

Nome Da Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro – Programa de Engenharia Civil - COPPE

Nome do Trabalho: O Sistema de Drenagem como Eixo Estruturante do Planejamento Urbano: Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Acari

Curso: Engenharia Civil

Nível: Mestrado

Autor: Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Avaliadores: Paulo Canedo de Magalhães; Raquel Hemerly Tardin Coelho; Paulo Luiz da Fonseca

O SISTEMA DE DRENAGEM COMO EIXO ESTRUTURANTE DO PLANEJAMENTO URBANO: CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ACARI

Resumo: Nas últimas décadas, o Rio de Janeiro observou um forte vetor de crescimento urbano desordenado, associado a um planejamento muitas vezes inadequado. Diversas áreas com valor ambiental, em particular áreas inundáveis, foram ocupadas sem nenhum tipo de ordenamento. Estas ocupações, além de expostas ao perigo de inundações, acabam por aumentar escoamentos superficiais e picos de vazões devido à impermeabilização do solo e à supressão de espaços antes destinados para o espraiamento dos rios. Esta degradação do espaço acaba por afetar todos os sistemas que compõem a cidade. Pessoas e habitações são expostas a inundações; doenças de veiculação hídrica, pela mistura de águas pluviais com esgoto e lixo, proliferam; os eixos de transportes são paralisados temporariamente, causando transtornos aos usuários; e oportunidades econômicas são perdidas, seja pelo prejuízo causado diretamente pelas inundações ou pela falta de segurança em relação às enchentes, o que afasta os investimentos nestes locais. Desta forma, este trabalho incentiva que o planejamento do sistema de manejo de águas pluviais deva preceder a determinação de uso e ocupação do solo, sendo a drenagem o eixo estruturante do planejamento. Para isso, serão realizadas simulações matemáticas para a bacia do Rio Acari, estudo de caso, que quantifiquem os ganhos urbanísticos trazidos pela mitigação das inundações, em relação aos eixos de habitação, saneamento, transporte, equipamentos comunitários e economia. Além disso, o trabalho traz como principal solução para os problemas de inundações, onde o planejamento urbano não foi sensível às demandas naturais de passagem das inundações, o conceito de drenagem urbana sustentável e resiliente às inundações, com a alocação dos volumes de água provenientes de inundações utilizando um sistema de espaços livres urbanos de forma integrada e multifuncional.

Palavras Chave: Drenagem Estruturante do Planejamento; Sistema de Espaços Livres; Planejamento Urbano

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	4
2	OBJETIVOS.....	8
2.1.1	Objetivo Geral	8
2.1.2	Objetivos Específicos	8
3	JUSTIFICATIVA.....	9
4	METODOLOGIA	10
5	RESULTADOS	15
5.1	DIAGNÓSTICO DA BACIA DO RIO ACARI.....	15
5.1.1	Diagnóstico do Setor de Manejo de Águas Pluviais.....	15
5.1.2	Diagnóstico dos Espaços Livres	16
5.1.3	Interação do setor de manejo de águas pluviais com outros eixos estruturantes na Situação Atual	18
5.2	CONSTRUÇÃO DO PROJETO PARA MITIGAÇÃO DAS INUNDAÇÕES APOIADO EM UM SISTEMA DE ESPAÇOS LIVRES	21
5.3	PROGNÓSTICO DA BACIA DO RIO ACARI	29
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização tende a introduzir alterações significativas no ambiente natural, notadamente nos padrões de uso do solo, provocando uma série de processos que modificam a qualidade, tanto do ambiente natural, tanto quanto do ambiente construído. A remoção da vegetação, a impermeabilização que segue esse processo para implantação da urbanização, a regularização de superfícies e a introdução de sistemas artificiais de drenagem modificam significativamente o padrão de escoamentos, produzindo maiores e mais rápidas respostas dos escoamentos superficiais e menores oportunidades de infiltração, o que resulta em incremento de vazões de pico, redução de vazões de base, redução do tempo de concentração da bacia e perda de ecossistemas fluviais (MIGUEZ et al., 2015).

Fatores como o acúmulo de lixo nas redes de drenagem (CHANDRASENA, 2017) ou a impermeabilização descontrolada de determinadas áreas e o consequente aumento do escoamento superficial (SILVEIRA, 2002) fazem com que os tempos de recorrência de falha para o qual foram dimensionadas as redes de drenagem sejam reduzidos e os volumes de água não captados pelo sistema de drenagem sejam aumentados, tornando as inundações mais severas e mais frequentes, além de agravar os danos sobre a cidade.

Com isso, um resultado frequente observado nas cidades é a desvalorização dos rios, que, degradados, poluídos e sem vida, acabam se confundindo com “valões” de esgoto e lixo (WALSH et al., 2005; PARKINSON e MARK, 2005), ou são canalizados, enterrados e escondidos, se perdendo como elemento da paisagem, empobrecendo a biodiversidade urbana, gerando problemas de saúde pública, desvalorização do ambiente construído, perda de oportunidades de lazer, entre outros problemas (McKEE et al., 2003; CAPPS et al., 2016). As cheias urbanas geram danos a edificações e a equipamentos urbanos, degradam e empobrecem áreas sujeitas à inundação, geram perdas associadas à paralisação de negócios e serviços, interrompem a circulação de pedestres e de sistemas de transportes, são potenciais veículos de difusão de doenças, afetam e são afetadas pela coleta e disposição de esgotos e resíduos sólidos urbanos. O sistema se fragiliza, os riscos e os prejuízos crescem e forma-se um ciclo: o rio, que tem sua bacia modificada, se degrada e sofre inundações, que, por sua vez, agridem de volta à cidade, causando a ruptura de vários serviços urbanos e diversas perdas econômicas, degradando a própria cidade, como resposta (MIGUEZ et al., 2015; MAGALHÃES e MIGUEZ, 2018). A Figura 1.1 apresenta de forma esquemática o ciclo de degradação da cidade ocasionado pelas falhas no sistema de drenagem urbana.



Figura 1.1 – Ciclo de degradação da cidade ocasionado pelas falhas no sistema de drenagem urbana.
Fonte: Autor.

Desta forma, as inundações e alagamentos surgem como um elemento de interrupção dos serviços urbanos, de redes de infraestrutura, do funcionamento de equipamentos comunitários e do sistema de habitação. A cidade falha, em um efeito dominó, em que os diversos sistemas não sustentam suas funções.

Visto que o problema da inundação está diretamente relacionado à alocação de espaço nas cidades, este aspecto aponta para a identificação de espaços livres relativos às dinâmicas da água para orientar o planejamento do uso do solo e facilitar a manutenção dos serviços ambientais associados às funções hidrológicas naturais. Quando essa preocupação precede o desenvolvimento da cidade e participa das primeiras etapas do planejamento urbano, é possível projetar cidades melhores, menos expostas a perigos e, portanto, com menos riscos. No entanto, ao tentar mitigar as inundações, em uma cidade já desenvolvida, o uso de espaços livres remanescentes com características multifuncionais pode oferecer volumes para reordenar os padrões de escoamento, em um arranjo que combina funções ambientais, de infraestrutura e de lazer para atender a essa demanda. Neste caso, utilizam-se os espaços livres remanescentes com a lógica multifuncional para acomodar as diversas atividades que concorrem no mesmo espaço.

O espaço livre urbano oferece uma ampla gama de benefícios para os cidadãos de uma comunidade. Parques e áreas naturais podem ser usados para recreação; zonas húmidas e florestas podem fornecer habitat de vida selvagem; fazendas e florestas podem proporcionar benefícios estéticos para os moradores do entorno, áreas vegetadas podem reduzir os efeitos de

impermeabilidade e espaços livres, em geral, podem fornecer volumes para armazenar as águas das chuvas (McCONNELL, 2005).

Um contexto em que prevalecem os conceitos de drenagem urbana sustentável exige soluções integradas ao planejamento e crescimento urbano, criando condições para revitalizar a paisagem urbana e recuperar valores ambientais naturais (European Commission, 2012). Portanto, o presente trabalho propõe a hipótese de que o sistema de drenagem conectado com o planejamento de espaços livres deve ser visto como um catalisador de mudança nos padrões de escoamento e a relação dos cursos d'água com a cidade, quando a mitigação de inundações é necessária, bem como um condutor para ordenar espaços urbanos, ao trabalhar com antecedência na fase de prevenção de riscos de inundação (MIGUEZ et al., 2018).

Propõe-se que se considere uma abordagem ecossistêmica para o tratamento de rios em áreas urbanas, com o objetivo de ampliar o conceito de Waterfront Design (WU, 2016.), no qual se procura valorizar a linha de contato entre o urbano e os corpos d'água, reintroduzindo estes na paisagem da cidade, para uma possibilidade mais ampla, usando a presença da água como um valor urbano e como um valor ecológico, como um elemento de conexão da cidade com a natureza. A perspectiva de incorporar conceitos de sustentabilidade ambiental no processo de repensar o crescimento da cidade abre um diversificado conjunto de oportunidades a serem explorados como soluções integradas em um contexto multidisciplinar (MIGUEZ, 2018). Ações no tecido urbano, tendo o controle de uso do solo urbano como pano de fundo e ações no corredor fluvial, tendo o controle do rio como síntese do território, são ações que devem se combinar no caminho de uma construção mais sustentável para o funcionamento das cidades, tomando esse eixo como estruturante da paisagem (MAGALHÃES e MIGUEZ, 2018).

Neste aspecto, como resultado prático, este trabalho visa contribuir com soluções para bacia urbanas hidrográfica, fornecendo uma metodologia replicável para ordenar o uso do solo, evitando o agravamento das inundações e dando oportunidades para integrar as necessidades ambientais e urbanas, melhorando a resiliência da cidade a inundações. Além disso, visa confirmar a hipótese anterior, comprovando que o sistema de drenagem urbana deve ser tomado como um eixo estruturante e precedente para fins de planejamento urbano usando sempre espaços livres de ocupação e de redes de infraestrutura urbana como fornecedores de volumes para o controle de inundações.

