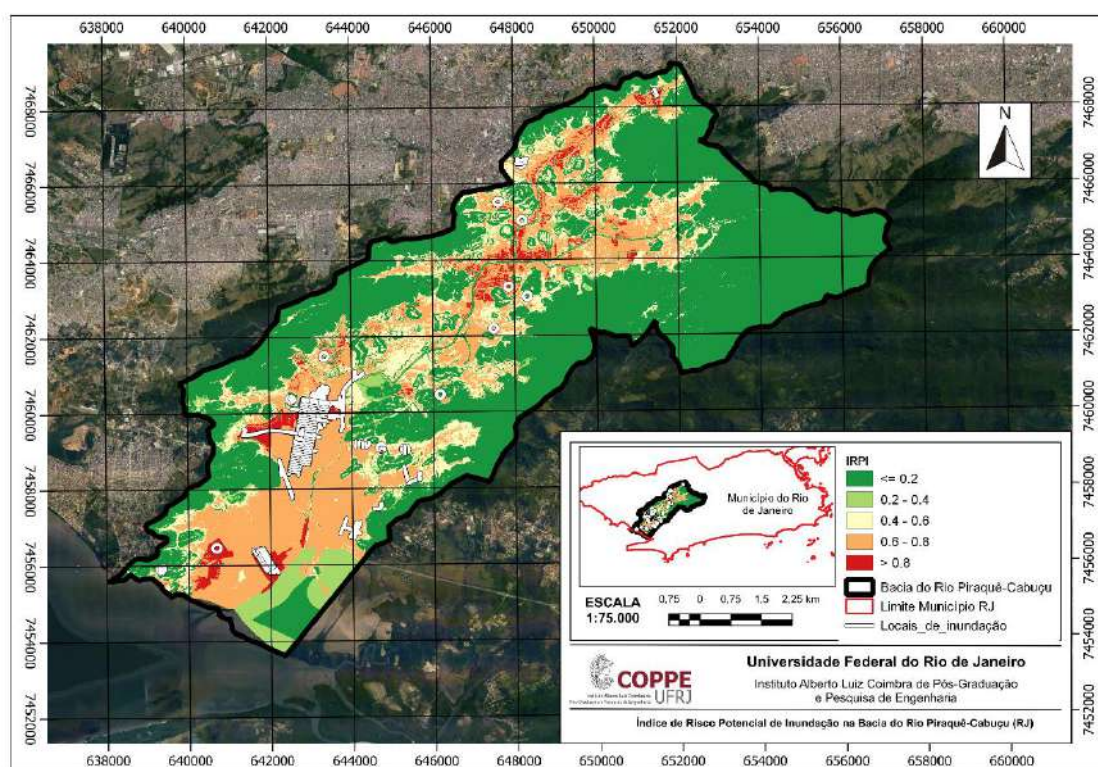


Figura 5.13, o mapa com a distribuição espacial do IRPI é sobreposto com os locais de inundação da Fundação Rio-Águas (2020) para fins de validação do índice e análise das regiões críticas que já possuem registros de eventos desse tipo.

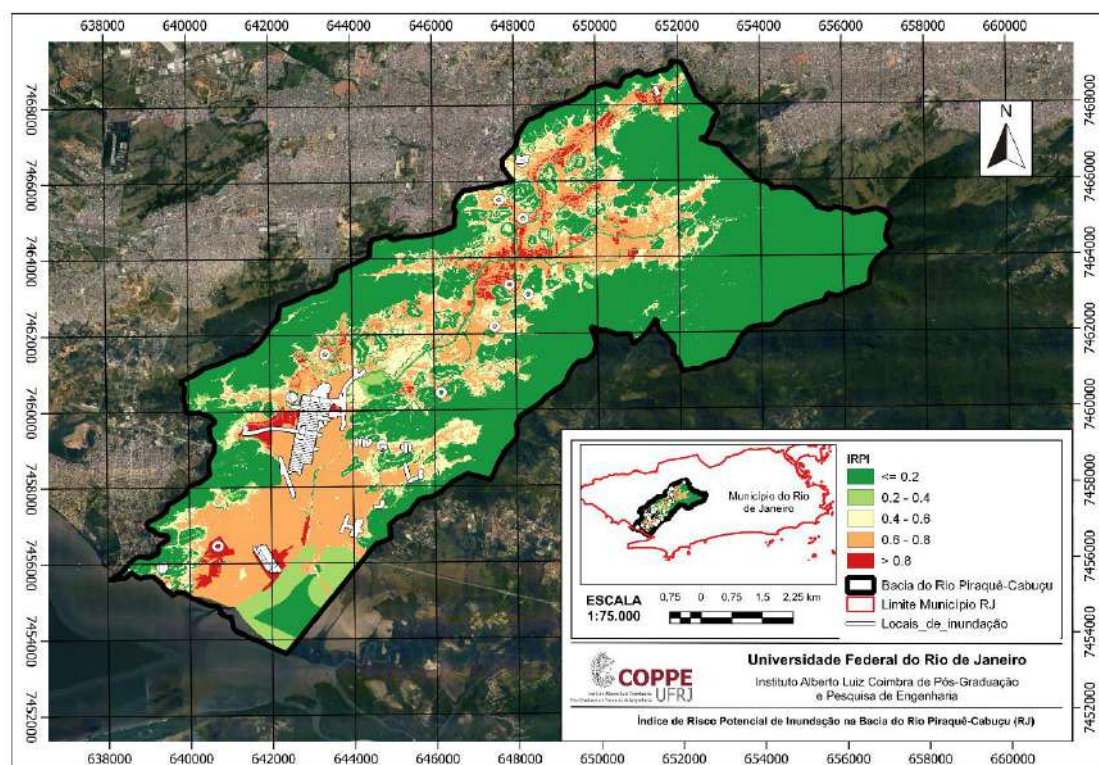


Figura 5.13: Mapa com distribuição espacial do Índice de Risco Potencial de Inundação (IRPI) sobreposto aos Locais de Inundação (AquaFluxus).

Ao sobrepor o IRPI aos locais de inundações oficiais, é possível identificar áreas de alto risco que podem não ter sido previamente reconhecidas nos planos de gestão de riscos. Esta análise pode revelar áreas urbanas que, apesar de não terem histórico de inundações, apresentam um alto IRPI devido a fatores como a rápida urbanização, impermeabilização do solo e alterações no padrão de precipitação. Além disso, a sobreposição mapeada ajuda a validar o índice como uma ferramenta de previsão eficaz, auxiliando no desenvolvimento de estratégias de adaptação mais eficazes e resilientes para lidar com os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela urbanização.

6 Proposição dos cenários de simulação

O ordenamento físico-territorial de uma cidade é um elemento primordial na promoção do desenvolvimento econômico e social e para a proteção do meio ambiente. Anthopoulos e Vakali (2012) apontam que o planejamento urbano ordena o desenvolvimento e a organização de uma cidade, além de determinar o zoneamento urbano, os limites construtivos, a previsão de infraestrutura, etc. A articulação de uma cidade com o seu meio ambiente de suporte é fundamental em seu bom funcionamento. Uma das questões mais básicas, no sentido literal, ou seja, uma das questões de base na interação entre ambiente natural e construído decorre das modificações que o processo de urbanização introduz no ciclo hidrológico urbano, agravando inundações, que afligem, como resposta, o próprio funcionamento das cidades. Nesse sentido, o planejamento urbano deve considerar, em suas primeiras etapas, o reconhecimento das fragilidades do território e das possibilidades de minimização de riscos de inundação. Nesse sentido, o conjunto de ferramentas aqui proposto pretende dar suporte a estas etapas iniciais de planejamento.

Neste capítulo, com a metodologia proposta implantada e validada, pretende-se desenvolver uma aplicação teste, de forma a ilustrar o seu potencial efetivo como suporte ao planejamento.

Da Silva (2010) desdobra o processo de planejamento nas seguintes etapas:

- i) Estudos preliminares: Levantamento de dados e avaliação primária da situação e os problemas a serem enfrentados.
- ii) Diagnóstico: Análise em profundidade dos problemas observados na etapa anterior, identificando as variáveis que devem ser consideradas para as possíveis soluções.
- iii) Plano de diretrizes: Estabelecimento de uma política para as soluções dos problemas, definição de metas e seleção dos meios necessários para a fixação das diretrizes.
- iv) Instrumentação do plano: Elaboração dos instrumentos de atuação de acordo com as diretrizes selecionadas, identificando medidas capazes de atingir os objetivos escolhidos.

O primeiro passo para o planejamento urbano que considera o desenvolvimento sustentável é compreender as relações de interferência entre desenvolvimento urbano e ambiente saudável. Para tal, uma primeira preocupação se refere a observação dos aspectos legais envolvidos. No Brasil, a legislação mostra uma significativa preocupação em fornecer instrumentos capazes de orientar os diferentes níveis institucionais no caminho para construir uma cidade sustentável (MIGUEZ *et al.*, 2012) em harmonia com o ambiente natural, embora a prática nem sempre se estabeleça desta forma.

O Código Florestal Brasileiro (Brasil, 2012) é uma das legislações ambientais mais importantes do Brasil para a proteção e preservação do meio ambiente natural. A lei cria e regulamenta diversas áreas de proteção ambiental, e as atividades humanas estão sujeitas a diferentes regras ou estritamente proibidas. Com isso, o Código Florestal é uma importante ferramenta para reduzir os impactos negativos associados às mudanças de uso e ocupação do solo comuns à expansão urbana, pois Áreas de Proteção Ambiental ou Áreas de Proteção Permanente (APPs) são responsáveis pela proteção de ambientes críticos, como rios e lagoas. De acordo com art. Artigo 4º do Código Florestal, algumas APPs importantes são as seguintes:

“I - as faixas marginais de qualquer curso d’água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de:

a) 30 (trinta) metros, para os cursos d’água de menos de 10 (dez) metros de largura;

b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d’água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;

c) 100 (cem) metros, para os cursos d’água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;

d) 200 (duzentos) metros, para os cursos d’água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;

e) 500 (quinhentos) metros, para os cursos d’água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros;

II - as áreas no entorno dos lagos e lagoas naturais, em faixa com largura mínima de:

a) 100 (cem) metros, em zonas rurais, exceto para o corpo d’água com até 20 (vinte) hectares de superfície, cuja faixa marginal será de 50 (cinquenta) metros;

b) 30 (trinta) metros, em zonas urbanas;

[...]

IV - as áreas no entorno das nascentes e dos olhos d'água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica, no raio mínimo de 50 (cinquenta) metros;

[...]

VII – os manguezais, em toda a sua extensão;”

Além disso, a Lei nº 9.985/2000, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), também é uma importante ferramenta responsável pela criação de áreas voltadas à proteção do meio ambiente (Brasil, 2000). Para proteger a biodiversidade dos diversos tipos de ecossistemas no Brasil, a lei cria as chamadas Unidades de Conservação, que consistem em territórios destinados a proteger os recursos naturais da região como um todo ou utilizá-los de forma sustentável a fim de compatibilizar os interesses humanos a fim de manter um meio ambiente equilibrado.

Para o efetivo planejamento e determinação do caráter das medidas a serem adotadas, a bacia hidrográfica deve ser a unidade de planejamento e, portanto, devem ser observadas as Unidades de Conservação e Áreas de Proteção Ambiental para que os aspectos legais e limitações da área de interesse sejam compreendidas. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a delimitação das Unidades de Conservação, que é composta pelo Parque Estadual da Pedra Branca, Reserva Biológica e Arqueológica de Guaratiba e área a oeste da bacia; as Áreas de Proteção Ambiental ao longo do curso do Rio Piraquê-Cabuçu; Espaços livres, que, segundo Macedo *et al.* (2007), esses espaços possuem um caráter de conectividade e complementaridade, mesmo que não tenham sido pensados especificamente para tal finalidade.

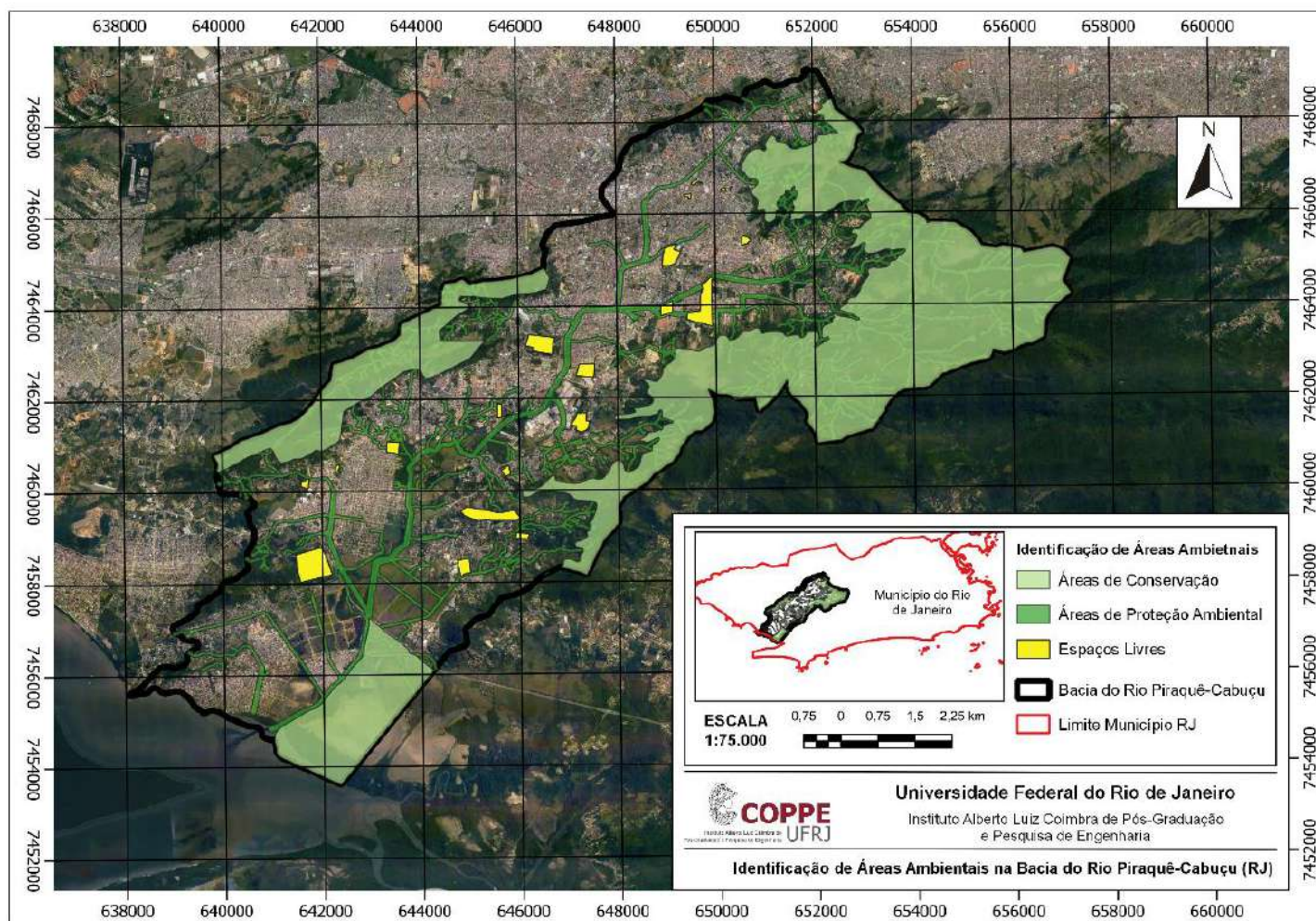


Figura 6.1: Mapa de identificação das Áreas de Conservação Ambiental, Áreas de Proteção Ambiental e Potenciais Espaços Livres.