Embora este trabalho foque e aprofunde as discussões apenas no funcionamento do setor de drenagem urbana, é indispensável que os espaços livres identificados subsidiem um sistema que oferte outras funções a cidade. Com um caráter multifuncional e de forma a melhorar a

resiliência e os serviços ecossistêmicos o Sistema de Espaços Livres suportado pelos espaços identificados para a drenagem deve contar com aspectos relativos à vulnerabilidade social, manutenção de vegetação, qualidade do ar, melhoria das ilhas de calor urbanas e conectividade de paisagem (MEEROW & NEWELL, 2017) entre outras funções que podem ser observadas para cada especificidade urbana.

A bacia hidrográfica do Rio Acari, apresentada na Figura 1.2, é uma das maiores e mais populosas do município do Rio de Janeiro. Foi escolhida como estudo de caso, pois existem inúmeros problemas de drenagem urbana e consequente degradação do ambiente natural e do ambiente construído, sendo uma área reconhecida por suas necessidades urgentes de infraestrutura social e urbana. Um estudo anterior desenvolvido para esta região (GUIMARÃES, 2016) mostrou que a população que vive lá não é capaz de se recuperar de perdas de inundação ao longo de um horizonte de 50 anos, mesmo ao analisar períodos de baixa recorrência (como 2 anos, por exemplo)

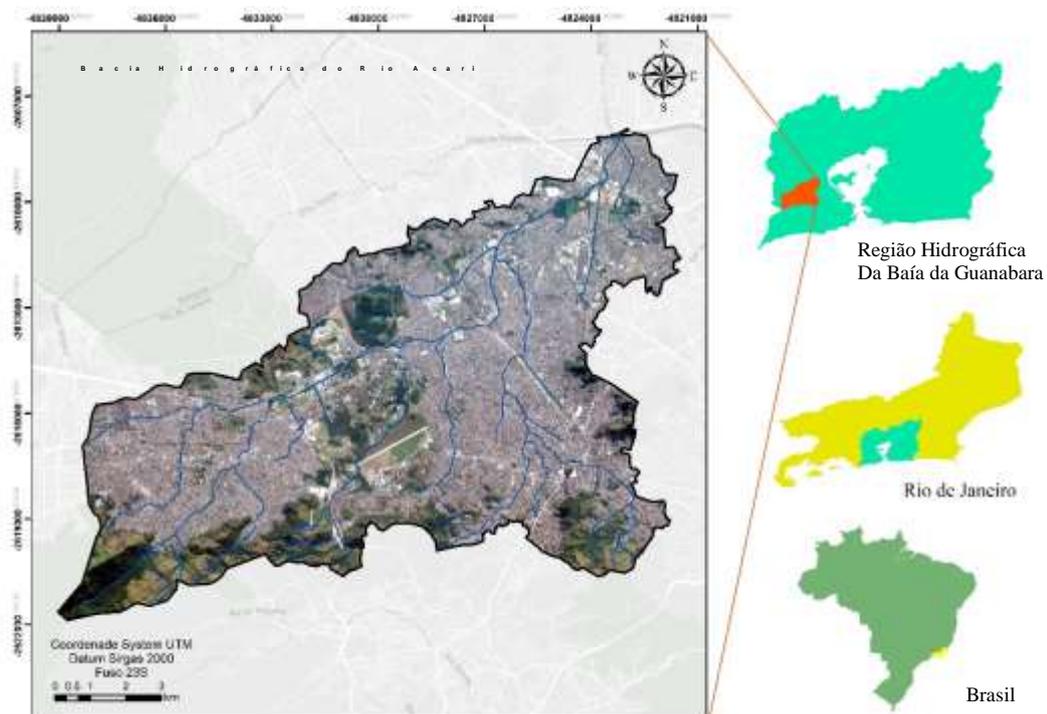


Figura 1.2 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Acari.

2 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo Geral

O objetivo Geral deste trabalho é:

- Discutir o sistema de manejo de águas pluviais como estruturador do espaço para desenvolver cidades mais sustentáveis e resilientes através da proposição de alternativas para mitigação das inundações, conciliando demandas naturais e urbanas.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Discutir a importância da preservação de espaços para as inundações no processo de planejamento, permitindo um melhor convívio da cidade com as inundações naturais, minimizando riscos e impactos;
- Utilizar o conceito de drenagem urbana sustentável como premissa para mitigação dos problemas de inundações, quando falhas do planejamento propiciam a materialização dos riscos de inundação;
- Simular matematicamente diversos cenários de intervenção e construir um projeto para mitigar os graves problemas de macrodrenagem já instalados na Bacia do Rio Acari, com obras multifuncionais, propiciando condições favoráveis de desenvolvimento de outros setores de planejamento urbano;
- Auxiliar a construção de um Sistema de Espaços Livres (SEL) que dê suporte a prevenção e mitigação do risco de inundação, assim como a preservação do ambiente natural e a possibilidade de ofertas de serviços multifuncionais para a cidade;

3 JUSTIFICATIVA

O Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PEDUI) foi uma iniciativa do Governo do Estado, por meio da Câmara Metropolitana. O Plano elaborou um conjunto de cenários, estratégias e instrumentos para auxiliar decisões governamentais nos anos futuros. Os conceitos propostos neste plano convergem para aqueles propostos nesta dissertação

O PEDUI contou com uma equipe de especialistas que trabalha a partir de seis eixos estruturantes da metrópole: expansão econômica; patrimônio natural e cultural; mobilidade; habitação e equipamentos sociais; saneamento e resiliência ambiental; e reconfiguração espacial.

O eixo de saneamento se subdivide nos setores de abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e manejo de águas pluviais. Segundo o diagnóstico apresentado pelo PEDUI, o setor de manejo de águas pluviais, do eixo de saneamento, apresenta-se como grande limitador ao desenvolvimento da metrópole ocasionando prejuízos e inseguranças devido ao risco de inundações ao qual estão associadas suas falhas. A UFRJ teve a oportunidade de participar da discussão e propostas de ação para o setor de manejo de águas pluviais e, em particular, o autor dessa dissertação esteve no grupo técnico que desenvolveu a parte de saneamento e resiliência ambiental.

O presente trabalho foi elaborado em paralelo com a confecção do PEDUI e diversas discussões cruzadas foram realizadas no desenvolvimento de ambos. Discussões estas, em especial, relacionadas com a consideração da drenagem como eixo estruturante do planejamento, seja pelos seus impactos sobre os outros sistemas, seja pela sua capacidade de, com um correto funcionamento, abrir possibilidades para desenvolvimento dos demais eixos estruturantes de planejamento, evitando a instalação de vetores de degradação urbana.

4 METODOLOGIA

Este item tem por objetivo organizar a sequência lógica de procedimentos metodológicos propostos por este trabalho, de forma a torná-los replicáveis em outras bacias hidrográficas urbanas.

Como primeiro passo da metodologia, tem-se a definição de uma bacia hidrográfica urbana como caso de estudo e o entendimento da sua principal rede hidrográfica. Utilizando a bacia como unidade de planejamento, identificam-se os principais cursos d'água e redes de drenagem relevantes para a escala de planejamento.

Como ferramenta de modelagem, diversos softwares são capazes de bem representar a hidrodinâmica de bacias hidrográficas urbanas complexas. Porém, quando nos deparamos com a realidade de países em desenvolvimento, percebemos que não há sempre dados topográficos e batimétricos completos. Esta ausência é um problema que pode ser solucionado pela experiência do modelador, porém, ela também impede o uso de alguns recursos de modelagem que requerem uma extensa base de dados para execução, como modelos em duas ou três dimensões. Assim, como alternativa, surge o Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) desenvolvido por Miguez (2001). MODCEL é um modelo hidrodinâmico Quasi-2D e, para seu uso, é necessário simplificar e discretizar a bacia em células de escoamento.

Após a modelação da bacia urbana considerada é necessário fazer a calibração do modelo. Dentro do processo de modelagem, a calibração é uma fundamental ação que deve preceder a utilização do modelo hidrodinâmico (TEJASWINI & SATHIAN, 2018). Para simular adequadamente o comportamento hidrodinâmico em bacias hidrográficas é necessário que seja realizada de maneira satisfatória, especialmente para melhorar a consistência do modelo e para reduzir a incerteza dos parâmetros (WANG et al., 2017).

Após o processo de calibração, o primeiro cenário a ser simulado deve ser o cenário atual, ou cenário de diagnóstico, no qual serão identificados os locais onde há maiores falhas das redes de drenagem e as regiões mais susceptíveis a inundações, além de se avaliar também as consequências sobre os elementos estruturantes da ocupação urbana e a eixos de planejamento urbano. Para esta etapa, se define uma chuva de projeto a ser utilizada e o seu tempo de recorrência. Esta mesma chuva será utilizada para os cenários de projeto e norteia o nível de segurança desejado para o sistema.

Após o diagnóstico do setor de drenagem urbana, deve ser realizado o diagnóstico dos espaços livres da bacia hidrográfica. Devem ser levantados o maior número de áreas livres de ocupação na bacia hidrográfica e classificados quanto à propriedade (público ou

privada/militar), cobertura do solo (Impermeabilizado ou não), Aspectos Topográficos (Área plana ou encosta) e quanto às condições de drenagem, obtidas a partir do diagnóstico realizado com a simulação matemática (inunda ou não). Através desta classificação, poderão ser sugeridas diretrizes para criação de um sistema de espaços livres com foco na recuperação da qualidade dos serviços oferecidos pelos sistemas da cidade e, em especial, pelo sistema de drenagem urbana (BARBOSA et al., 2017). Complementarmente, um sistema de espaços livres interligados diminui a fragmentação de áreas que podem ganhar uma importância ambiental maior neste tratamento integrador. Esta análise é de suma importância para identificação de espaços livres que possam vir a compor o sistema de drenagem, revitalizar a paisagem urbana e recuperar valores ambientais naturais perdidos no decorrer da urbanização.