O objetivo da observação desses espaços perpassa a possibilidade de propor cenários de desenvolvimento, a partir da identificação de áreas com potencial para implementação de infraestrutura verde e azul para o gerenciamento do risco de inundações, integradas às áreas legalmente protegidas.

A Figura 6.2 mostra as Áreas de Conservação, os espaços livres identificados a montante da bacia e os resultados do índice de susceptibilidade do meio físico a inundações, compilados no mesmo mapa.

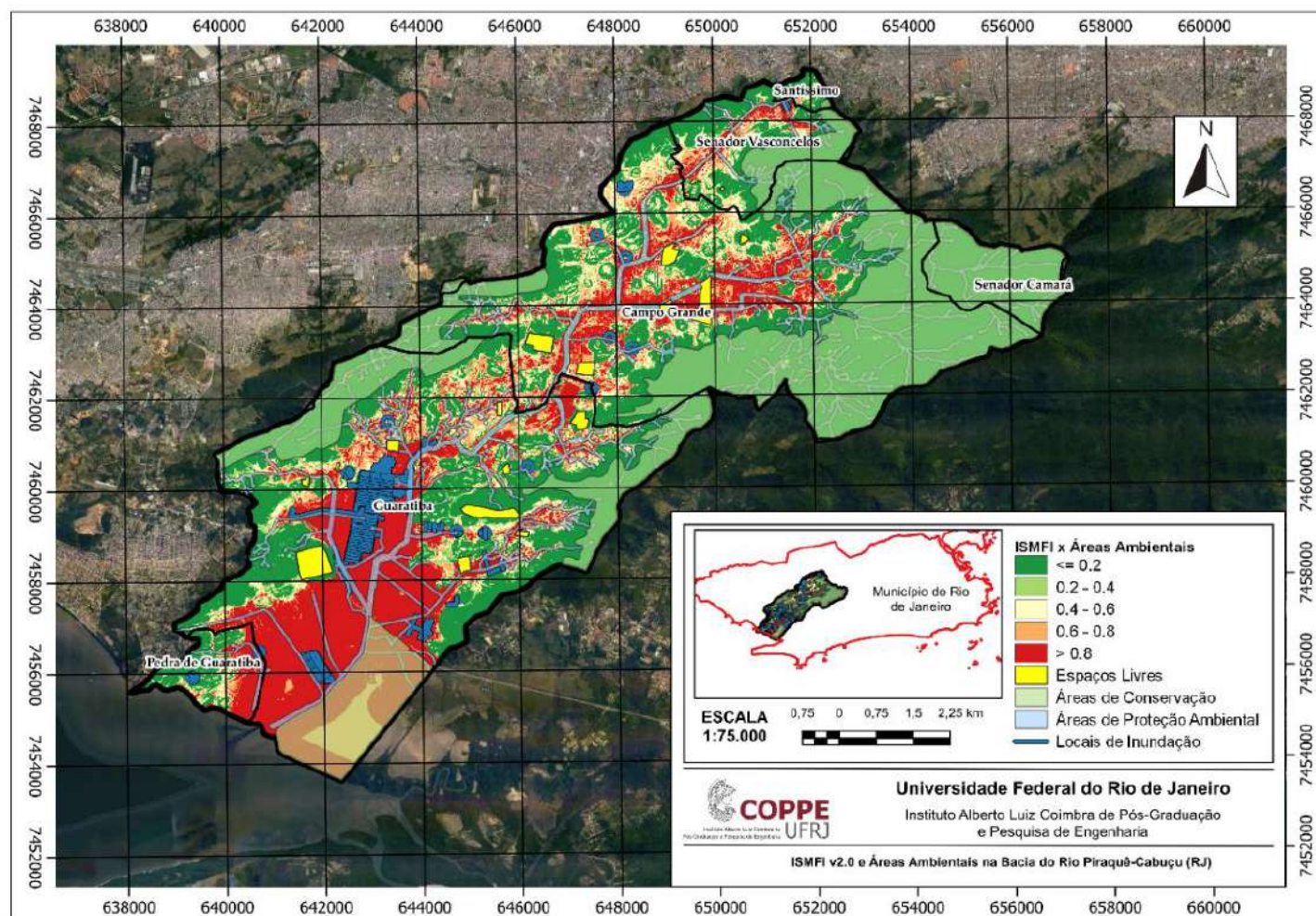


Figura 6.2: Mapa com a distribuição espacial do ISMFI v2.0, identificação dos Espaços Livres, Áreas de Conservação e Proteção Ambiental e Locais de Inundação.

Ao comparar as áreas mapeadas como susceptíveis a inundação com a mancha populacional, pode-se identificar algumas áreas de mais alta densidade populacional nas áreas potencialmente inundáveis e a situação torna-se ainda mais crítica se comparado com o mapa de renda da região, uma vez que os menos favorecidos presentes nestas áreas levarão mais tempo para se recuperar das consequências danosas desses eventos. Além de todos esses prejuízos, é nessa região que se localizam duas das principais vias do bairro, a Estrada do Magarça e a Avenida das Américas, ou seja, as inundações constantes podem inferir também em toda a dinâmica de deslocamento pelos bairros e acesso as principais vias do Município, inclusive em relação a socorro e abrigo.

Diante das limitações da região, e considerando o desenvolvimento histórico, dois cenários futuros serão levadas em consideração, para teste do comportamento das ferramentas aqui desenvolvidas:

- Cenário 1: Cenário com crescimento populacional desordenado. Nesse cenário, áreas naturais serão trocadas por áreas urbanizadas e, como consequência, o solo se tornará mais impermeável, com uma expansão mais horizontal e menos densa.
- Cenário 2: Cenário com crescimento populacional ordenado considerando a possibilidade de realocação de moradores das áreas mapeadas como susceptíveis a inundações (observadas a partir do ISMFI v2.0) e também seguindo as orientações do Plano Diretor. Além disso, devem ser respeitadas as APPs, Áreas de Conservação e Áreas de Proteção Ambiental e possíveis implementações de medidas de infraestrutura verde e azul, tais como a utilização de espaços livres e áreas verdes interconectadas, principalmente cobrindo as áreas mais frágeis.

Para determinar o cálculo do aumento populacional, é necessário estimar a taxa de crescimento anual por bairros inseridos na Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, a partir dos valores de população, conforme a Tabela 6.1, a partir dos dados dos Censos de 2000 e 2010, que são os dados disponíveis no momento de confecção deste trabalho, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Tabela 6.1: Dados de população obtidos por meio dos Censos de 2000 e 2010 e taxa de crescimento populacional por bairro.

Bairros da Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu	População Total nos Bairros		Taxa de crescimento anual (%)
	2000	2010	
Campo Grande	297.494	328.370	1,04
Guaratiba	87.312	110.049	2,60
Senador Vasconcelos	27.285	30.600	1,21
Santíssimo	34.086	41.458	2,16
Pedra de Guaratiba	9.693	9.488	-0,21

Entretanto, por nem toda parte do setor censitário estar geograficamente dentro dos limites da Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, é necessário fazer uma ponderação a partir da grade estatística do IBGE, sendo possível estimar a população dos bairros dentro da BPC, resultando nos valores da Tabela 6.2. A distribuição desta população em faixas de densidade populacional foi realizada de acordo com a densidade média recomendada pela ONU para cidades em rápido crescimento urbano, sendo esta densidade a de 150 pessoas por hectare (UN-HABITAT, 2022a). Considerando que a análise populacional deste estudo considera a grade estatística do IBGE, em quadrículas de 200 metros x 200 metros, a densidade média recomendada seria a de 500 habitantes por quadrícula. De forma a manter este valor no centro das faixas de densidade definidas para este estudo, foram definidas as seguintes faixas:

- Densidade abaixo de desejável: Grades com até 300 habitantes;
- Densidade desejável: Grades com população entre 300 e 700;
- Densidade acima do desejável: Grades com mais de 700 habitantes.

Tabela 6.2: População por bairro inserida na Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu.

População dentro da BPC	
2010	
Campo Grande	126.573
Guaratiba	70.207
Senador Vasconcelos	30.004
Santíssimo	2.653
Pedra de Guaratiba	7.886

A partir da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível elaborar a distribuição espacial da BPC conforme o Censo de 2010, conforme ilustrado na

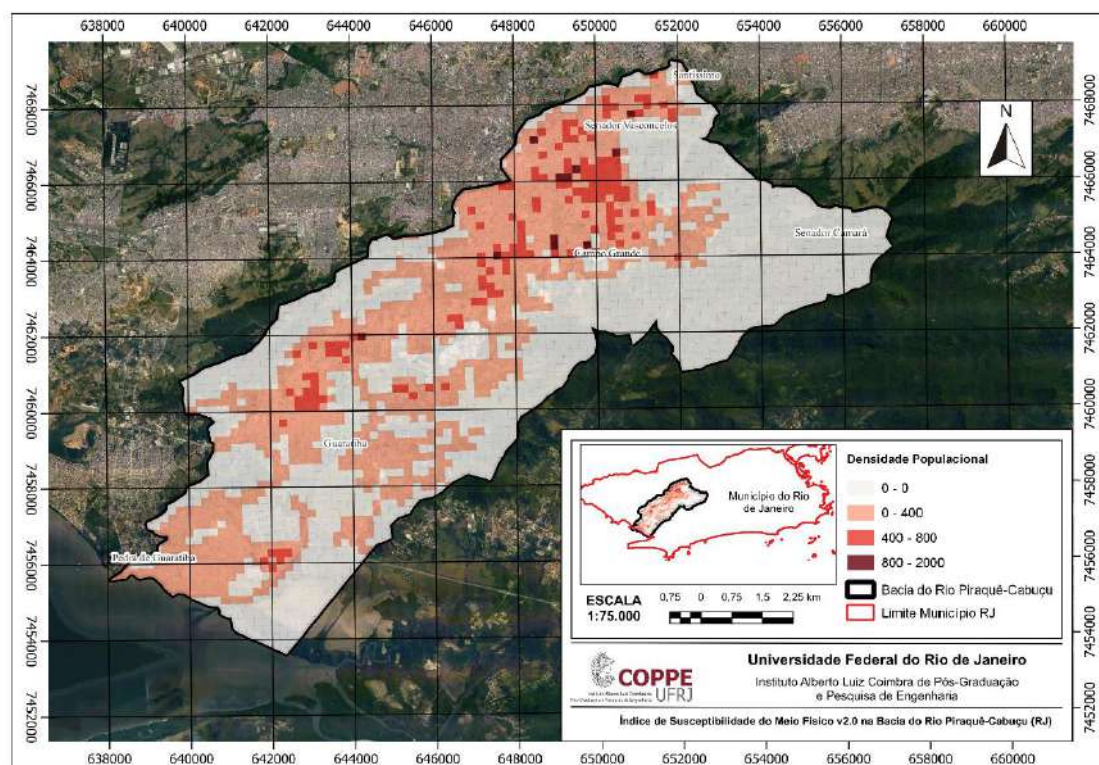


Figura 6.3.

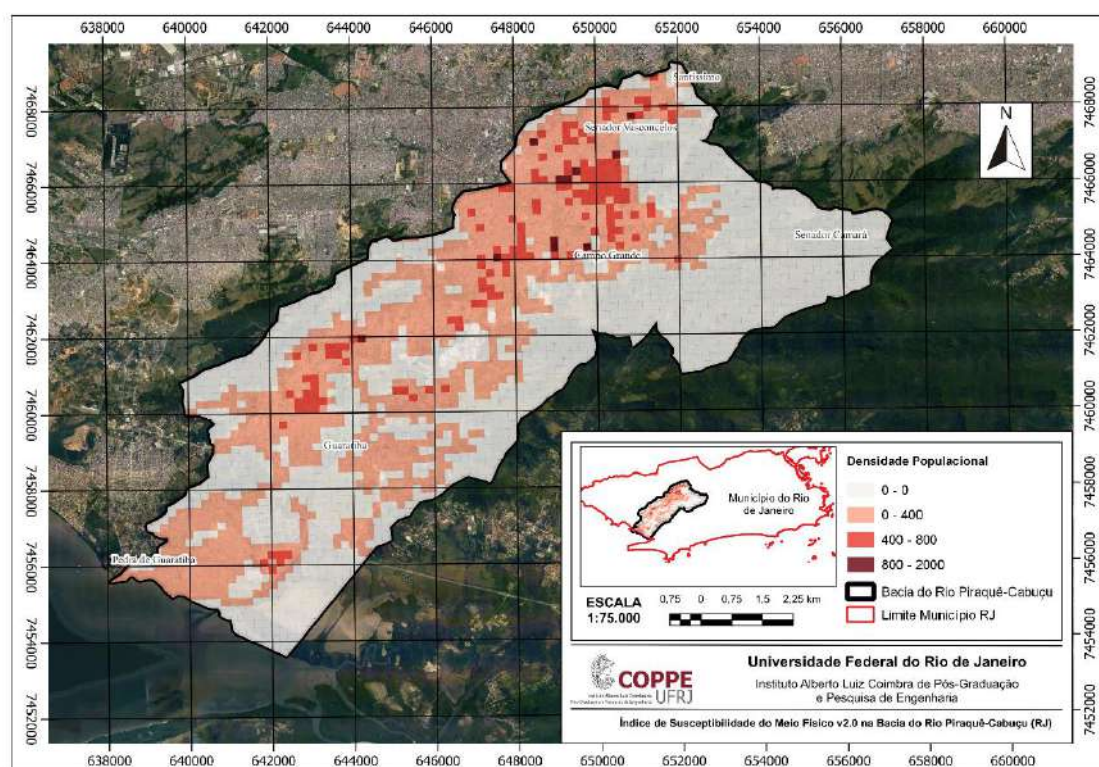


Figura 6.3: Mapa com distribuição espacial segundo o Censo 2010 (IBGE).

Aplicando a taxa anual de crescimento demonstrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para os valores de população de cada bairro apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é possível estimar o valor de população por bairro, para o ano de 2050, com início em 2010. A realização deste procedimento gera os resultados apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Tabela 6.3: Valores de população por bairro em 2050 após aplicação das taxas de crescimento anual calculadas

Bairros	2010	Taxa de crescimento anual (%)	População incremental (2010 – 2050)	2050
Campo Grande	126.573	1,04	52,547	179.120

Guaratiba	70.207	2,60	73,131	143.338
Senador Vasconcelos	30.004	1,21	14,581	44.585
Santíssimo	2.653	2,16	2,295	4.948
Pedra de Guaratiba	7.886	-0,21	-667	7.219

Com base nessa metodologia, os mapas com a distribuição espacial do adensamento populacional para o ano de 2050 foram gerados, de modo a verificar as particularidades de cada cenário proposto analisando as consequências da urbanização por bairros, conforme apresentado nos próximos itens.

6.1 Cenário 1: Crescimento populacional desordenado (Cenário tendencial)

Para a construção do cenário tendencial, parte-se do pressuposto da atratividade da população no território, com base na concentração de infraestrutura, oferta de serviços e comércio, atributos paisagísticos e potencial construtivo, constituídos como critérios para o planejamento de algumas cidades.

A resultante desse conjunto de atratividade no espaço urbano mostra, de forma clara, a importância de regiões centrais da Zona Oeste do Rio de Janeiro, como o bairro de Campo Grande, o entorno de shoppings, bem como eixos das principais vias de acesso ao bairro de Guaratiba e a região litoral. Em geral, essa atratividade e massificação de construções é potencializada por novos investimentos públicos e privados em algumas áreas.

A ocupação litorânea é uma forte tendência no processo de urbanização desordenada na região, se expandindo tanto formal quanto informalmente e, como

consequência, trazendo forte pressão para o desenvolvimento urbanos em bairros como Guaratiba e Pedra de Guaratiba. A partir dessa análise associada às atratividades da região, em áreas cujos usos do solo possuem maiores facilitadores de transição e excluindo-se fatores limitantes, isto é, abrindo precedentes para a construção informal mesmo em áreas de proteção integral e outras categorias, produziu-se o mapa ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, como exercício de suposição de um possível futuro dentro desta lógica disfuncional.

Neste cenário foi considerada prioritariamente a expansão horizontal da região, o cenário tendencial indica, em sua grande maioria, concentração maior na região de Guaratiba e Campo Grande. Vale ressaltar que a região que abrange os bairros Guaratiba e Pedra de Guaratiba são destacadas pois têm maior quantidade de áreas disponíveis e retratam o movimento de expansão observada nas últimas décadas.

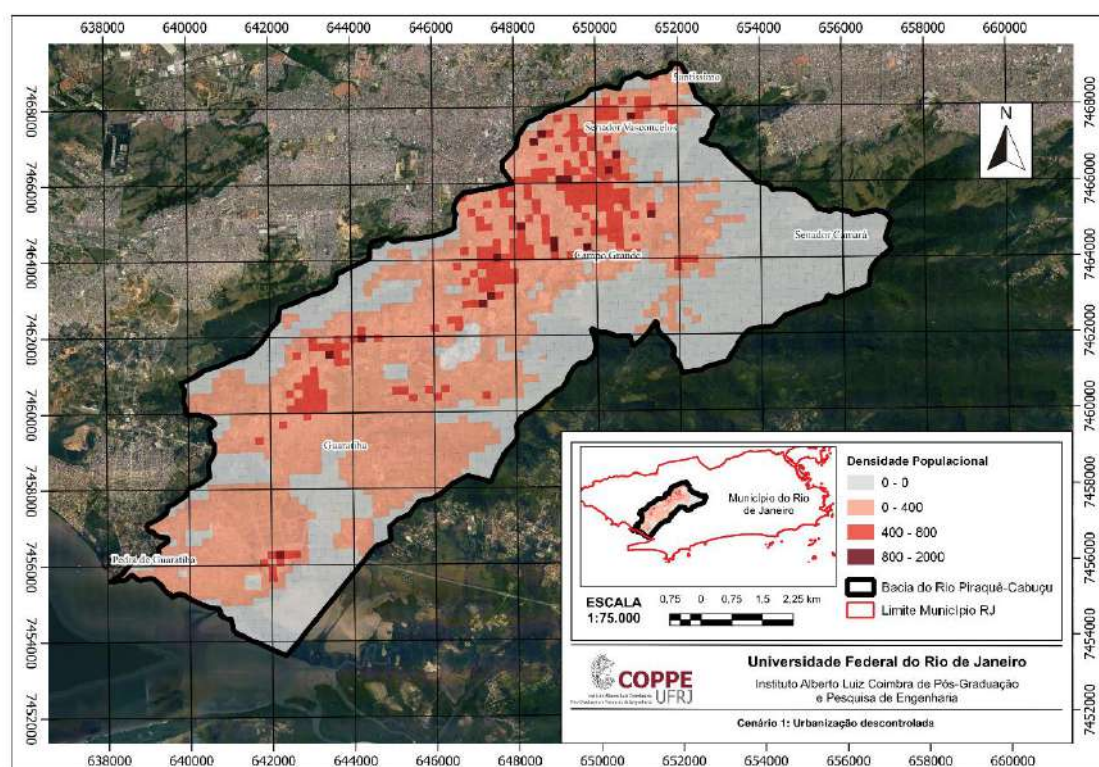


Figura 6.4: Mapa com distribuição espacial de expansão urbana tendencial segundo Cenário 1.

É possível observar um adensamento urbano na região do bairro de Campo Grande, que já possui grandes propensões a eventos de inundação, além disso, ocorre também um adensamento na região do Jardim Maravilha e Favela do Jardim Garrido,

regiões onde o índice de susceptibilidade a inundações apresenta alto valor, indicando uma região de risco entre moderado e alto. Portanto, esta seria a antítese do planejamento informado e ordenado. Nessas regiões, a expansão urbana seria também, majoritariamente, horizontal, ocupando principalmente áreas às margens do rio e de proteção ambiental, aumentando ainda mais a susceptibilidade das regiões a eventos de inundação, uma vez que expande a impermeabilização do solo. Pode-se perceber, de forma geral, que o cenário indica a expansão horizontal na região central da Bacia sendo boa parte das novas áreas localizadas em áreas frágeis e sem infraestrutura. A região apresenta propensão acentuada de ocupação irregular em áreas livres e regiões urbanas fragmentadas.

Os resultados sugerem a necessidade de revisão das políticas públicas e cuidados com a interação entre ambiente natural e construído, com uma mudança na orientação da ocupação urbana para outros eixos de desenvolvimento, de forma a evitar a instalação de novos empreendimentos imobiliários em áreas fragilizadas ou sem infraestrutura. Ademais, o estudo deste cenário tendencial demonstra a relevância e a urgência da implementação de um sistema de controle do uso e ocupação do solo, a fim de prevenir ocupações irregulares.

6.2 Cenário 2: Crescimento populacional planejado e ordenado conforme limitações da bacia

Com o objetivo de atuar para impedir as tendências identificadas no cenário tendencial (Cenário 1), o cenário 2 foi planejado com base nos resultados dos índices disponibilizados nesta pesquisa, bem como em metas e ações estabelecidas no Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (2011) Esse cenário visa promover um desenvolvimento urbano mais sustentável, com foco na redução do espraiamento urbano, no aumento da densidade populacional e na criação de uma cidade mais verde e compacta, preservando áreas ribeirinhas e evitando a ocupação de áreas com fragilidades naturais para inundações.

Essa abordagem sustentável visa aprimorar o uso do espaço urbano, criando áreas de lazer, utilizando espaços livres e a otimização dos recursos disponíveis, com o objetivo de melhorar a qualidade de vida da população urbana, ou seja, o crescimento urbano é

direcionado de forma planejada e sustentável. Essa abordagem visa otimizar o uso do espaço urbano, criando áreas de lazer em espaços livre e maximizando o aproveitamento dos recursos disponíveis.

A população é distribuída de forma mais eficiente, reduzindo a concentração em áreas de risco e vulneráveis a desastres naturais. Medidas de preservação são adotadas para proteger as áreas agrícolas e florestais, garantindo a resiliência climática, a biodiversidade e a preservação de paisagens naturais. Além disso, a promoção de áreas de comércio e serviços na região central, aliada ao aumento do uso residencial, contribui para a densificação populacional em áreas já dotadas de infraestrutura, melhorando a qualidade de vida e o uso de espaços públicos.

O cenário foi desenvolvido considerando diversos fatores, como o crescimento demográfico, a disponibilidade de recursos naturais e infraestrutura urbana, tal como a legislação e os aspectos socioeconômicos da população. Dessa forma, espera-se que as estratégias propostas possam contribuir para uma cidade mais resiliente no longo prazo.

Em resumo, o cenário planejado baseia-se em algumas metas e ações estratégicas estabelecidas pelo Plano Diretor da cidade, que incluem:

- Redução da população em áreas de risco, especialmente aquelas propensas a enchentes e deslizamentos;
- Preservação das áreas agrícolas da cidade, aumentando a resiliência climática;
- Proteção de áreas florestais que fornecem serviços ecossistêmicos e garantem a biodiversidade, além de manter as paisagens florestais e potencialmente expandir a área de floresta nas bordas dos maciços;
- Melhoria da atratividade das áreas de comércio e serviços na área e aumento do uso residencial na área central visando aumentar a densidade populacional em áreas dotadas de infraestrutura e aumentar a oferta de serviços e empregos. Essa medida tem um potencial significativo para melhorar a qualidade de vida e o uso de espaços públicos;
- Criação de espaços para implementação de parques verdes e parques lineares com o objetivo de proteger ou recuperar ecossistemas limítrofes

aos cursos e corpos d'água, controlar enchentes e prover áreas verdes para o lazer.

A criação de parques verdes e parques lineares é uma prioridade nesse cenário, visando proteger e recuperar ecossistemas nas margens dos rios e corpos d'água. Essas áreas também ajudam a controlar enchentes e proporcionam espaços verdes para o lazer da população, evitando, concomitantemente, a ocupação de áreas inundáveis. A gestão das águas pluviais é aprimorada com a implementação de infraestruturas verdes e azuis, como *wetlands*, bacias de retenção e jardins de chuva, promovendo a retenção e remoção de contaminantes e evitando enchentes.

O cenário elaborado segue o crescimento ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde é relevante destacar que as análises demográficas projetam declínio populacional em diversos bairros da região durante as próximas décadas, portanto, o principal objetivo almejado consiste em uma distribuição populacional mais eficiente, sobretudo para a região central e principais centros urbanos.

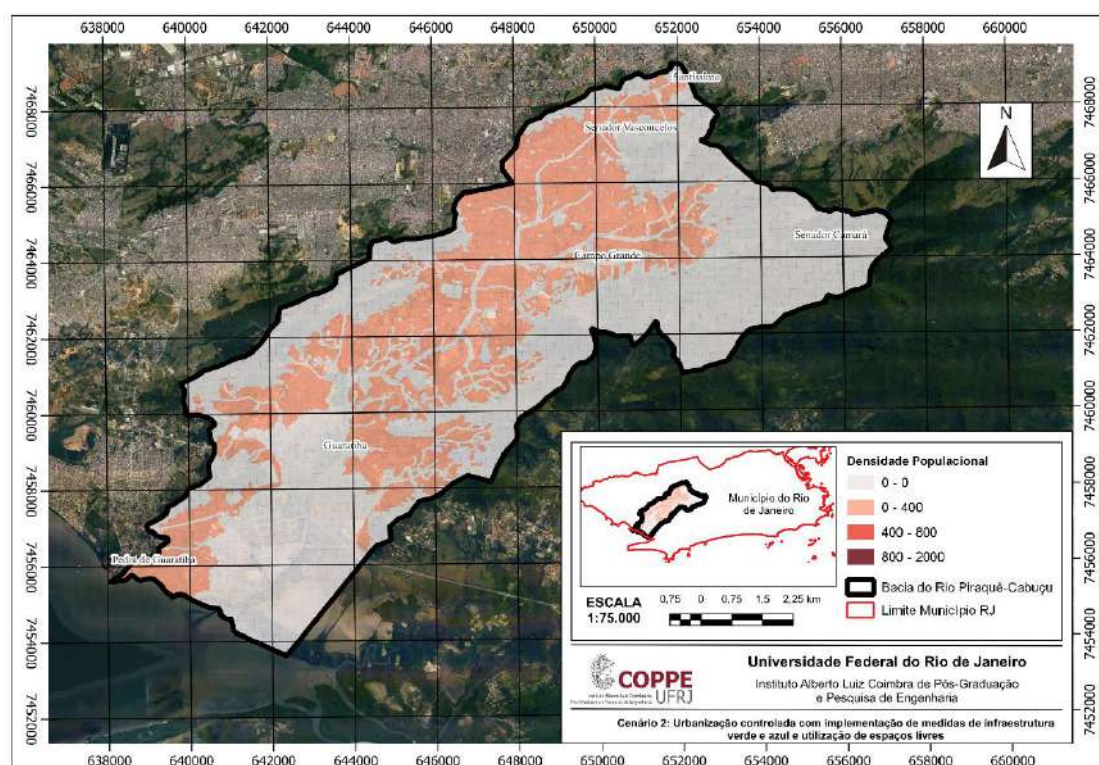


Figura 6.5: Mapa com distribuição espacial de expansão urbana tendencial segundo Cenário 2.