A próxima etapa da metodologia é primordial para continuidade do trabalho. Serão levantadas as principais áreas, edificações, equipamentos e pontos relevantes, de forma a especificar os elementos que representam os demais eixos de planejamento da cidade, que são impactados pelas inundações. Esta etapa oferece um quadro geral do funcionamento da cidade e como a cidade reage às inundações.

Após realizado o diagnóstico do sistema de drenagem e levantados os principais elementos dos demais eixos de planejamento da cidade, devem ser feitas as interações entre ambos os conjuntos de informações. As informações obtidas na forma de dados geográficos digitais são organizadas em eixos de planejamento e cada eixo é representado por uma camada. Serão sobrepostas diferentes camadas com a camada de drenagem urbana, produzindo um mapa composto de impactos de drenagem sobre a cidade. A interação das camadas dos eixos da cidade com o eixo de drenagem urbana permite a criação de uma série de indicadores que servirão para dar um panorama dos atuais impactos das inundações sobre a cidade e, nas próximas etapas da metodologia, ver os ganhos de um possível projeto de drenagem a ser implementado. Os indicadores que serão utilizados neste trabalho podem ser apreciados a seguir:

Habitacão:

Identificadas as diferenças construtivas da bacia e as lâminas necessárias para invadir as diferentes tipologias de domicílios no âmbito da bacia em questão, encontramos o primeiro indicador da Habitacão, que é representado pela equação (1).

$$I_{h1}^A = \text{Número de domicílios ocupados inundados para a situação atual.} \quad (1)$$

O segundo indicador da Habitação serve para complementar o primeiro e é representado pela equação (2).

$$I_{h2}^A = \frac{\Sigma(D_{SA}^{inund} \times h_{SA})}{I_{h1}^A} \quad (2)$$

Na equação (2), D_{SA}^{inund} representa um determinado número de domicílios ocupados inundados na situação atual e h_{SA} sua respectiva lâmina de inundação. O somatório de todos os $D_{SA}^{inund} \times h_{SA}$ dividido pelo número total de domicílios inundados (I_{h1}^A) representa a lâmina média de água nos domicílios atingidos pelas inundações (I_{h2}^A).

Esgotamento Sanitário:

O indicador de esgotamento sanitário é dado pelas áreas que possuem inundações maiores do que a lâmina de referência para invadir os domicílios, onde provavelmente ocorre o aporte das águas pluviais para as redes de esgotamento sanitário e assim as redes de esgoto extravasam e geram contaminação. A equação (3) representa o indicador de esgotamento sanitário.

$$I_{es1}^A = \text{Área ocupada pelos domicílios inundados para a situação atual ou Área contaminada pelo aporte das redes de drenagem às redes de esgotamento} \quad (3)$$

Equipamentos Comunitários:

Serão considerados para análise de inundação os equipamentos comunitários que oferecerem para a sociedade serviços de saúde e educação. Os demais equipamentos comunitários também são importantes para o funcionamento da cidade, mas os serviços citados foram considerados os mais básicos. As equações (4) e (5) apresentam os indicadores de saúde e educação respectivamente.

$$I_{s1}^A = \text{Número de estruturas de saúde inundadas para a situação atual} \quad (4)$$

$$I_{e1}^A = \text{Número de estruturas de educação inundadas para a situação atual} \quad (5)$$

Mobilidade:

Em carros menores, o duto que capta ar e o direciona para o motor (duto de admissão) fica localizado em uma parte baixa, atingida por alturas de inundação a partir de 30 cm. Caso este duto seja coberto pela água, ele pode sugá-la para dentro do motor e causar o chamado calço hidráulico, evitando a locomoção do veículo. Da mesma forma que a altura de inundação

é importante para o cálculo do indicador deste setor, a hierarquia representa um fator relevante, visto que indica o volume de veículos que aquele logradouro pode suportar. Sendo assim, o primeiro indicador de Mobilidade será dado pela equação (6). Este indicador, representado por um número de 0 a 1, mostra a severidade de inundação dos logradouros levando em consideração a sua hierarquia viária.

$$I_{m1}^A = \frac{(1.L_{SA}^{local})+(2.L_{SA}^{colec})+(3.L_{SA}^{art2})+(4.L_{SA}^{art1})+(5.L_{SA}^{estrut})}{(1.L_{Tot}^{local})+(2.L_{Tot}^{colec})+(3.L_{Tot}^{art2})+(4.L_{Tot}^{art1})+(5.L_{Tot}^{estrut})} \quad (6)$$

Na equação (6), L_{Tot}^{local} representa o comprimento total das vias locais, L_{Tot}^{colec} o total das vias coletoras, L_{Tot}^{art2} o total das vias arteriais secundárias, L_{Tot}^{art1} o total das vias arteriais principais e L_{Tot}^{estrut} o total das vias estruturais. Estes parâmetros representam apenas as vias que estão em locais susceptíveis a inundação, sendo desconsideradas vias onde a topografia local impossibilita inundações ocasionadas por falhas de macrodrenagem.

De forma equivalente, L_{SA}^{local} representa o comprimento total das vias locais inundadas, L_{SA}^{colec} o total das vias coletoras inundadas, L_{SA}^{art2} o total das vias arteriais secundárias inundadas, L_{SA}^{art1} o total das vias arteriais principais inundadas e L_{SA}^{estrut} o total das vias estruturais inundadas.

Pode ser observado na equação (6) que o comprimento das vias está ponderado de maneira linear pela sua hierarquia.

O segundo indicador de Mobilidade é representado pela equação (7).

$$I_{m2}^A = \text{Número de estações e pontos de ônibus inundados para a situação atual} \quad (7)$$

Economia:

Quantificar os impactos econômicos de uma inundação é algo complexo e delicado. Este trabalho se aterá à quantificação dos centros comerciais que são inundados (inundações acima da lâmina de referência a ser utilizada) para uma determinada chuva de projeto. Desta forma, conceitualmente, os centros comerciais inundados, tem a possibilidade de perder materiais e equipamentos e de cessar suas atividades econômicas pela presença do excesso de águas pluviais em seu entorno ou dentro do próprio centro. A equação (8) apresenta o indicador a ser utilizado para o setor de economia.

$$I_{c2}^A = \text{Número de centros comerciais inundados para a situação atual} \quad (8)$$

Patrimônio Cultural:

Em relação ao setor de Patrimônio Cultural serão identificadas as estruturas relevantes do setor, levando em consideração a tipologia construtiva da região. Dessa forma, a equação (9) representa o indicador a ser utilizado para o setor de Patrimônio Cultural.

$$I_{pc1}^A = \text{Número de Patrimônios Culturais inundados para a situação atual} \quad (9)$$

Diante do diagnóstico geral construído, será realizado um projeto de drenagem que conte com correções estruturais necessárias e incorpore espaços livres para se tornarem parques ou reservatórios de retenção temporária de cheias. Nesta etapa será consolidado o Sistema de Espaços Livres com foco no controle de inundações, mas também com desdobramentos ambientais. Após a concepção do projeto e simulação hidrodinâmica com o software escolhido serão novamente aplicados os indicadores apresentados, porém, com as lâminas resultantes da situação de projeto.

A quantidade de ganhos para a cidade através da implementação de um projeto de drenagem multifuncional deve ser tal que justifique a sua realização e ao mesmo tempo que apresente a drenagem como estruturador do planejamento urbano.

5 RESULTADOS

O capítulo a seguir apresenta os principais resultados obtidos através da aplicação da metodologia apresentada.

5.1 DIAGNÓSTICO DA BACIA DO RIO ACARI

Nesta etapa será realizada a simulação do cenário atual, ou cenário de diagnóstico, no qual serão identificados e confirmados os locais onde há maiores falhas das redes de drenagem e as regiões mais susceptíveis a inundações. Será realizado o diagnóstico dos espaços livres da bacia hidrográfica e serão obtidos os principais pontos de interesse dos eixos de planejamento da cidade. Após este levantamento, será apresentada a interação dos eixos estruturantes da cidade com as inundações da situação atual.

5.1.1 Diagnóstico do Setor de Manejo de Águas Pluviais

Este cenário simula o presente estado do sistema de drenagem urbana da bacia do Rio Acari. A diferença do modelo empregado para este cenário e o modelo utilizado para simular a calibração está na atualização das obras de canalização realizadas desde o evento crítico de 2013 até a presente data e a modificação da chuva de calibração (medida para o evento de 2013) por uma chuva de projeto com tempo de recorrência de 25 anos.

Os resultados do Cenário da Situação Atual (TR 25) utilizando o software MODCEL como ferramenta de modelagem podem ser apreciados na Figura 5.1. Os resultados mostram a situação crítica no que diz respeito às falhas do setor de macrodrenagem da bacia, com extravasamentos dos cursos d'água em praticamente todas as áreas. Destacam-se, negativamente, sete regiões da bacia no diagnóstico do sistema de manejo de águas pluviais.

São observadas inundações na afluição dos rios Marinho e Catarino (Ponto 1) no bairro de Realengo, inundações na área mais a jusante da bacia do Piraquara em Magalhães Bastos (Ponto 2), extravasamentos do Rio Maranga no bairro Vila Militar (Ponto 3).

Em Marechal Hermes são encontrados 2 pontos de inundações, um na região da praça Montese, devido a dificuldades de escoamento sob a linha do trem do Rio Tingui que vem em um trecho de galeria (Ponto 4) e na região da confluência do Rio Tingui com o Rio Sapopemba (Ponto 6) devido ao estrangulamento vertical de escoamentos causado pela baixa cota do infradorso da ponte da Rua Luís Coutinho Cavalcanti.

São observadas inundações em Oswaldo Cruz e Bento Ribeiro na parte intermediária do Rio das Pedras (Ponto 5), devido à falta de capacidade do Rio e ao volume de águas elevado das bacias de contribuição de seus tributários.