É possível observar que há uma redistribuição do adensamento populacional na região central, principalmente nos bairros de Campo Grande e Guaratiba. Isto é, para este cenário considera-se a remoção da população que reside em áreas com altos níveis de índice de susceptibilidade a inundações, tal como é possível identificar a remoção da Favela do Garrido, no bairro da Pedra de Guaratiba, no curso baixo do rio e o remanejamento da população que mora na região do Jardim Maravilha. O compromisso deste cenário seria com uma situação potencialmente ideal, ainda que nem todas as ações sejam realmente factíveis, a título de teste das ferramentas propostas e seu comportamento na previsão de redução de riscos futuros.

Além disso, observe que, neste cenário, existe a preservação completa do Parque Estadual da Pedra Branca, área de conservação ambiental e também a conservação das áreas de proteção permanente às margens do curso do rio, o raio de distância das nascentes e as cotas altimétricas, respeitando a legislação vigente, como também, a possível construção de áreas interconectadas dentro da cidade, utilização de espaços livres.

Já na região mais ao litoral, os corpos hídricos e áreas alagáveis possuem atenção especial, no intuito de sua valorização e melhoria de qualidade ambiental, aproveitando as potencialidades da região para que sejam vetores de desenvolvimento urbano-ambiental, mas sem colocar pessoas em áreas de risco. A baía de Guaratiba é um objeto de discussão em relação a uma cidade mais sustentável e esse fato se deve tanto à necessidade de melhorias em sua qualidade hídrica quanto às atividades econômicas, turísticas e de transporte sustentável que podem ser estimuladas. Além disso, as áreas adjacentes são altamente vulneráveis ao aumento do nível do mar, tornando-se imperativo implementar ações específicas nessa direção, priorizando o impedimento de urbanização nessa região e buscando implementar medidas de infraestrutura verde e azul.

Ademais, a partir da divisão de trechos, como ilustrada na Figura 4.8, extrapolando conceitualmente a discussão sobre o planejamento da bacia, sugerem-se algumas medidas que podem ser adotadas como critérios de planejamento para o cenário em questão:

- ✓ **Piraquê-Cabuçu Superior:** Algumas medidas devem ser tomadas com o objetivo de assegurar a capacidade hidráulica adequada do canal consolidado. Dentre essas medidas estão: a definição das vazões de

restrição, a adequação das vazões afluente com a vazão de restrição por meio de reservação nas bacias contribuintes, a criação de reservatórios abertos e com baixas profundidades, a integração desses reservatórios com áreas de lazer e preservação, e a manutenção das cabeceiras não urbanizáveis (como já estabelecido pela legislação municipal).

- ✓ **Médio Piraquê-Cabuçu:** Nesse trecho deverão ser adotadas medidas como a expropriação de parte da área ocupada ilegalmente no sub-bairro Jardim Maravilha (em conformidade com as diretrizes definidas pela Prefeitura Municipal), visando assegurar a faixa de preservação nas margens do corpo hídrico. Além disso, propõe-se um Parque Linear que contemple uma via de serviço ao longo de toda a extensão do segmento, com o objetivo de prevenir futuras ocupações, bem como um reservatório com área não suscetível a inundação para uso recreativo integrado ao Parque Linear para garantir a conservação das vazões afluentes atuais em face da futura urbanização.
- ✓ **Piraquê-Cabuçu Inferior:** Algumas medidas deverão ser implementadas nesse trecho a partir da desapropriação de parte da área invadida do Favela do Jardim Garrido (de acordo com os critérios estabelecidos pela Prefeitura Municipal), com o objetivo de garantir a preservação do ecossistema de manguezal existente. Além disso, deve ser estendida a via de serviço existente (proposta no trecho do Médio Piraquê-Cabuçu), dotando-a de equipamentos urbanísticos de parque, bem como aproveitando e adaptando a área de mangue existente na margem esquerda do curso d'água para o tratamento natural de parte da vazão do corpo hídrico, antes do seu deságue na Baía de Sepetiba, através de um sistema de *Wetland*.

6.3 Aplicação dos índices para os cenários futuros

6.3.1 Aplicação do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI v2.0)

Para a aplicação do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI v2.0), o Indicador de Impermeabilização do Solo (I_{imp}) foi recalculado, de acordo com as especificações de descrição de cada cenário proposto.

Os mapas de impermeabilização do solo para cada cenário proposto estão apresentados a seguir, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 6.7.

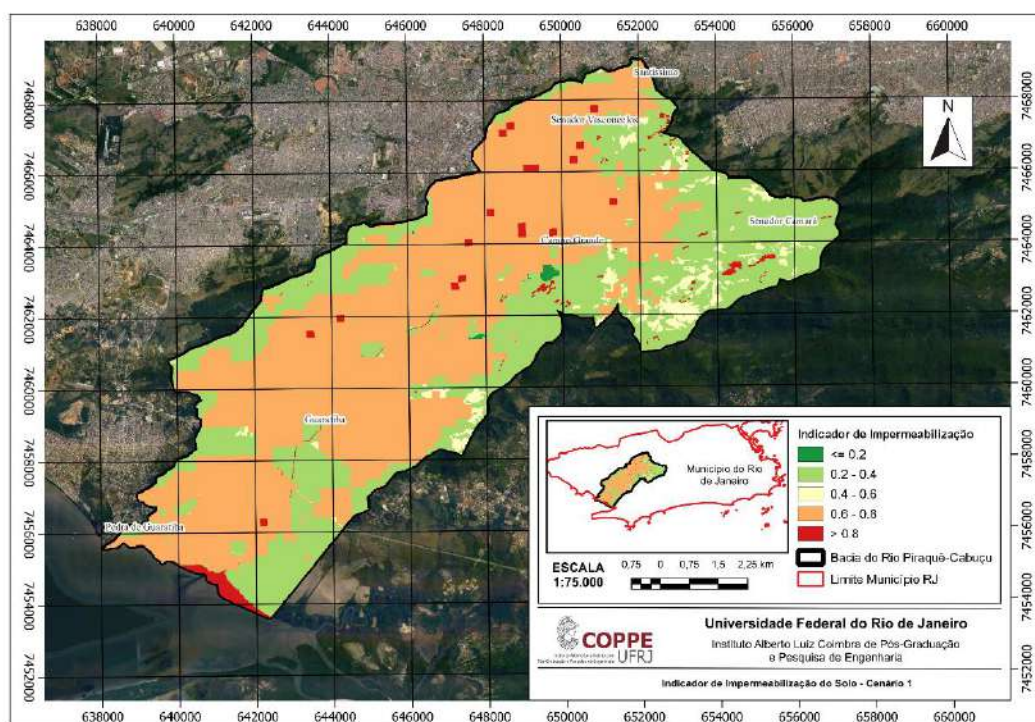


Figura 6.6: Mapa com distribuição espacial do Indicador de Impermeabilização do Solo (Iimp) para o Cenário 1.

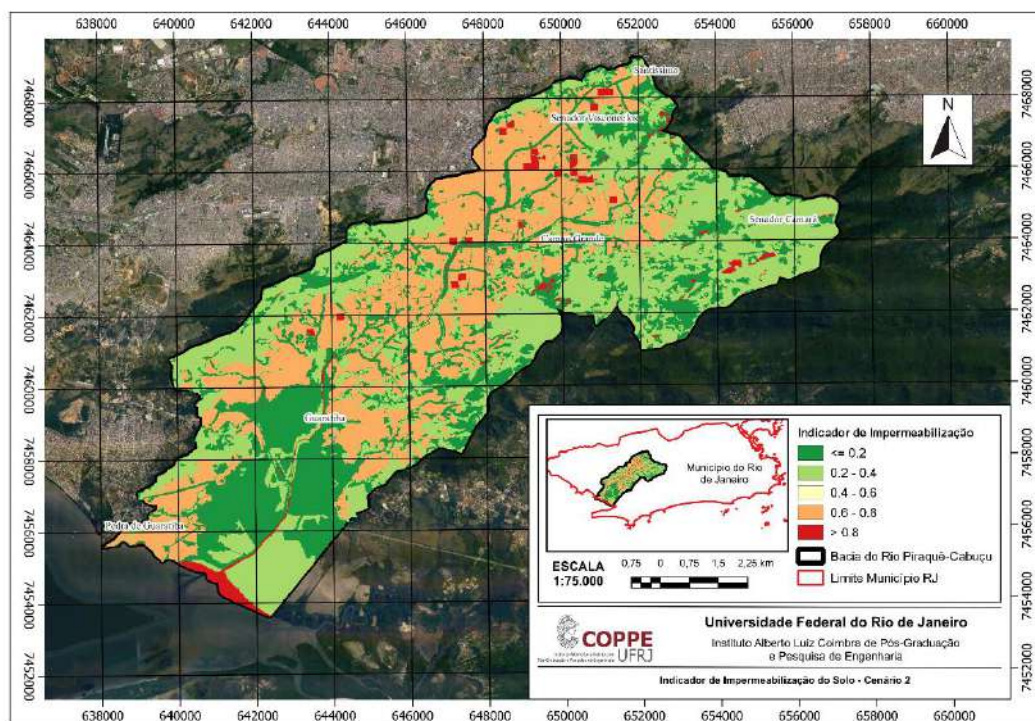


Figura 6.7: Mapa com distribuição espacial do Indicador de Impermeabilização do Solo (Iimp) para o Cenário 2.

Pode-se perceber que a impermeabilização do solo indica exatamente a tendência para cada proposição de crescimento urbano. No cenário de crescimento populacional desordenado (Cenário 1), os níveis de impermeabilização do solo são mais elevados. Isso ocorre devido à ocupação indiscriminada em áreas sensíveis e sem infraestrutura adequada. No cenário de crescimento populacional ordenado (Cenário 2), os níveis de impermeabilização do solo são gerenciados de forma mais equilibrada, buscando o desenvolvimento urbano sustentável, priorizando a manutenção de áreas livres estratégicas.

Considerando o novo Indicador de Impermeabilização do Solo para os cenários de crescimento urbano em 2050, e considerando que os indicadores de Cota Altimétrica, Declividade e Proximidade não se modificam, as Figuras 6.8 e 6.9 apresentam o resultado do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0 para a Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu no Rio de Janeiro em 2050.

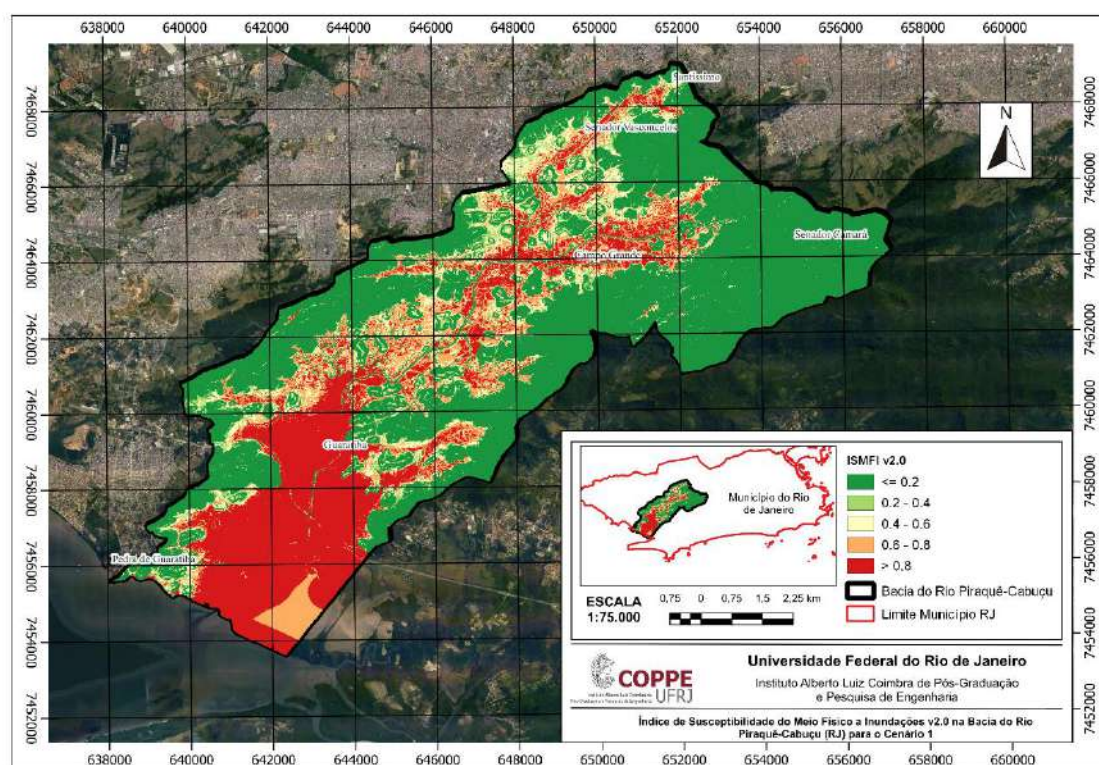


Figura 6.8: Mapa com distribuição espacial do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0 para o Cenário 1.