A última e mais crítica região se situa entre os pontos 7 e 8 e engloba os bairros de Acari, Parque Columbia, Coelho Neto, Irajá e Pavuna. Esta região apresenta severos problemas de inundação gerados pelo grande volume de águas pluviais da bacia contribuinte como um todo que acabam se acumulando nesta área mais baixa, somados à incapacidade de escoamento do Rio Acari e à falta de margens de inundação para alocação dos volumes de cheia. São encontradas nesta região lâminas de inundação superiores a dois metros. A Região ainda apresenta limitações hidráulicas pelo subdimensionamento do infradorso das pontes da Avenida Presidente Dutra, dificultando o escoamento e retendo ainda mais a água neste local. Os reflexos destas inundações são verificados ainda na bacia do Rio dos Cachorros II.

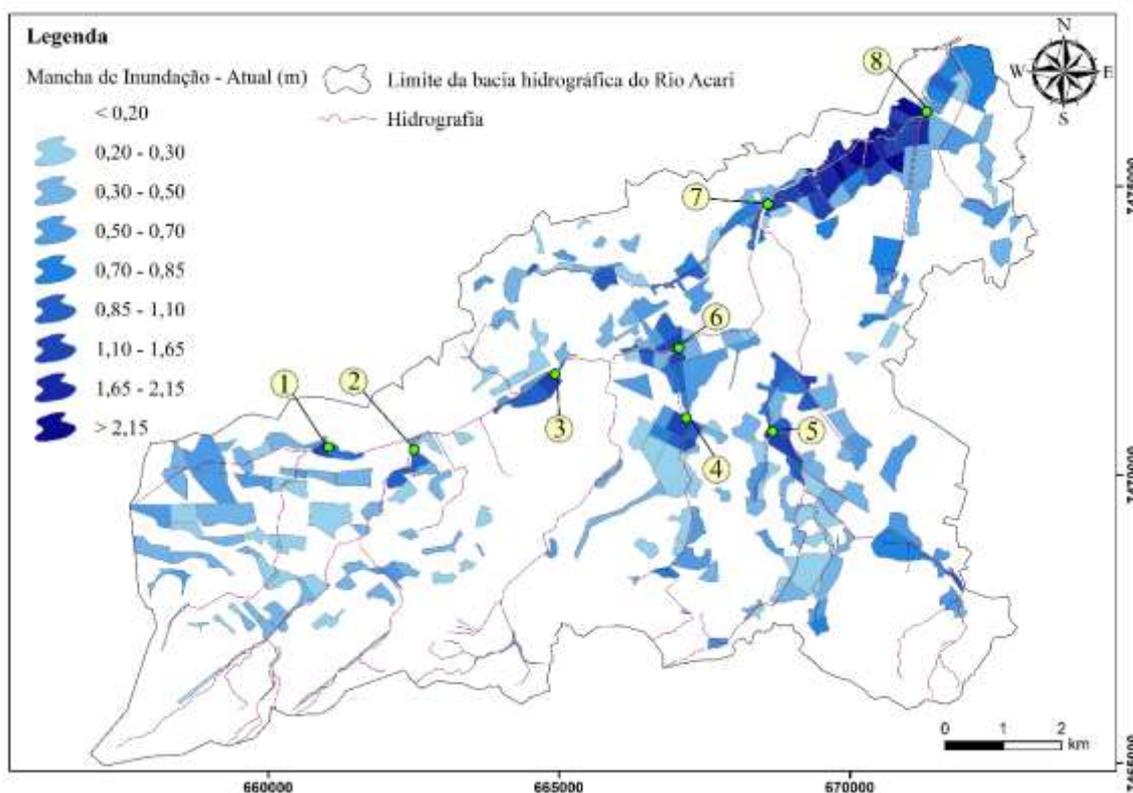


Figura 5.1 – Resultados do Cenário da Situação Atual (TR 25) utilizando o software MODCEL como ferramenta de modelagem. Fonte: Autor

5.1.2 Diagnóstico dos Espaços Livres

A bacia do Rio Acari ocupa uma área de 107,35 km² do município do Rio de Janeiro e se destaca por ser uma das regiões mais urbanizadas do município. Apresenta apenas 30,43 km²

de espaços livres de ocupação no seu território. Os espaços livres remanescentes correspondem a 28,3% do total da área da bacia.

De forma a entender o território levando em consideração seus recursos, em especial os espaços livres de ocupação, foi realizado um processo de levantamento e caracterização dos principais espaços livres da bacia do Rio Acari.

Os espaços livres foram classificados em relação ao tipo de cobertura do solo (cobertura impermeável e cobertura permeável), uso geral dado ao espaço (Áreas Militares, Parques ou Praças, Unidades de Conservação e outros tipos de usos) e condições atuais de drenagem obtidas das simulações matemáticas (Apresenta Inundações ou Não Apresenta Inundações).

Em relação ao tipo de cobertura do solo, percebe-se que a maioria dos espaços livres da bacia possuem cobertura do solo permeável (95% do total de espaços livres), sendo considerados nesta classificação tipos de cobertura que diminuem o volume das águas pluviais escoadas por possuírem maior facilidade de infiltração de água (Florestas, campos, cultivos, entre outros).

Em relação à classificação dos espaços livres quanto ao uso geral atribuído foram obtidos os seguintes resultados:

- Áreas Militares correspondem a 14,8% da área total de espaços livres e estão concentradas em geral na região do campo dos Afonsos;
- Os diversos parques e praças espalhados pela bacia correspondem a 5,1% da área dos espaços livres. Destaca-se o parque de Madureira com mais de 3,15 km de extensão. O parque acompanha a linha férrea de Belford Roxo e é o principal local de diversão, lazer e cultura do seu entorno.
- Há cinco unidades de conservação dentro da bacia que correspondem a 43,9% do total das áreas de livres. O Parque Estadual da Pedra Branca é o responsável pela maior parte de áreas enquadradas em unidade de conservação dentro da bacia. O Parque Estadual da Pedra Branca conta ainda, em seu interior, com a Área de Proteção Ambiental (APA) da Pedra Branca. A bacia ainda possui as Áreas de Proteção Ambiental do Morro do Valqueire e da Serra dos Pretos Forros e Área de Proteção Ambiental e Recuperação Urbana (APARU) da Serra da Misericórdia.

Os resultados obtidos no capítulo de diagnóstico do sistema de drenagem, que apresentaram as principais falhas do sistema de drenagem atual e consequentes inundações na bacia do Rio Acari para um tempo de recorrência de 25 anos, serviram de subsídio para caracterização dos espaços livres quanto às condições atuais de drenagem. Os espaços livres

que não são susceptíveis a inundações correspondem a 84,4%, enquanto os espaços livres que podem sofrer inundações, para um evento de chuva extrema, correspondem a 15,6% da área total ocupada pelos espaços livres na bacia hidrográfica.

Em relação às características geométricas e espaciais dos espaços livres dentro da bacia, percebe-se um alto grau de segregação entre os espaços, com diversos fragmentos de espaços livres não conexos. Também é notado que os maiores espaços livres apresentam distribuições perpendiculares ao escoamento, dificultando a sua incorporação como áreas de amortecimento de cheias nos principais cursos d'água.

5.1.3 Interação do setor de manejo de águas pluviais com outros eixos estruturantes na Situação Atual

A camada de drenagem é representada pelas manchas de inundação obtidas para a situação atual do item 6.1. As manchas de inundação obtidas a partir de simulação matemática com o software MODCEL, equivalem a inundações esperadas pela ocorrência de uma chuva crítica para a bacia do Rio Acari com tempo de recorrência de 25 anos. Foram consideradas para estas simulações apenas as redes de macrodrenagem.

A interação das camadas dos elementos com a camada do eixo de drenagem urbana permite a criação de uma série de indicadores que servirão para dar um panorama dos atuais impactos das inundações sobre a cidade.

Assim, serão analisados os impactos das falhas do atual sistema de drenagem sobre os seguintes elementos da ocupação urbana:

Drenagem e Habitação

Levando em consideração os dois padrões construtivos considerados para a região foi possível gerar manchas de inundação condicionadas nos domicílios da bacia hidrográfica. As manchas foram obtidas pela interação entre as camadas de drenagem com a do número total de domicílios e o padrão construtivo da bacia. A bacia apresenta 46.398 domicílios ocupados inundados com lâmina média de inundação de 37 centímetros por domicílio. As ocupações informais correspondem a 28% do total de domicílios inundados. A região mais crítica das inundações, indicada na imagem, corresponde a 25% de todos os domicílios inundados na bacia (11.538 domicílios) e apresenta uma lâmina média de inundação de 94 centímetros por domicílio.

Drenagem e Esgotamento sanitário

Para o impacto no setor de esgotamento sanitário foi utilizada uma metodologia à aplicada na quantificação dos impactos do setor de habitação, uma vez que no momento em que a água invade o chão da parte interna do domicílio começa a se misturar com a rede de esgoto domiciliar através dos ralos. Consideramos novamente 20 cm para ocupações informais e 50 cm para ocupações formais, onde provavelmente ocorre o aporte das águas pluviais para as redes de esgotamento sanitário e assim as redes de esgoto extravasam e geram contaminação. Assim, pode-se concluir que os 46.398 domicílios inundados contribuem para a contaminação do sistema de drenagem mediante a comunicação com o sistema de esgotamento sanitário e contaminam uma área correspondente a 11,5 km².

Vale destacar que o setor de esgotamento se encontra em situação mais críticas do que as apresentadas, uma vez que a metodologia empregada neste trabalho não quantifica as possíveis conexões entre as redes de drenagem e esgotamento sanitário e as ineficiências nos serviços de coleta e tratamento de esgotos, que são realidade em toda a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (MAGALHÃES et al., 2017).

Drenagem e os Equipamentos Sociais

A interação do eixo estruturante de equipamentos sociais com o eixo de drenagem urbana foi realizada através da sobreposição entre os principais centros de saúde e educacionais com as inundações simuladas na etapa de diagnóstico do sistema de drenagem da bacia do Rio Acari.

Os principais centros de saúde da bacia, bem como aqueles que se encontram dentro da mancha de inundações de um evento com tempo de recorrência de 25 anos. Os resultados mostraram que 18 centros de saúde estão em locais onde devem ocorrer inundações. Os centros de saúde em situações sensíveis a falhas das redes de drenagem correspondem a 26,87% dos centros de saúde de toda a bacia.

Uma das principais regiões atingidas pelas inundações impactadas no que diz respeito ao setor de saúde se encontra no bairro de Marechal Hermes, nas proximidades da Praça Quinze de Novembro. A região possui 5 centros de saúde em situações de possibilidade de inundações, entre eles um dos principais hospitais da cidade, o Hospital Estadual Carlos Chagas, e o Hospital Maternidade Alexander Fleming, e a Unidade de Pronto Atendimento de Marechal Hermes.

Em relação aos centros educacionais, os resultados de interação com as manchas de inundações apresentam 85 centros em situações de susceptibilidade a inundações. Os 85 centros

representam um total de 18,4% do total de estruturas educacionais identificados para a bacia. Há concentração de centros educacionais inundados nos bairros de Madureira e Guadalupe. A favela da Vila Vintém, localizada entre os bairros de Realengo e Padre Miguel, situada às margens da linha férrea, também apresenta diversos centros educacionais em locais onde há falhas do sistema de drenagem. Além desses locais, surge novamente a região da Praça Quinze de Novembro, em Marechal Hermes, como local de impactos no eixo de equipamentos sociais, desta vez com impactos em diversos centros educacionais da região.

Drenagem e Mobilidade

A primeira sobreposição do eixo estruturante mobilidade e o eixo de drenagem diz respeito da interação dos logradouros com as manchas de inundação para alagamentos maiores que 30 centímetros. Os resultados mostram que há 313,93 km de Vias Locais inundadas, correspondendo a 28,8% do total de vias com a mesma hierarquia na bacia (1088,18 km). Em relação às Vias Coletoras, estão em situação de inundação 77,53 km de um total de 241,21 km de vias da mesma hierarquia na bacia, valor que corresponde a 32,1%. As Vias Arteriais Secundárias são as mais atingidas em termos percentuais, com 38,1% de vias inundadas (14,12 km) em relação ao total de vias com a mesma hierarquia na bacia (37,04 km). O comprimento de Vias Arteriais Principais inundadas corresponde a 24,16 km de um total de 70,68 km, logo 34,2% das vias com esta hierarquia estão em situação de inundação na bacia em questão. A Avenida Brasil e a Rodovia Presidente Dutra, vias estruturais não expressas na bacia do Rio Acari, apresentam 15,38 km de comprimentos viários com possibilidade de inundação, correspondendo a 19,8% de um total de 77,50 km de logradouros com a mesma classificação hierárquica.

Aplicando o indicador de severidade de inundação dos logradouros, apresentado na metodologia, obtemos um valor de 0,66 de 1,00, apresentando uma situação crítica no que diz respeito à interação do eixo de mobilidade e o eixo de drenagem.

A segunda interação de camadas é realizada pela sobreposição de estações da rede de mobilidade urbana (Estações ferroviárias, metroviárias e pontos de ônibus) com inundações acima de 50 centímetros. Segundo os resultados, a bacia apresenta 175 pontos de ônibus em situações de inundação de um total de 1035. Em relação às estações ferroviárias, há 4 estações em condições de inundações de um total de 17 estações na bacia. Para as estações metroviárias a estação de Acari / Fazenda botafogo é a única que se encontra em situação de inundações, além de apresenta grandes falhas de inundação em seu entorno, apresentando lâminas 1,25

metros de inundação para o evento de referência de 25 anos. No total 180 estações são impactadas pelas inundações na bacia hidrográfica do Rio Acari.

Drenagem e Economia

Os centros de comerciais, representantes do eixo estruturante de economia no presente trabalho, serão sobrepostos com manchas de inundações acima de 50 centímetros obtidas no diagnóstico do sistema de drenagem. Por mais que tenha sido identificada uma tipologia construtiva na bacia que é atingida a partir de menores lâminas de inundação, é de esperar que edificações que exercem uma atividade comercial apresentem melhores estruturas construtivas, no que diz respeito à susceptibilidade a inundações, mesmo em regiões periurbanas. Dos 335 pontos comerciais levantados, 70 apresentam inundações que poderiam ocasionar interrupção de seus serviços, e perdas e danos em suas estruturas ou estoques. Destacam-se negativamente as inundações observadas nos centros comerciais dos bairros de Acari, Jardim América, Guadalupe, Irajá e Madureira, este último com uma relevante contribuição comercial para a região da bacia hidrográfica do Rio Acari como um todo.

Drenagem e Patrimônio Cultural

Para a interação entre o eixo estruturante do Patrimônio Cultural e o eixo de drenagem urbana foram sobrepostos os 36 pontos de interesse do Patrimônio Cultural da bacia com as manchas de inundações maiores que 50 centímetros.

Como resultado foram obtidos cinco pontos com prováveis inundações para um evento crítico de tempo de recorrência de 25 anos. Três desses cinco pontos se localizam nas proximidades da Praça Quinze de Novembro e Marechal Hermes. Entre os pontos de interesse patrimonial inundados na região se destaca a já citada Estação Ferroviária de Marechal Hermes.

5.2 CONSTRUÇÃO DO PROJETO PARA MITIGAÇÃO DAS INUNDAÇÕES APOIADO EM UM SISTEMA DE ESPAÇOS LIVRES

Este capítulo apresenta o passo a passo detalhado da escolha do projeto de drenagem a ser escolhido como solução adequada para as falhas do sistema de macrodrenagem apresentadas na fase do diagnóstico. Foram realizadas diversas simulações matemáticas com o auxílio do MODCEL, em etapas intermediárias e acumulativas de construção do projeto, que foram fundamentais para a escolha das intervenções apropriadas para a realidade da bacia hidrográfica perante a sua dificuldade em encontrar espaços para alocação do volume de cheias.

Correções Estruturais Básicas do Sistema de Drenagem Urbana

As primeiras intervenções escolhidas para fazer parte do projeto foram as modificações em estruturas que gerassem algum tipo de obstrução no escoamento dos cursos d'água. Assim, foram consideradas como primordiais modificações em algumas pontes, devido a baixas cotas dos seus infradorno e em algumas galerias de drenagem que apresentavam subdimensionamento.

Limpeza e Dragagem dos principais cursos d'água

Na seguinte etapa foram melhoradas as condições hidráulicas da calha do curso principal do Rio Acari, cujo leito apresentava irregularidades. Dessa forma, foi proposta a dragagem do fundo do rio em uma extensão de 4,0 km.

Implementação de Reservatórios - PDMAP

Esta etapa se trata da inclusão de reservatórios de amortecimento de cheias. Foi então utilizado o Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais (PDMAP) do Rio de Janeiro como referência inicial (CONSORCIO HIDROSTUDIO - FCTH, 2014). 22 reservatórios do PDMAP foram simulados em separado de forma a otimizar seus resultados. Depois foram integrados formando uma rede de reservatórios de amortecimento dos volumes de cheia.

Incorporação de Espaços Livres para controle de inundações

Visto que a correção de problemas estruturais na bacia e a inclusão de reservatórios já propostos por relatórios oficiais do município do Rio de Janeiro não resolvem os problemas de macrodrenagem da bacia, devem ser incorporados novos espaços para alocação do volume de cheias.

Surge a necessidade de desenvolver um Sistema de Espaços Livres com foco na solução dos problemas de inundação. Inicialmente foram considerados apenas espaços atualmente livres de ocupação, sem necessidade de desapropriação de áreas. A determinação dos espaços livres que pudessem incorporar o sistema de drenagem levou em consideração as informações levantadas no capítulo 5.1.2 de Diagnóstico dos Espaços Livres. Foram cruzadas as informações de uso atual da área e condições de drenagem. Mediante esse cruzamento são propostas as diretrizes da Tabela 5.1 que devem guiar a identificação dos espaços livres para a Bacia que deverão compor um sistema.

Tabela 5.1 – Diretrizes propostas para a identificação de Espaços Livres relacionados com a dinâmica da água.

Condições	Uso – Drenagem	Diretriz proposta
1	Unidades de Conservação com inundação	DEVE ser incorporado ao sistema de espaços livres e, se relevante, DEVE ser usado para amortecer inundações
2	Unidades de Conservação sem inundação	DEVE ser incorporado ao sistema de espaços livres
3	Praças / Parques com inundação	DEVE ser consolidado no sistema de espaços livres e, se relevante, DEVE ser usado como Praça/Parque inundável para amortecer cheias
4	Praças / Parques sem inundação	DEVE ser incorporado ao sistema de espaços livres
5	Área Militar com inundação	PODE ser incorporado ao sistema de espaços livres para amortecer as inundações, se for necessário
6	Área Militar sem inundação	Se for possível, pode ser incorporado ao sistema de espaços livres - se referindo a uma área verde, não deve ser ocupado ou impermeabilizado
7	Outros com inundação	PODE ser incorporado ao sistema de espaços livres para amortecer as inundações, se for necessário
8	Outros sem inundação	Se for possível, pode ser incorporado ao sistema de espaços livres - se referindo a uma área verde, não deve ser ocupado ou impermeabilizado

Proposta de Parques Fluviais

Para solucionar de vez os problemas de macrodrenagem para o tempo de recorrência de 25 anos é necessário devolver para o rio parte de seus espaços naturais. Dessa forma foi utilizado como base de intervenção o Programa Acari Projeto Rio Vivo (PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, 2007) que visa a recuperação da orla do Rio Acari com a implementação de parques. De forma complementar o presente trabalho considerou que os parques fluviais a serem implementados às margens do Rio Acari funcionarão como calhas secundárias do Rio, inundando em eventos de chuva extrema.