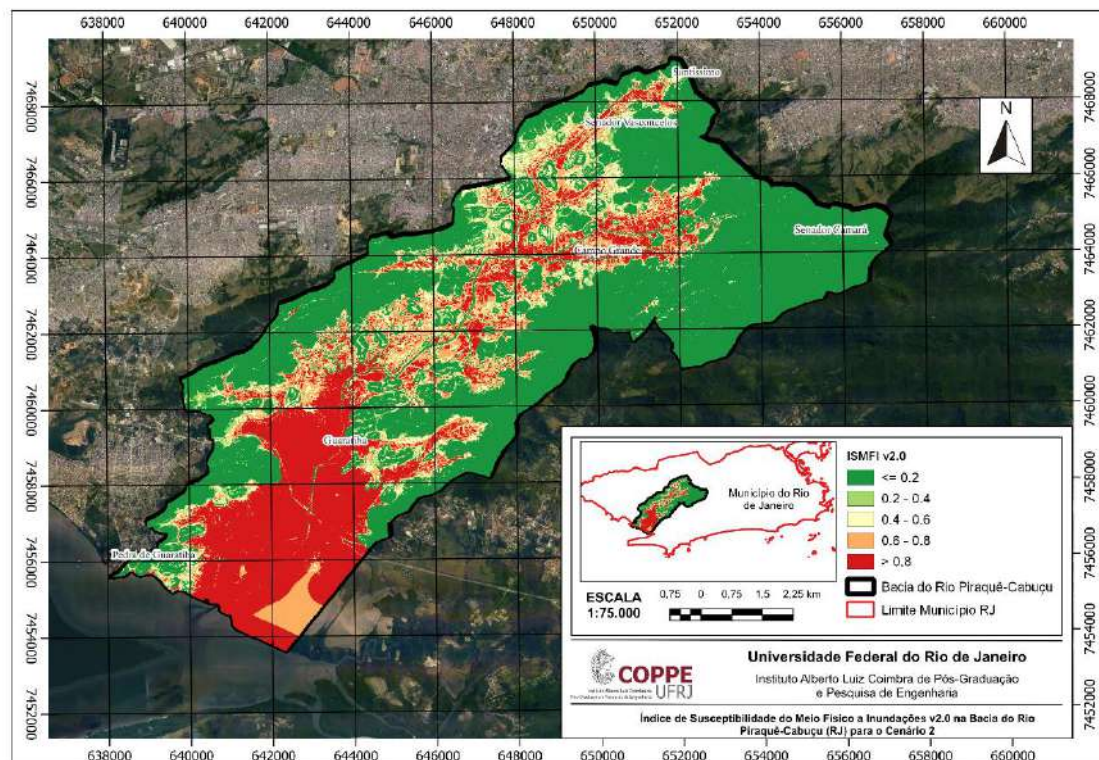


Figura 6.9: Mapa com distribuição espacial do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0 para o Cenário 2.

6.3.2 Aplicação do Índice de Vulnerabilidade (IV)

Para a aplicação do Índice de Vulnerabilidade, o Indicador de Exposição de Infraestrutura foi modificado. Esse indicador é expresso pela densidade da área construída, e essa métrica indiretamente reflete o grau de exposição das pessoas em uma determinada área urbana.

Quando a densidade da área construída é maior, significa que as construções são mais verticalizadas, indicando uma taxa de ocupação mais intensas de edifícios residenciais ou comerciais. Isso implica que a área possui maior concentração populacional e um maior grau de infraestrutura implantada (idealmente).

Ao utilizar esse indicador para avaliar cenários futuros de urbanização, é possível analisar os possíveis impactos decorrentes do aumento ou redistribuição da densidade da área construída. Ao analisar o Indicador de Exposição de, é possível identificar áreas com

altas densidades que podem estar expostas a riscos. Isso pode auxiliar no planejamento urbano e na implementação de medidas de mitigação de riscos, como a criação de áreas de proteção ambiental, a melhoria da drenagem e o estabelecimento de políticas de uso do solo mais adequadas.

Em resumo, a modificação do Indicador de Exposição de Infraestrutura, medido pela densidade da área construída, fornece *insights* sobre os possíveis impactos dos cenários futuros de urbanização, permitindo uma melhor compreensão das necessidades de infraestrutura, planejamento urbano e mitigação de riscos. É importante considerar esse indicador juntamente com outras variáveis socioeconômicas, ambientais e demográficas para uma análise mais abrangente e detalhada. As Figuras Figura 6.10 e Figura 6.11 ilustram o mapeamento do indicador para a Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu (RJ) para cada um dos cenários futuros propostos.

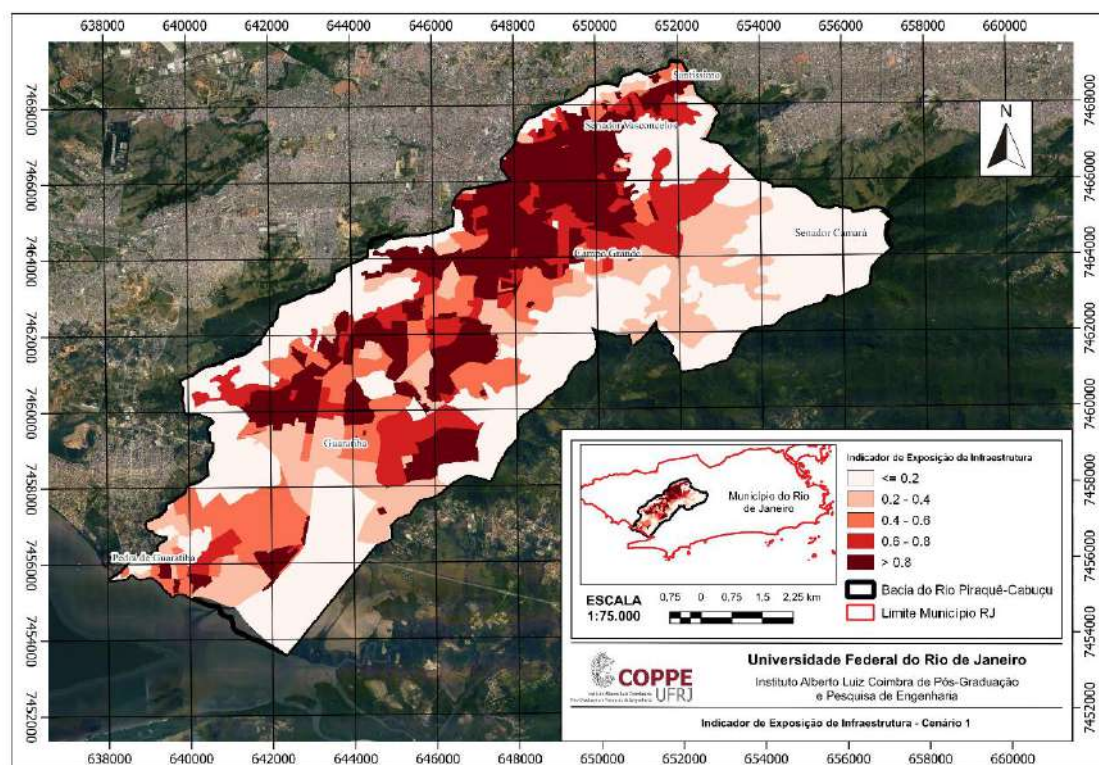


Figura 6.10: Mapa com distribuição espacial do Indicador de Exposição de Infraestrutura para o Cenário 1.

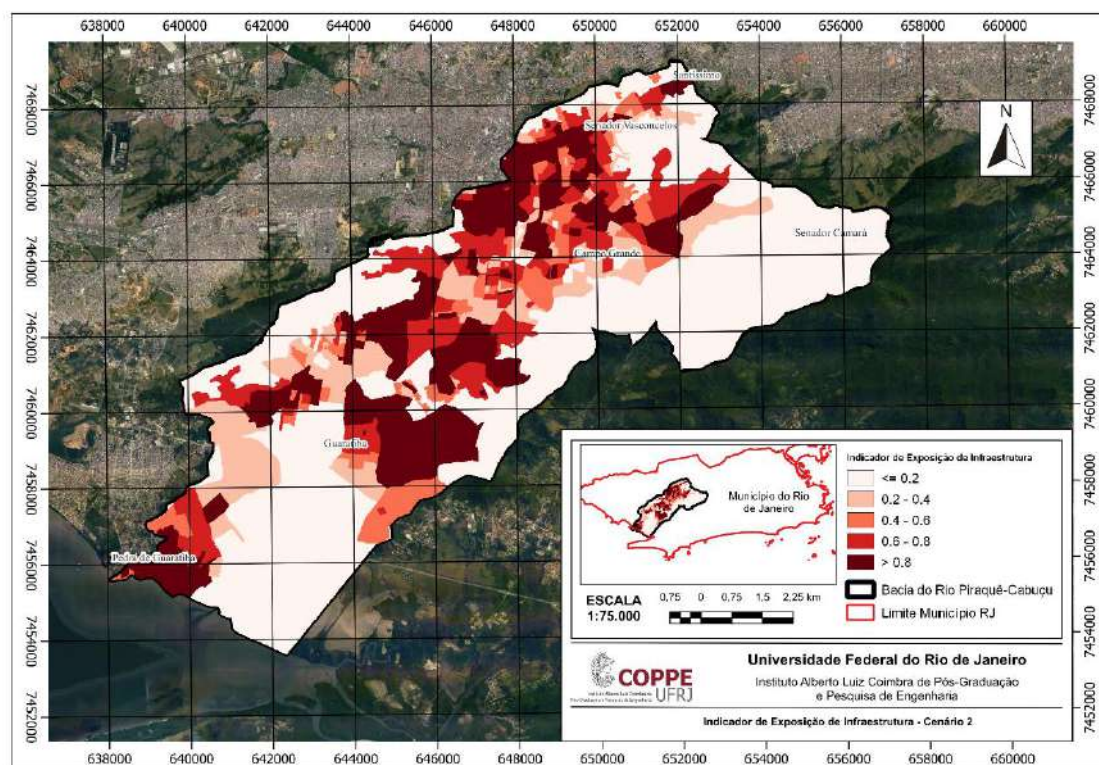


Figura 6.11: Mapa com distribuição espacial do Indicador de Exposição de Infraestrutura para o Cenário 2.

Analisando o Cenário 1, pode-se observar que as mudanças são bastante perceptíveis e coerentes. Houve um significativo espalhamento populacional ao longo da bacia, o que resultou em uma piora na exposição de edificações. Essa expansão e adensamento ocorreram de forma mais abrangente, afetando tanto a região a jusante e a montante quanto a região central, que se expandiu para os lados. Na região a jusante, onde o indicador já era inicialmente alto, o adensamento populacional se intensificou ainda mais, levando a um aumento considerável no indicador de exposição de infraestrutura. Isso significa que as pessoas nessa área estão sujeitas a um maior risco devido à maior concentração de edificações.

No Cenário 2, pode-se notar que tanto a região a jusante quanto a região a montante apresentam uma melhora significativa no indicador de exposição de infraestrutura. Isso indica que as medidas adotadas no Cenário 2 contribuíram para reduzir a exposição nessas áreas. No entanto, é importante ressaltar que mesmo com a realocação de pessoas de áreas de risco, a expansão controlada e a diminuição dos riscos na região a montante, por exemplo, ainda existem desafios a serem enfrentados. É necessário garantir

que a infraestrutura e os serviços sejam adequados para suportar o adensamento populacional, além de considerar medidas específicas de mitigação de riscos.

Considerando o novo Indicador de Exposição de Infraestrutura para os cenários de crescimento urbano em 2050, e considerando que os outros indicadores não se modificam, para simplificação na aplicação da metodologia, as Figuras Figura 6.12 e Figura 6.13 apresentam o resultado do Índice de Vulnerabilidade para a Bacia do Rio Piraguê-Cabuçu no Rio de Janeiro em 2050.

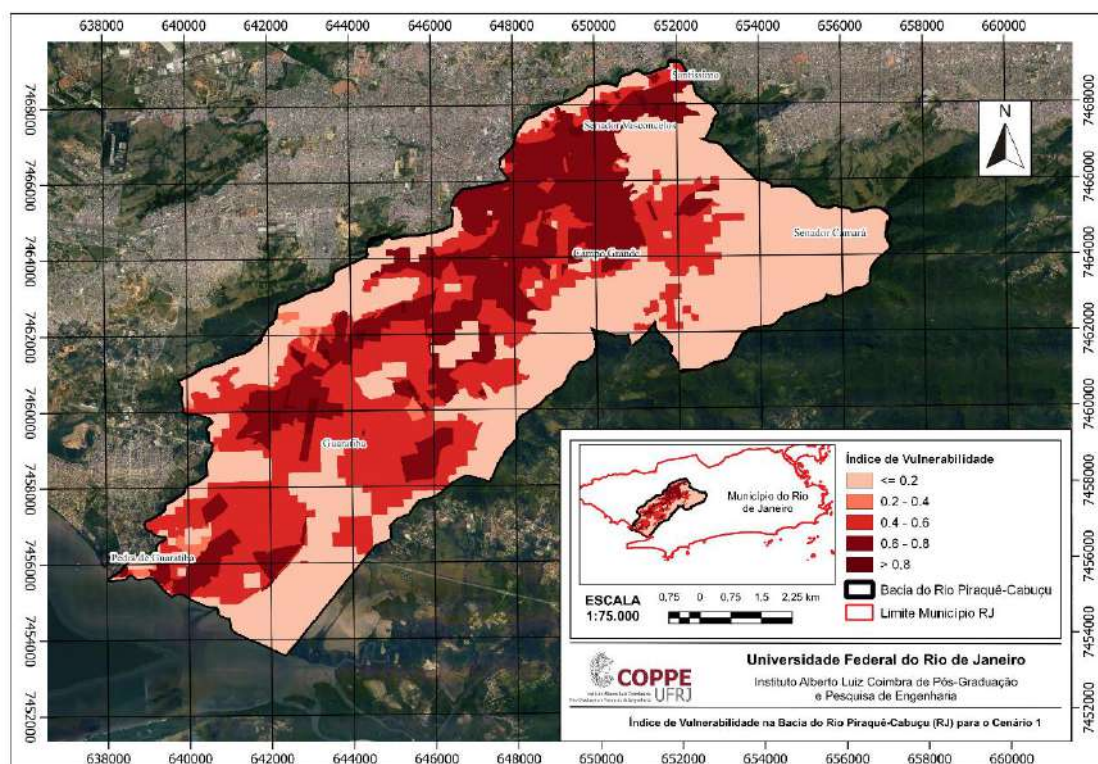


Figura 6.12: Mapa com distribuição espacial do Índice de Vulnerabilidade para o Cenário 1.