Os resultados da simulação matemática para um evento crítico de TR25, com o auxílio do MODCEL, considerando os novos volumes disponibilizados pelos parques fluviais podem ser vistos na Figura 5.2.

Observamos que não há extravasamentos na calha principal do Rio Acari, estando assim solucionadas as falhas do sistema de macrodrenagem após a implementação de todas as

alternativas citadas (Considerando um tempo de recorrência de 25 anos). Desta forma, o projeto que conta com as correções estruturais básicas do sistema de drenagem urbana (revisão dimensionais de pontes e galerias), a limpeza e dragagem dos principais cursos d'água, a implementação dos reservatórios propostos no âmbito do PDMAP, a incorporação de um Sistema de Espaços Livres com foco no controle de cheias (considerando também parques fluviais), será considerado o projeto final que deverá ser utilizado para interação com os demais eixos e para realizar as discussões em relação ao eixo de drenagem urbana como eixo estruturador da cidade.

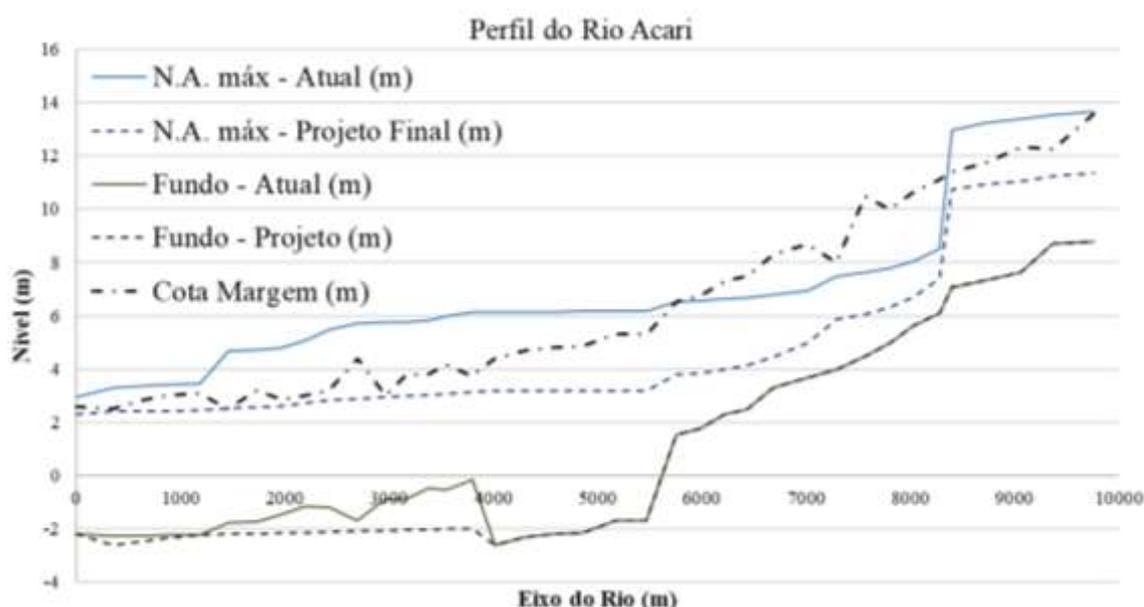


Figura 5.2– Perfil de Níveis de Água máximos do Rio Acari para os cenário Atual e para o cenário até a incorporação dos parques fluviais – TR25.

De forma complementar ao perfil de níveis máximos apresentados, a Figura 5.3 mostra a evolução da mancha de inundação da situação atual para a situação do projeto final escolhido para a bacia hidrográfica do Rio Acari.

Pode ser observado que há grande mitigação das inundações para um evento crítico de tempo de recorrência de 25 anos. Os 8 pontos considerados críticos pela severidade das inundações na etapa do diagnóstico apresentam reduções significativas em relação a sua mancha de inundação. Há poucas áreas na bacia pós projeto que apresentam inundações superiores a 50 centímetros.

Após apresentar as principais diretrizes para os espaços livres, determinar as áreas livres específicas para compor o sistema de macrodrenagem e incluir aos espaços livres os parques fluviais, é obtido um subsídio importante para compor um Sistema de Espaços Livres (SEL) realmente integrado na bacia do Rio Acari. Outra questão importante que também pode ser explorada é que os parques marginais ao rio surgem como peça essencial deste sistema, funcionando como corredores fluviais de estrutura verde e azul que conectam os fragmentados espaços livres da área em questão.

Em relação aos demais espaços livres identificados como potenciais mitigadores de inundação e que não foram incorporados no sistema de macrodrenagem por apresentarem posições não estratégicas ou poucos volumes disponíveis para as cheias, é definido que estes, têm capacidade de incorporar o sistema de microdrenagem, não detalhado hidraulicamente neste trabalho.

Sendo assim, para definir o SEL, os locais onde atualmente se situam parques ou praças que apresentam inundações devem ser preparados para compor o sistema de microdrenagem. Outros tipos de espaços livres que apresentam inundações podem ser incorporados também ao sistema de microdrenagem, caso seja necessário.

As Unidades de Conservação da bacia e os parques que não apresentem inundações, devem compor o SEL preservando as áreas verdes e permeáveis.

Os demais espaços livres que não apresentem inundações devem incorporar, sempre que possível e relevante para o bem-estar urbano, o SEL preservando as áreas verdes e permeáveis.

A Figura 5.4 apresenta o Sistema de Espaços Livres proposto para a bacia hidrográfica do Rio Acari. Na figura podem ser observadas as funções dos determinados espaços livres, definidas pelo seu uso atual e pelas condições de drenagem.

Resumidamente, os Espaços Livres que compõe o sistema podem apresentar características de mitigação de inundações e alagamentos, compondo os sistemas de macro e microdrenagem ou características de preservação de áreas verdes e permeáveis, de forma a manter a qualidade ambiental, a qualidade do clima local e a infiltração de parte do volume das chuvas.

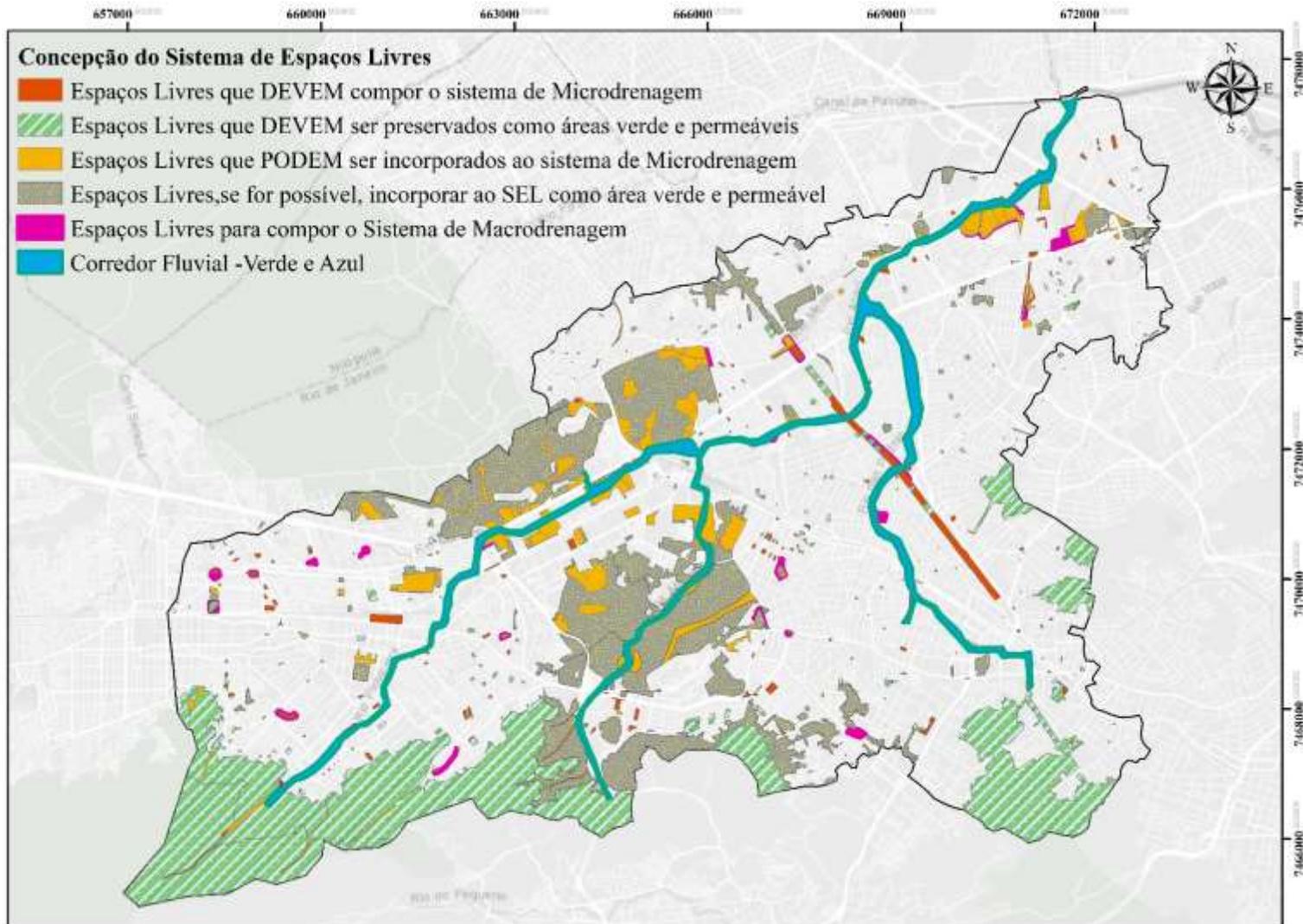


Figura 5.4 - Sistema de Espaços Livres proposto para a bacia do Rio Acari com foco no controle de inundações.