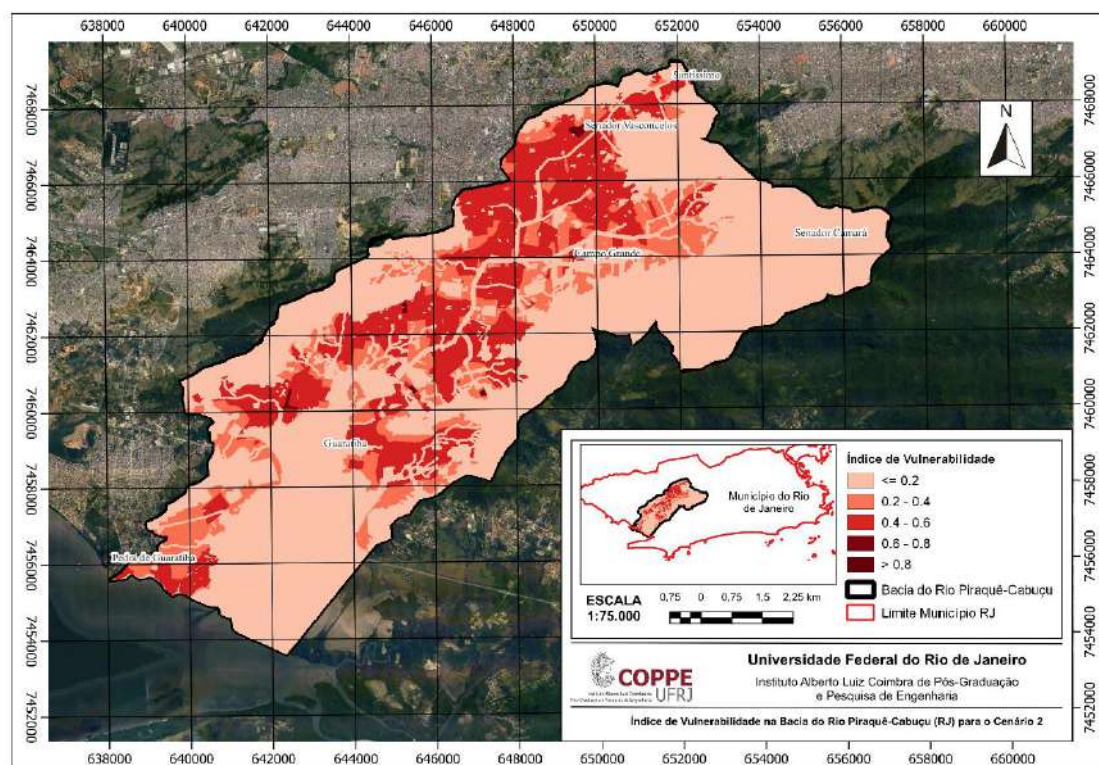


Figura 6.13: Mapa com distribuição espacial do Índice de Vulnerabilidade para o Cenário 2.

6.3.3 Aplicação do Índice de Risco Potencial a Inundações (IRPI)

A análise minuciosa do risco potencial de inundações em cenários futuros de urbanização revela *insights* valiosos. Esse índice pode desempenhar um papel importante ao fornecer informações essenciais para orientar os tomadores de decisão na identificação de áreas com maior vulnerabilidade e susceptibilidade a inundações, permitindo uma distribuição mais eficiente de investimento e esforços no sentido de reduzir a vulnerabilidade e gerenciar o risco de inundações.

A compreensão da distribuição espacial do risco potencial de inundações nos cenários futuros de urbanização possibilita uma visão sobre tendências que afetam as áreas analisadas. Após a modificação introduzida nos indicadores, para fins de teste de seu uso em previsões futuras, o Índice de Risco Potencial de Inundações (IRPI), para cada um dos cenários de urbanização propostos, pode ser ilustrado nas Figuras Figura 6.14 e Figura 6.15.

Ao examinar os resultados obtidos, é possível identificar áreas com maior tendência de ocorrência de processos relacionados a inundações, representadas por cores mais intensas. Essas áreas indicam locais de maior risco potencial, onde a combinação da vulnerabilidade da população residente com a susceptibilidade física da bacia hidrográfica resulta em uma maior probabilidade de ocorrência de inundações. Essas informações são cruciais para embasar ações e políticas públicas que visem mitigar os efeitos das inundações, direcionando recursos e investimentos de forma estratégica.

Além disso, a análise revela mudanças significativas nas classes de risco ao longo da bacia hidrográfica nos diferentes cenários, com alterações mais marcantes no baixo curso, particularmente nos bairros de Guaratiba e Pedra de Guaratiba. Essas áreas apresentam um aumento expressivo do risco potencial, indicando uma maior exposição das edificações e da população residente a eventos de inundação.

No Cenário 1, pode-se observar um intenso espalhamento populacional e as consequentes mudanças no indicador de impermeabilização do solo e a exposição das edificações são amplamente disseminadas ao longo da bacia hidrográfica. O risco potencial de inundações é potencializado em regiões que já apresentavam alto risco, em relação ao cenário atual, e expandido ao redor dessas regiões, principalmente a jusante da bacia, onde se localizam os maiores registros de locais de inundação, enquanto a região central expande-se para os lados.

No cenário 2, tanto a jusante quanto a montante da bacia, é perceptível a melhoria da situação mapeada pelo IRPI. Essa melhoria é resultado da realocação da população, proposta no cenário, retirando-a de áreas de alto risco e incluindo áreas de proteção permanente no cenário. Vale ressaltar que a região do Jardim Maravilha e Jardim Garrido, que anteriormente apresentava um alto índice de risco potencial, agora não mais se destacam nesse aspecto. Essa redução do risco potencial ocorre mesmo com a expansão para as “bordas” da bacia, indicando uma diminuição dos riscos na região a montante, por exemplo.

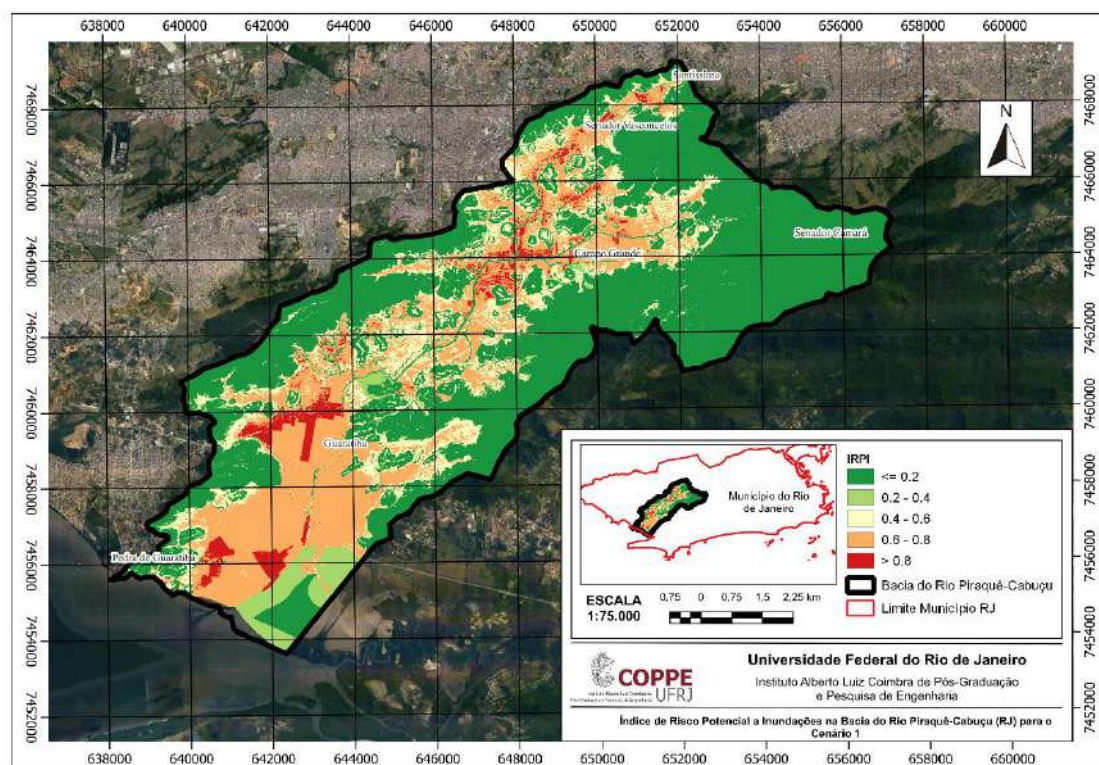


Figura 6.14: Mapa com distribuição espacial do IRPI para o Cenário 1.

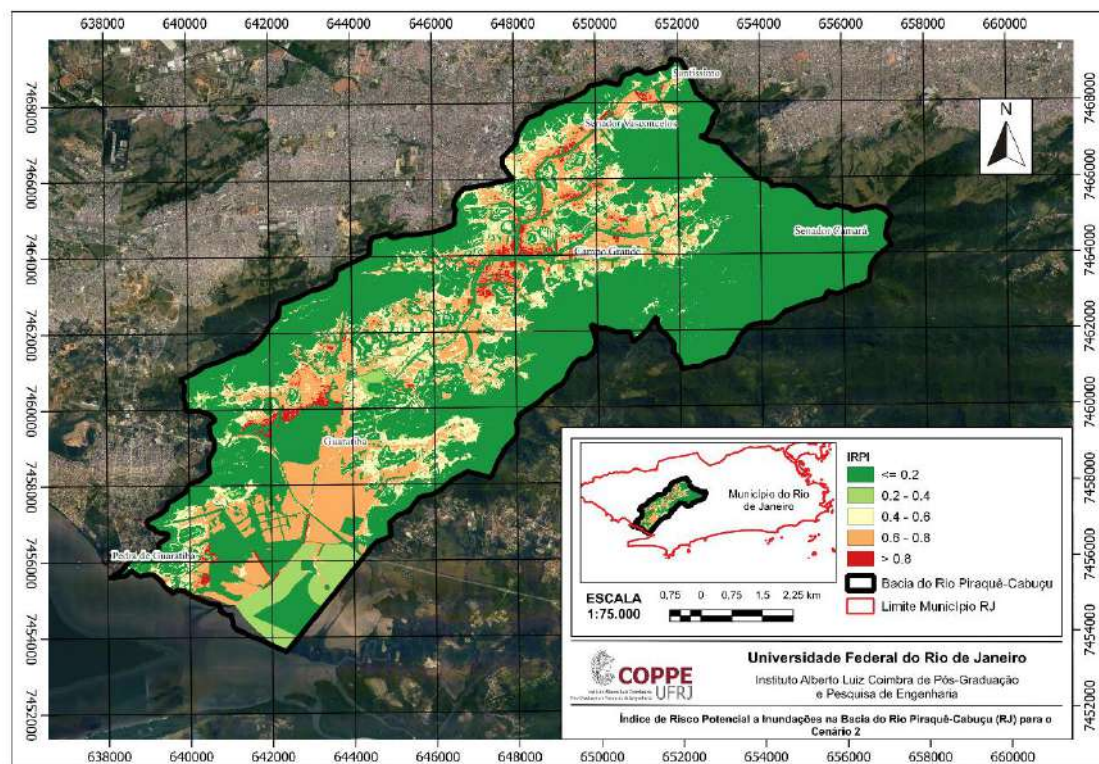


Figura 6.15: Mapa com distribuição espacial do IRPI para o Cenário 2.

7 Conclusões e Recomendações

A presente pesquisa apresentou o desenvolvimento de um índice de risco potencial, como suporte ao planejamento urbano e territorial, com vistas à ordenação do uso do solo para reduzir riscos de inundação, principalmente para áreas em desenvolvimento, em estágio inicial de urbanização, quando a exposição pode ser evitada em áreas potencialmente perigosas. Para este fim, o Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações - ISMFI (Miranda, 2016) foi revisto e remodelado para uma nova versão. A este índice, foi acrescentado um novo Índice de Vulnerabilidade – IV e o produto ponderado de ambos levou a uma nova proposta para o Índice de Risco Potencial de Inundações - IRPI.

A aplicação da nova metodologia à Bacia do Rio Piraquê Cabuçu, na zona Oeste do Rio de Janeiro, mostrou que os objetivos propostos foram plenamente alcançados e a metodologia desenvolvida demonstrou-se eficaz na identificação preliminar de áreas susceptíveis a inundações. Tal metodologia oferece uma abordagem simplificada para orientar o planejamento urbano, fornecendo *insights* estratégicos para a alocação de recursos e investimentos em locais mais vulneráveis. A aplicação do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações v2.0 (ISMFI v2.0) mostrou-se útil para a análise presente e também para possíveis futuros, uma vez que, conforme a urbanização avança, a impermeabilização do solo também se altera.

A aplicação do Índice de Vulnerabilidade (IV) permitiu tanto análises distribuídas na bacia, facilitando a comparação de diferentes cenários de urbanização. As vantagens inerentes à medição por meio de índices e indicadores incluem a transformação de dados volumosos em informações mais simples, de forma aproximada, mas objetiva, simplificando a complexidade e fornecendo uma base tangível para a formulação de políticas públicas, especialmente nas etapas preliminares de planejamento. É válido ressaltar que a construção do Índice de Risco Potencial de Inundações (IRPI) foi baseada na definição conceitual de risco, combinando o perigo potencial e as vulnerabilidades mapeadas. Importante salientar que a qualidade dos dados interfere diretamente no resultado final do índice e, de forma geral, foram escolhidos dados facilmente acessíveis, disponibilizados por órgãos governamentais locais.