Finalmente, devemos destacar que o projeto final para mitigação das inundações apoiado em um Sistema de Espaços Livres contou com a desapropriação de aproximadamente 2.300 domicílios, para implementação de reservatórios de controle de cheia e para a implementação de parques fluviais longitudinais. De forma a evitar impactos negativos na população e ainda viabilizar a implementação das obras de controle de inundações (sendo elas de utilidade pública), é importante que a população ribeirinha desapropriada se conscientize dos riscos de inundação aos que era submetida, mediante a implementação de um programa de educação social e ambiental. É fundamental diagnosticar social e culturalmente as comunidades a serem desapropriadas para amenizar os processos de realocação. A Figura 5.5 apresenta um possível local de reassentamento. O local apresenta uma série de características positivas que viabilizam e amenizam os impactos do reassentamento, entre elas: se situa próximo das regiões desapropriadas, apresenta facilidades de acesso às redes de transporte (Estação de trem Barros Filho e é próxima à Avenida Brasil) além de estar em um local não susceptível a inundações. A área de 190 mil metros quadrados é suficiente para realocar mais de 3400 domicílios seguindo os padrões construtivos dos conjuntos habitacionais, amplamente realizados no município do Rio de Janeiro.



Figura 5.5 – Possível local para realocação dos domicílios desapropriados.

5.3 PROGNÓSTICO DA BACIA DO RIO ACARI

Como última etapa da metodologia proposta surge a quantificação e análise dos ganhos trazidos pela implementação do projeto de controle de cheias. A Tabela 5.2 apresenta os nove indicadores propostos tanto para a situação atual como para a situação de projeto, assim como o cálculo dos respectivos ganhos.

O eixo estruturante de habitação tem o segundo maior ganho em relação aos demais indicadores com redução de 73,5% dos domicílios inundados. Apesar de ainda haver 12.291 domicílios em situação de inundação, o estado de calamidade à qual era submetida a área mais crítica da bacia foi superado. Os domicílios inundados que apresentavam lâmina média de inundação de 37 centímetros dentro de casa, tiveram um ganho de 48,6%, e passaram a ter em média menos de 20 centímetros de inundação. A composição destes dois indicadores indica ganhos verdadeiramente significativos, foram reduzidos o número de domicílios atingidos e as intensidades de inundação daqueles que ainda permanecem inundados.

Paralelamente é esperado que com a melhoria do eixo de habitação o setor de esgotamento sanitário também apresente avanços em relação às áreas contaminadas pela falha da rede de drenagem e seu aporte as redes de esgotamento sanitárias domiciliares. Analisando os resultados dos indicadores percebemos um ganho de 63,54% em relação às áreas contaminadas, indicando melhorias significativas em relação à qualidade ambiental e de salubridade da bacia frente a um evento de chuvas intensas.

O eixo estruturante de mobilidade também apresenta ganhos consideráveis. A severidade de inundações das vias é reduzida em 66,2% e quando analisamos individualmente os tipos de hierarquias de vias percebemos evoluções em direção à mitigação das inundações. 71% das vias Locais, 62% das Coletoras, 62% das vias Arteriais Secundárias, 70% das vias Arteriais Principais e 54% das vias Estruturais Não Expressas deixam de inundar para a situação de projeto.

As estações da rede de mobilidade urbana apresentam quase 50% de redução de inundações, com destaque para as estações metroviárias e ferroviárias que deixam de inundar completamente. Por mais que ainda hajam 94 pontos de ônibus inundados, o sistema de ônibus se mostra mais resiliente a falhas, podendo haver opções alternativas de trajeto caso ruas inviabilizem a rota normal, ainda mais considerando os ganhos em relação à severidade de inundação trazidos pelo projeto para todas as vias da bacia.

Em relação aos equipamentos sociais, tanto os centros educacionais como os de saúde mostram ganhos em relação a inundações em mais de 60% da situação atual para a situação de

projeto. Os 40 equipamentos sociais ainda em situação de inundação correspondem a apenas 7,5% de todos os equipamentos sociais levantados para a bacia hidrográfica do Rio Acari.

Resultados positivos são observados também para o eixo estruturante de economia com ganhos de 62,9% quando comparadas a situação atual e a situação de projeto. Os 26 pontos comerciais ainda expostos a inundações e possíveis perdas e danos na situação pós projeto representam apenas 7,8% do total de centros comerciais levantados para a bacia hidrográfica.

O Patrimônio Cultural é o eixo que apresenta os melhores resultados. Para a situação atual havia na bacia 5 estruturas de relevância cultural em exposição a inundações. Após a implementação do projeto e do SEL, 100% dos patrimônios da bacia deixam de inundar.

Tabela 5.2 – Principais ganhos trazidos pelo projeto de controle de inundações sobre os demais eixos estruturantes da cidade.

Eixo	Indicador	Situação Atual	Situação de Projeto	Ganhos
Habitação	Domicílios inundados	46398	12291	<u>73,5%</u>
	Lâmina média de inundação dos domicílios (<i>m</i>)	0,37	0,19	<u>48,6%</u>
Esgotamento Sanitário	Áreas contaminadas (<i>km²</i>)	11,5	4,2	<u>63,54%</u>
Mobilidade	Severidade das vias inundadas	0,66	0,22	<u>66,2%</u>
	Estações de metrô e trem inundadas	5	0	<u>100,0%</u>
	Estações de ônibus inundadas	175	94	<u>46,3%</u>
Equipamentos Sociais	Centros de saúde inundados	18	7	<u>61,1%</u>
	Centros educacionais inundados	85	33	<u>61,2%</u>
Economia	Centros comerciais inundados	70	26	<u>62,9%</u>
Patrimônio Cultural	Patrimônios culturais inundados	5	0	<u>100,0%</u>

Além dos ganhos tabelados, podemos destacar os ganhos para o ambiente natural. Considerando que o ambiente apresenta vários ganhos quando os espaços livres de uma bacia possuem coesão e conexão, e levando em conta que os corredores verdes e azuis propostos (curso d'água mais parque fluvial marginal) apresenta um caráter longitudinal que tem o potencial de agregar fragmentos verdes, é esperado que o ambiente natural tenha ganhos.

Percebemos que mitigar o problema de inundações traz vantagens significativas para outros eixos estruturantes da cidade quando observamos o recorte da bacia hidrográfica como

um todo. Porém, se mudarmos a escala de análise e observarmos bairros ou regiões da cidade com serias falências no setor de drenagem urbana os ganhos trazidos pelo projeto para os diversos eixos de planejamento são muito mais tocantes.

Dessa forma, a seguir serão analisados os resultados da metodologia aplicada com foco em regiões que apresentaram graves problemas na interface de seus eixos estruturantes com o eixo de drenagem urbana.

Bairro de Marechal Hermes

O diagnóstico realizado por este trabalho apresentou o bairro de Marechal Hermes como um dos mais críticos no que diz respeito ao impacto das inundações sobre os diversos eixos de planejamento da cidade. A Figura 5.6 apresenta os resultados da metodologia aplicada neste trabalho com foco no bairro em questão.

Analisando especificamente resultados os resultados dos indicadores para este bairro obtemos 2.161 domicílios inundados para a situação atual e 540 domicílios inundados para a situação de projeto, apresentando 75% de ganhos. Em relação à lâmina média de inundação, há ganhos de 55% quando comparadas as lâminas médias da situação atual (67 centímetros) e da situação de projeto (30 centímetros).

Em relação aos pontos comerciais são observados ganhos de 66,7%. Em relação ao eixo de equipamentos comerciais, os 13 centros educacionais e os 3 centros de saúde inundados na situação atual não inundam na situação de projeto, ou seja, possuem um ganho de 100%.

Vale destacar também que a estação de Marechal Hermes, importante para o eixo de patrimônio cultural e que estava exposta a inundações com mais 2 outros Patrimônios culturais do bairro, não apresentam inundações pós projeto.

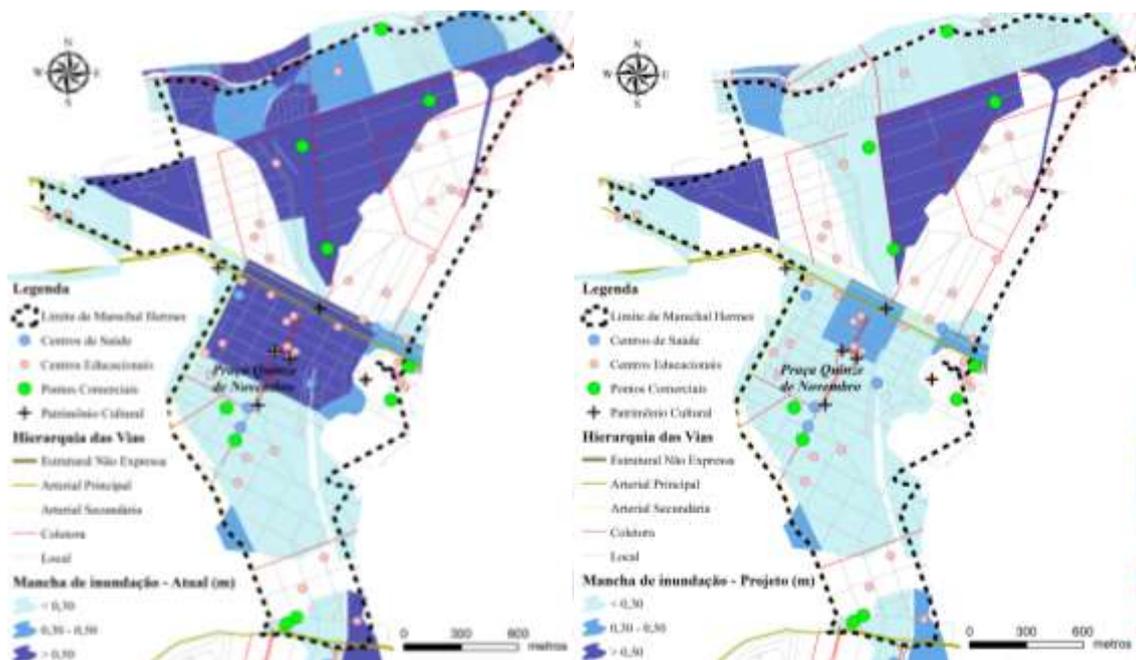


Figura 5.6 – Ganhos trazidos ao bairro de Marechal Hermes.