O enfoque das autoridades e da população deve ser reavaliado em relação aos desafios impostos pelas cidades modernas quanto à gestão das águas urbanas e dos espaços livres.

Em síntese, os resultados obtidos destacam a viabilidade de um desenvolvimento urbano menos impactante, em consonância com a dinâmica hídrica, e realçam a utilidade dos indicadores como ferramentas de apoio ao planejamento urbano sustentável. Essas conclusões estimulam a reflexão e incentivam uma abordagem mais equilibrada na gestão das águas urbanas, visando um futuro mais resiliente e harmonioso para as comunidades urbanas.

Vale ressaltar que a pesquisa, que teve foco no desenvolvimento de uma metodologia funcional, utilizou os dados do Censo 2010, uma vez que os dados do Censo 2022 foram atualizados na finalização deste trabalho. Logo, trata-se de uma limitação temporal, mas que em nada afeta a produção e promoção da metodologia desenvolvida em si, podendo novos dados serem incorporados como um estudo posterior, para fins de validação mais precisa.

Além disso, o trabalho não esgota a discussão sobre o desenvolvimento de índices para orientar o planejamento urbano em bacias em desenvolvimento. Pelo contrário, abre precedentes para:

- Incorporação de novos indicadores socioeconômicos, que possam avaliar de maneira mais precisa cenários futuros de urbanização;
- Validação dos indicadores e índices para diferentes bacias;
- Aplicação dos índices em outros cenários de urbanização, para verificação de seu desempenho em outras realidades;
- Desenvolvimento de variante específica da metodologia, para avaliação do risco residual.

Referências Bibliográficas

AHERN, J; CILLIERS, S; NIEMELLÄ, J. **The concept of ecosystem services in adaptive urban planning and design: A framework for supporting innovation.** Landscape and Urban Planning 125, 2014. p. 254–259.

ANTHOPOULOS, LG, VAKALI, A. (2012). **Planejamento Urbano e Cidades Inteligentes: Inter-relações e Reciprocidades.** Em: , et ai. A Internet do Futuro. FIA 2012. Notas de Palestra em Ciência da Computação, vol 7281. Springer, Berlim, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30241-1_16

ARAÚJO, S. B. **Administração de desastres: conceitos & tecnologias.** Rio de Janeiro: SYGMA SMS, 2012.

ARAUJO, E. C.; RIBEIRO, N. F.; HOLZER, R. **Rios Urbanos: Contribuição para o debate sobre desnaturalização e renaturalização.** In: 7º Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável: Constrates, Contradições e Complexidades, 2016, Maceió, Alagoas.

Argue JR (ed) (2004) **WSUD: basic procedures for ‘source control’ of stormwater – a Handbook for Australian practice.** Adelaide: Urban Water Resources Centre, University of South Australia. Disponível em: <https://www.unisa.edu.au/siteassets/episerver-6-files/documents/itee/afmg/johnargue-wsud-basic-procedures-for-source-control-student-edition.pdf>. Acesso: 4 jun. 2023

ARGUE, J., 2004. **WSUD: basic procedures for ‘source control’ of stormwater – a Handbook for Australian practice.** J Argue, Editor, Urban Water Resources Centre, Univ of South Aust., Sixth Printing Feb 2011, ISBN 1 920927 18 2, Adelaide

ASCE. **Design and Construction of sanitary and storm sewers.** New York (Manuals and Reports of Engineering Practice, 37), 1969.

AVELAR, A.S., COELHO NETO, A.L., D’ORSI, R. N., 2011. **Monitoramento dos problemas de encosta na cidade do rio de janeiro frente às mudanças climáticas em curso e futuras.** In: Megacidades, vulnerabilidades e mudanças climáticas: região

metropolitana do Rio de Janeiro. Projeto megacidades, vulnerabilidades e mudanças climáticas. INPE, NEPO/UNICAMP.

BATTEMARCO, Bruna Peres. **Quadro metodológico para avaliação quantitativa de projetos de urbanização, sob a ótica da interação água e cidade.** 2020. 227 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

BERTILSSON, L.; WIKLUND, K.; DE MOURA TEBALDI, I.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; MIGUEZ, M. G. (2019). **Urban flood resilience—A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning.** Journal of hydrology, 573, 970-982.

BIRKMANN, J. (2005). **Danger Need not Spell Disaster: But How Vulnerable are We?**. Published by United Nations University Press.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Águas de chuva: engenharia das águas pluviais nas cidades.** 4. ed. rev. e ampl. Blucher, 2017. 344 p. ISBN-10: 8521212275. ISBN-13: 978-8521212270.

BRASIL. (1979). LEI Nº 6.766, DE 19 DE DEZEMBRO DE 1979. **Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências.** Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm. Acesso em: 5 fev. 2023.

BRASIL. (1988). **CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL DE 1988.** Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 5 fev. 2023.

BRASIL. (2001). LEI Nº 10.257, DE 10 DE JULHO DE 2001. **Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.** Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm. Acesso em: 5 fev. 2023.

BRASIL. (2002). LEI Nº 10.406, DE 10 DE JANEIRO DE 2002. **Institui o Código Civil.** Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/110406compilada.htm. Acesso em: 5 fev. 2023.

BRASIL. (2004). LEI Nº 10.932, DE 03 DE AGOSTO DE 2004. **Altera o art. 4º da Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, que "dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências"**. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.932.htm. Acesso em: 5 fev. 2023.

BRASIL. (2012a). LEI Nº 12.608, DE 10 DE ABRIL DE 2012. **Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nºs 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências**. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112608.htm. Acesso em: 5 fev. 2023.

BRASIL. (2012b). LEI Nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências**. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm. Acesso em: 5 fev. 2023.

BRASIL. (2015). **Manual de saneamento**. 4. ed. Brasília, DF: Presidência da República, Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde (FUNASA), 2015. 641 p. ISBN: 978-85-7346-049-0. Disponível em: https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_saneamento.pdf. Acesso em: 5 fev. 2023.

BURROUGH, P. A., MCDONELL, R. A., 1998. **Principles of Geographical Information Systems** (Oxford University Press, New York), 190 pp.

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. Editora Oficina de Textos, 2015. 384 p. ISBN-10: 8579751608. ISBN-13: 978-8579751608.

CARDONA, O. D. et al. **La noción de riesgo desde la perspectiva de los desastres: marco conceptual para su gestión integral**. Manizales: IADB/IDEA Programa de Indicadores para la Gestión de Riesgos, Universidad Nacional de Colombia, 2003.

CARDOSO, Diogo da Silva. **Reabilitação Urbana e Expansão Comercial na era da cidade polinucleada: O Re-ordenamento Territorial no “Bairro-Região” de Campo Grande (RJ)**. Revista geo-paisagem (on line). Ano 8, nº 16, 2009.

CARNEIRO, P. R. F.; Miguez, M. G. **Controle de Inundações em Bacias Hidrográficas Metropolitanas**. 1a ed. São Paulo: Annablume, 2011.

CEPED/RS-UFRGS. **Capacitação em gestão de riscos**. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. 270 p. ISBN: 978-85-66094-15-2. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Luiz-Carlos-Silva-Filho/publication/322801189_Capacitacao_em_gestao_de_riscos/links/5a70a5a8458515015e63f115/Capacitacao-em-gestao-de-riscos.pdf. Acesso em: 5 fev. 2023.

CIRIA, 2010, **Flood resilience and resistance for critical infrastructure**, C688, Project RP913, Londres, 130p.

COFFMAN, L. et al., 1998, **Low-Impact Development: Hydrologic Analysis and Design**. In: LOUCKS, Eric D (Comp.). Water Resources and the Urban Environment. Illinois: Asce, p. 1-35.

Comissão Europeia, Direção-Geral do Ambiente, **Orientações sobre as melhores práticas para limitar, atenuar ou compensar a impermeabilização dos solos**, Serviço das Publicações, 2014. Disponível em: <<https://data.europa.eu/doi/10.2779/88588>>. Acesso em: 19 fev. 2023

CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2020. **EM-DAT International Disaster Database**. Disponível em <<https://www.emdat.be/>>. Acesso em: 24 mar. 2021.

ELLIOTT, A. H. TROWSDALE, S. A. 2007. **A review of models for low impact urban stormwater drainage**. Environmental Modelling Software, 22, 394-405

EMBRAPA. **Área de Preservação Permanente (APP)**. Código Florestal. Adequação ambiental da paisagem rural. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2006. Disponível em: <https://www.embrapa.br/codigo-florestal/entenda-o-codigo-florestal/area-de-preservacao-permanente>. Acesso em: 5 fev. 2023.

FONTES, A. R. M.; BARBASSA, A. P. **Diagnóstico e Prognóstico da Ocupação e da Impermeabilização Urbanas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 2, p. 137–147, 2003.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C.F.S.; ALMEIDA, A. T. de. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. 2. Ed. São Paulo: Atlas, 2006.

GUIMARÃES, L. F.; MIGUEZ, M. G. (2020). **Supporting decision-making on urban flood control alternatives through a recovery deficit procedure for successive events**. Journal of Flood Risk Management, 1, e12596.

GUTIERREZ, A. I. R.; RAMOS, I. C. **Drenagem urbana sustentável para a concretização de metas de ODS/ONU**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/920314/drenagem-urbana-sustentavel-para-a-concretizacao-de-metas-de-ods-onu>>. Acesso em 25 fev. 2023.

HONDA, Sibila Corral De Arêa Leão, et al. **Planejamento ambiental e ocupação do solo urbano em Presidente Prudente (SP)**. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, vol. 7, no 1, abril de 2015, p. 62–73. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2175-3369.007.001.AO04>>. Acesso em: 08 fev. 2023

IBGE, 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**.

IBGE, 2015. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa nacional por amostra de domicílios: PNAD: microdados**, 2015. Rio de Janeiro.

IBGE, 2016. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Grade Estatística**.

INSTITUTO PEREIRA PASSOS (IPP). **Armazém de Dados do IPP**, 2016.

KELMAN, I. 2003. **Defining Risk**. FloodRiskNet Newsletter, issue 2, Winter 2003, pp. 6-8. Disponível em: <<http://goo.gl/yOR5RA>> Acesso em: 04/07/2023.

KOKS, E. E.; JONGMAN, B.; HUSBY, T. G.; BOTZEN, W. J. W. **Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management**. Environmental Science and Policy, [s.l.], v. 47, p. 42–52, 2015.

KOZAK, D.; HENDERSON, H.; DE CASTRO MAZARRO, A.; ROTBART, D.; ARADAS, R. (2020). **Blue-Green Infrastructure (BGI) in Dense Urban Watersheds. The Case of the Medrano Stream Basin (MSB) in Buenos Aires**. Sustainability, 12, 2163.

LIAO, K. H. **A theory on urban resilience to floods – a basis for alternative planning practices**. Ecology and Society, [s.l.], v. 17, n. 4, 2012.

LOURENÇO, I. B. **Rios urbanos e paisagens multifuncionais: o projeto paisagístico na requalificação urbana e ambiental**. Dissertação de MSc., PROURB/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

MACEDO, S. S. ET AL. **Os sistemas de espaços livres na Constituição da forma urbana contemporânea no Brasil: produção e apropriação (Quapá-Sel II)**. Paisagem e Ambiente: Ensaios, [s.l.], n. 30, p. 137-172, 2012.

MACEDO, Silvio Soares; CUSTÓDIO, Vanderli; GALENDER, Fany Cutcher; QUEIROGA, Eugenio Fernandes; ROBBA, Fabio. **Os sistemas de espaços livres e a constituição da esfera pública contemporânea no Brasil**. In TERRA, Carlos e ANDRADE, Rubens. Coleção Paisagens Culturais, vol. 3. Rio de Janeiro: EBA-UFRJ, 2007, p. 286-297.

MANSUR, André Luis. **O velho oeste carioca volume II: Mais histórias da ocupação da Zona Oeste do Rio de Janeiro (De Deodoro a Sepetiba) do século XVI ao XXI: Volume 2**. Rio de Janeiro: Ibis Libris, 2011.

MANSUR, André Luis. **O velho oeste carioca: História da ocupação da Zona Oeste do Rio de Janeiro (De Deodoro a Sepetiba) do século XVI aos dias atuais**. Rio de Janeiro: Ibis Libris, 2008.

MARSH, W. **Landscape planning: environmental applications**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

MASCARENHAS F. C. B.; MIGUEZ, M. G.; 2002. **Urban Flood Control through a Mathematical Cell**. In: Water International Resources, Vol. 27, Nº 2, págs. 208-218, Junho 2002; Illinois, E.U.A.

MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G., 1994, **Modelação de Grandes Planícies de Inundação por um Esquema de Células - Aplicação ao Pantanal de Mato-Grosso**. Revista Brasileira de Engenharia (RBE), Caderno de Recursos Hídricos, v.12, n.2.

MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G.; MAGALHÃES, L. P. C. DE; PRODANOFF, J. H. A., 2005, **On-site stormwater detention as an alternative flood control measure in ultra-urban environments in developing countries**. IAHS-AISH Publication, v. 293, p. 196-202.

MICHAELIS. **Moderno dicionário da língua portuguesa**. São Paulo: Melhoramentos, 1998. Dicionários Michaelis, 2259 p.

MIGUEZ, M. G.; DI GREGORIO, L. T.; VERÓL, A. P. **Gestão de riscos e desastres hidrológicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P. **City growth and urban drainage alternatives: Sustainability challenge**. Journal of Urban Planning and Development, v. 141, n. 3, p. 1–10, 2015.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P. **A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design**. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2016.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P. **A catchment scale integrated flood resilience index to support decision making in urban flood control design**. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2016.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P. **A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design**. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2016.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; BATTEMARCO, B. P. et al. **A framework to support the urbanization process on lowland coastal areas: Exploring the case of Vargem Grande – Rio de Janeiro, Brazil.** Journal of Cleaner Production, [s.l.], v. 231, p. 1281–1293, 2019.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; RÊGO, A. Q. S. F. et al. **Urban Agglomeration and Supporting Capacity: The Role of Open Spaces within Urban Drainage Systems as a Structuring Condition for Urban Growth.** In: Urban Agglomeration. Croácia: InTech, 2018. p. 3–28.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem Urbana: do Projeto Tradicional à Sustentabilidade.** 1a ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

MIGUEZ, M.G., 2001, **Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas.** Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIGUEZ, M.G., MAGALHÃES, L.P.C., 2010, **Urban Flood Control, Simulation and Management: an Integrated Approach.** In: A. C. Pina Filho, A. C. de Pina. (Org.). Methods and Techniques in Urban Engineering. 1ed.Viena: INTECH Education and Publishing, v. 1, p. 131-160.

MIGUEZ, M.G.; MASCARENHAS, F.C.B.; MAGALHÃES, L.P.C. de, 2005, **Multifunctional landscapes for urban flood control in developing countries.** In: Second International Conference on Sustainable Planning & Development, 2005, Bologna/Italy. Proceedings of the Sustainable Planning 2005. Southampton and Boston: WITpress – Wessex Institute of Technology.

MIGUEZ, M.G.; VERÓL, A. P.; DE SOUSA, M. M. et al. **Urban floods in lowlandslevee systems, unplanned urban growth and river restoration alternative: A case study in Brazil.** Sustainability (Switzerland), v. 7, n. 8, p. 11068–11097, 2015.

MIGUEZ, Marcelo Gomes; VERÓL, Aline Pires; CARNEIRO, P. R. F. **Sustainable drainage systems: an integrated approach, combining hydraulic engineering design, urban land control and river revitalisation aspects.** Drainage Systems, 2012.

MIGUEZ, Marcelo Gomes; VERÓL, Aline Pires; REZENDE, Osvaldo Moura. **Drenagem urbana. Do projeto tradicional à sustentabilidade.** Editora Campus, 2015. 384 p. ISBN-10: 8535277463. ISBN-13: 978-8535277463.

Ministério das Cidades; IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios.** Brasília: MCidades; IPT, 2007. Disponível em: < <http://goo.gl/rYX7IK>>. Acesso em: 15 jun. 2023.

MIRANDA, F. M. **Índice De Susceptibilidade Do Meio Físico a Inundações Como Ferramenta Para O Planejamento Urbano.** Dissertação de MSc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

MOREIRA, L.L.; KOBIYAMA, M. (2021). **Panorama de estudos sobre índice de vulnerabilidade às inundações no Brasil através de revisão bibliográfica.** Revista Caminhos de Geografia. V.22, n. 79, p. 309 – 320.

NUNES, Cláudio C.; **Precipitações intensas, hidrologia de superfície e uso do solo na Bacia do rio Cabuçu-Piraquê,** RJ. RJ: UERJ, 1992. (monografia para obtenção de título de Bacharel em geografia)

O GLOBO. **Estudo aponta que crescimento do Rio será maior em áreas de milícia e sujeitas a desastres.** Jornal O Globo Rio, 2021. Disponível em: < <https://oglobo.globo.com/rio/estudo-aponta-que-crescimento-do-rio-sera-maior-em-areas-de-milicia-sujeitas-desastres-1-25079755>>. Acesso em: 17 dez. 2021.

OC WATERSHEDS CALIFORNIA. **Best management practices (bmp).** OC Environmental Resources, 2022. Disponível em: <https://ocerws.ocpublicworks.com/service-areas/oc-environmental-resources/oc-watersheds/documents/best-management-practices-bmp>. Acesso em: 5 fev. 2023.

ONU – Organização das Nações Unidas. **ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 205.** Publicado em 2019. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>>. Acesso em: 11 jan. 2022.

ONU. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil.** Nações Unidas no Brasil (ONU-Brasil), 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 5 fev. 2023.

PELLEGRINI, J. A. C. **Caracterização da Planície Hipersalina (Apicum) Associada a um Bosque de Mangue em Guaratiba, Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro - RJ.** Dissertação de MSc., Mestrado em Ciências, área de Oceanografia Biológica - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PESSOTTO, Wellerson. **Zoneamento de risco à inundação de Dom Pedrito-RS.** 2020. 144 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/25703/DIS_PPGAUP_2020_PESSOTTO_WELLERSON.pdf. Acesso em: 5 fev. 2023.

PRODANOFF, J. H. A. **Qualidade das Águas em Inundações Urbanas.** Cap 6. IN: Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos no Âmbito Regional e Urbano. NUNES, R. T. S. et. al. (org). Rio de Janeiro: Editora Interciência, Coleção Mudanças Globais, vol. 1, 2011.

QUEIROGA, E. F. **Sistemas de espaços livres e esfera pública em metrópoles brasileiras.** Resgate: Revista Interdisciplinar de Cultura, [s.l.], v. XIX, n. 21, p. 25-35, 2011.

RAN, J.; NEDOVIC-BUDIC, Z. **Integrating spatial planning and flood risk management: A new conceptual framework for the spatially integrated policy infrastructure.** Computers, Environment and Urban Systems, [s.l.], v. 57, p. 68-79, 2016.

REZENDE, O. M. **Integração de Ferramentas de Manejo das Águas Pluviais no Processo de Planejamento do Território para Redução dos Riscos de Inundação e Incremento da Resiliência das Cidades.** Tese de DSc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

REZENDE, O. M. **Integração de ferramentas de manejo das águas pluviais no processo de planejamento do território para redução dos riscos de inundação e incremento da resiliência das cidades.** Tese de DSc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

RIBEIRO, N. F. **Rios Urbanos e as Relações do/no Espaço Livre (Estudo de Caso Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, Zona Oeste do Rio de Janeiro).** Dissertação

(Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - PPGAU, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

RIO DE JANEIRO, 2010 – Subsecretaria de gestão de bacias hidrográficas - Rio-Águas. **Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana**. 1ª. Versão - Dezembro 2010. RIO-ÁGUAS, Secretaria Municipal de Obras, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RIO DE JANEIRO. (1977). Decreto nº 1269 de 27 de outubro de 1977. **Aprova o Plano Urbanístico Básico da Cidade do Rio de Janeiro - PUB-RIO, e dá outras providências**. Disponível em:

<http://www2.rio.rj.gov.br/smu/buscafacil/Arquivos/PDF/D1269M.PDF>. Acesso em: 5 fev. 2023.

RIO DE JANEIRO. (2010). Decreto nº 42.356 de 16/03/2010. **Dispõe sobre o tratamento e a demarcação das faixas marginais de proteção nos processos de licenciamento ambiental e de emissões de autorizações ambientais no Estado do Rio de Janeiro e dá outras providências**. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=159053>. Acesso em: 5 fev. 2023.

RIO DE JANEIRO. (2011). LEI COMPLEMENTAR Nº 111*, DE 1º DE FEVEREIRO DE 2011 (D.O. CÂMARA, 29/3/2011). **Dispõe sobre a Política Urbana e Ambiental do Município, institui o Plano Diretor no Rio de Janeiro e dá outras providências**. Disponível em:

http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/4600307/4117400/lei_compl_111.pdf. Acesso em: 5 fev. 2023.

RIO DE JANEIRO. PDMAP. **Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da cidade do Rio de Janeiro**. Prefeitura do Rio de Janeiro - Rio Águas, 2012.

RIO DE JANEIRO. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral – **Plano Urbanístico Básico da Cidade do Rio de Janeiro: PUB-Rio**, Rio de Janeiro, 1977, 280 p.

ROOS, Matthijs M. D.; HARTMANN, Thomas T.; SPIT, Tejo T. J. M.; JOHANN, Georg G. **Constructing risks – Internalisation of flood risks in the flood**

risk management plan. Environmental Science and Policy, [s.l.], v. 74, p. 23-29, may 2017.

SAMUELS, P.; GOULDBY, B. (2009). **Language of Risk – Project Definitions** (Second Edition). Integrated Flood Risk. Analysis and Management Methodologies

SAYERS, Paul; YUANYUAN, Li; GALLOWAY, Gerry; PENNING-ROUSELL, Edmund; FUXIN, Shen; KANG, Wen; YIWEI, Chen; QUESNE, Tom Le. **Flood risk management. A strategic approach. Part of a series on strategic water management.** Asian Development Bank (ADB); General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources (GIWP); UNESCO; WWF International, 2013. Disponível em: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/30246/flood-risk-management.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2023.

SERPA, A. **Milton Santos e a paisagem: parâmetros para a construção de uma crítica da paisagem contemporânea.** Paisagem e Ambiente, [s.l.], n. 27, 2010.

SERRAO-NEUMANN, S. et al. **Connecting land-use and water planning: prospects for an urban water metabolism approach.** Cities, [s.l.], v. 60, p. 13-27, 2017.

SILVA, G. C. O. E. **Uso de instrumentos da gestão do risco de cheias como ferramenta no planejamento urbano.** Tese de DSc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

SOUZA, Christopher Freire; CRUZ, Marcus Aurélio Soares; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbanas.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [s.l.], v. 17, n. 2, p. 9-18, abr./jun, 2012. Disponível em: <<https://biblat.unam.mx/hevila/Revistabrasileiraderecursoshidricos/2012/vol17/no2/1.pdf>>. Acesso em: 5 fev. 2023.

SOUZA, L.A.; SOBREIRA, F.G. 2013. **Guia para Elaboração de Cartas Geotécnicas de Aptidão à Urbanização Frente aos Desastres Naturais.** 68p.

TAKEDA, T. **Uso e ocupação do solo urbano.** 2013. Texto publicado em: http://www.jurisway.org.br/v2/dhall.asp?id_dh=12363 Acesso: 17/09/2015

TARDIN, R. **Espaços livres: sistema e projeto territorial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Rio Book's, 2016.

TASSINARI, Lucas Camargo da Silva. **Dimensionamento de sistemas de drenagem pluvial utilizando métodos de baixo impacto**. 2014. 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2014. Disponível em: http://www.ct.ufsm.br/engcivil/images/PDF/1_2014/TCC_LUCAS%20CAMARGO%20ODA%20SILVA%20TASSINARI.pdf. Acesso em: 5 fev. 2023.

TEBALDI, I. M. **Planejamento e gestão da paisagem nos sistemas de drenagem urbana**. In: XXXVI Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural (JICTAC-2014). Rio de Janeiro: UFRJ, 2014.

TEBALDI, I. M; MIGUEZ, M. G; BATTEMARCO, B. P. **Índice de resiliência a inundações: aplicação para a sub-bacia do Rio Joana, Rio de Janeiro, RJ**. In: Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Brasília: ABRH, 2015. p. 1–8.

TEBALDI, I., MIGUEZ, M. G., BATTEMARCO, B. P., REZENDE, O. M., VERÓL, A. P., 2015. **Índice de resiliência a inundações: Aplicação para a sub-bacia do rio Joana, Rio de Janeiro, RJ**. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos-SBRH, 2015, Brasília, DF/Brasil. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos-SBRH. Bento Gonçalves, RS/Brasil: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015.

TINGSANCHALI, T. **Urban flood disaster management**. Procedia Engineering, [s.l.], v. 32, p. 25-37, 2012.

TINGSANCHALI, T., 2012, **Urban flood disaster management**, Procedia Engineering 32, p. 25 - 37. Ed. Elsevier Ltd. (doi:10.1016/j.proeng.2012.01.1233).

TUCCI, C. E. M. 2007. **Inundações Urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA. 393p

TUCCI, Carlos E. M. **Gestão da drenagem urbana**. Brasília, DF: CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, 2012. (Textos para Discussão CEPAL-IPEA, 48).

UNIÃO EUROPEIA. **DIRECTIVA 2007/60/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 23 de Outubro de 2007 relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações.** Jornal Oficial da União Europeia, 6 nov. 2007. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0060&from=EN>. Acesso em: 5 fev. 2023.

UNISDR, 2011, **Revealing Risk, Redefining Development: The 2011 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction.** Disponível em: <<https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-disaster-risk-reduction-2011>>. Acesso em 30 fev. 2022.

VERÓL, A. P. **Requalificação fluvial integrada ao manejo de águas urbanas para cidades mais resilientes.** Tese de DSc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

VERÓL, A.P. (2013). **Requalificação Fluvial Integrada ao Manejo de Águas Urbanas para Cidades mais Resilientes.** Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VERÓL, A.P.; BIGATE LOURENÇO, I.; FRAGA, J.P.R.; BATTEMARCO, B.P.; LINARES MERLO, M.; CANEDO DE MAGALHÃES, P.; MIGUEZ, M.G. (2020). **River Restoration Integrated with Sustainable Urban Water Management for Resilient Cities.** Sustainability, 12, 4677.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., and Shaffer, P.: **The SUDS manual**, Published by CIRIA, 606 pp. London, 2007.

YAMAGATA, Y.; MARUYAMA, H. (EDS.). **Urban Resilience.** Cham: Springer International Publishing, 2018.

ZANANDREA, Francie; SILVEIRA, André Luiz Lopes da. **Uso de técnicas de low impact development no controle de impactos hidrológicos.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.l.], v. 24, n. 6, p. 1195-1208, nov./dez. 2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019188729. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/6pP5WB7TrrCt4jPtRZy5g4K/?format=pdf>. Acesso em: 5 fev. 2023.

ZANO BETTI, D.; LORGERÉ, H.; PREISSMAN, A. et al. **Mekong Delta Mathematical Program Construction**. Journal of the Waterways and Harbours Division, v. 96, n. WW2, p. 181–199, 1970.

ZONENSEIN, Juliana. **Índice de risco de cheia como ferramenta de gestão de enchentes**. 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://www.coc.ufrj.br/es/tesis-de-maestria/462-2007/6502-juliana-zonensein>. Acesso em: 5 fev. 2023.