Bairro de Acari

As maiores lâminas de inundação foram encontradas nas proximidades do bairro de Acari. A região se apresenta como crítica segundo o diagnóstico realizado pelo presente trabalho. A Figura 5.7 apresenta as interações entre os principais eixos estruturantes com o eixo de drenagem urbana tanto na situação atual como na situação de projeto.

Analisando os resultados observamos que o bairro apresenta ganhos de 83% no eixo de economia (Partindo de 6 centros comerciais inundados na situação atual para apenas 1 na situação de projeto) e de 100% para o eixo de Equipamentos Sociais (Onde o único centro de saúde que inundava para a situação atual não apresenta mais riscos pós projeto).

Porém, os principais resultados são observados para o eixo de habitação. Na situação atual o bairro apresentava 4.565 domicílios inundados com uma lâmina de média de 92 centímetros, uma região completamente degradada pelo impacto das inundações. A situação pós projeto apresenta apenas 246 domicílios em possibilidade de inundações com uma lâmina média de 33 centímetros para a chuva extrema de tempo de recorrência de 25 anos.

Os resultados observados tanto na escala dos bairros mais críticos diferem muito dos ganhos obtidos para a bacia hidrográfica como um todo. Observamos que por mais que o projeto de drenagem e a determinação do SEL devam ser realizados utilizando a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, em relação aos demais eixos de planejamento da cidade é fundamental que as análises sejam complementadas visando a escala local, levando em

considerações particularidades urbanas, sociais e culturais de cada favela, bairro, região ou unidade de planejamento.

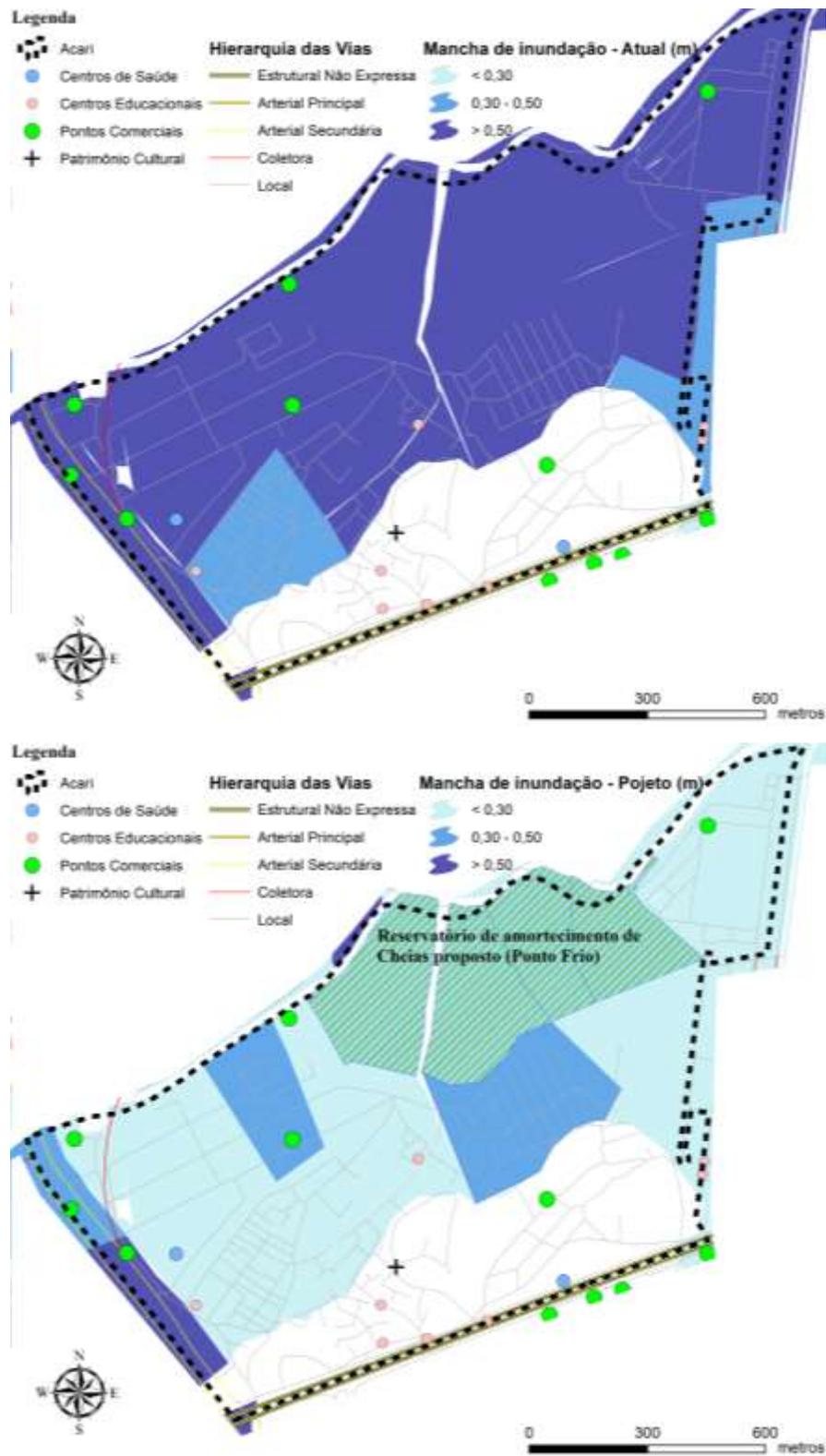


Figura 5.7 – Ganhos trazidos ao bairro de Marechal Hermes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A hipótese de trabalho propõe o sistema de drenagem como um sistema estruturante para o planejamento urbano e deve, por este motivo, ser previamente organizado e projetado, antes do desenvolvimento da cidade, a fim de integrar as demandas naturais e urbanas de forma harmônica, garantindo o desenvolvimento das funções ambientais e o funcionamento dos sistemas urbanos, sem prejuízo para ambas as partes. Nesse contexto, a drenagem deve intermediar o processo de geração de escoamentos e de passagem da cheia pela rede hidrográfica, através da cidade, de forma segura, sem prejuízo dos sistemas urbanos e garantindo a integração de ganhos ambientais e de biodiversidade para a própria cidade.

Em um contexto ideal, a organização do sistema de drenagem passa pela preservação dos fundos de vale, a valorização das áreas úmidas, a integração dos rios e corpos d'água, de forma geral, à paisagem urbana e pelo controle de impermeabilização do solo. Entretanto, de forma mais realista, em cidades que já alcançaram um elevado grau de crescimento urbano, o sistema de drenagem deve ser avaliado de forma diagnóstica, quanto ao seu funcionamento, para correção de possíveis distorções no cumprimento de seus objetivos básicos de propiciar ambientes urbanos saudáveis. Mesmo nesta segunda situação, em que idealmente a prevenção não pode mais ser exercida de forma plena, uma vez que a urbanização pode já ocupar um espaço que originalmente pertencia às águas, o reconhecimento do papel da drenagem precisa ser explicitado e a mitigação de problemas de inundação precisa ser objeto de planejamento e projeto, de forma preliminar aos planos de desenvolvimento urbano, que configuram documentos produzidos ciclicamente em um processo contínuo de planejamento urbano. Áreas frágeis e sujeitas a inundação devem ser evitadas e, caso já ocupadas, não podem ser locais de adensamento populacional ou preferências para ocupação. Áreas alagáveis ciclicamente podem ser objeto de planejamento diferenciado, conjugado com códigos e posturas de obra que prevejam edificações mais resistentes à inundação ou previstas sob pilotis, para evitar danos maiores nos alagamentos eventuais. Note-se que, mesmo com medidas de mitigação, locais naturalmente frágeis ainda serão objeto de sujeição a riscos residuais e, portanto, precisam de proteção no processo de desenvolvimento urbano.

Devido a sua interface com os demais eixos de planejamento, a drenagem urbana (e as falhas de funcionamento que podem gerar inundações e alagamentos) pode ser uma agente de degradação do espaço, no caso de falhas sucessivas, com alta repetição temporal, sem tempo para recuperação da cidade, ou impulsionadora de desenvolvimento, caso produza condições adequadas para o desenvolvimento das funções urbanas, valorizando o ambiente construído e

utilizando o rio como fator de atração para o desenvolvimento e não condutor de deterioração urbana.

Portanto, o sistema de drenagem pode (e deve) ser visto como um caminho para ordenar espaços urbanos, quando se trabalha preventivamente, ou como um catalisador de mudanças, quando a mitigação de inundação é necessária. A necessidade de mitigação, por sua vez, leva à uma busca por espaços de armazenamento e possibilidades de infiltração, no intuito de recuperar funções hidrológicas perdidas durante a própria expansão urbana. Nesse contexto, o trabalho apresentado verificou a importância do sistema de espaços livres de uma bacia hidrográfica para o sistema de manejo de águas pluviais e o considerou como fundamental para a sustentabilidade, criando harmonia entre o ambiente construído e o espaço livre.

O déficit de capacidade de condução das águas pluviais pelas tradicionais redes de drenagem resulta em um volume de inundações espalhados pela cidade. Ao integrar os espaços livres como soluções multifuncionais na rede de manejo de águas pluviais, potencializa-se soluções para armazenamento do sistema de drenagem. Assim, parte do sistema de espaços livres pode ser utilizado como reservatórios de amortecimento, diminuindo os picos de vazão nos eventos extremos, ou como reservatórios de retenção, com lagos permanentes. Isso, além de aumentar as oportunidades de infiltração retirando parte da água do sistema e devolvendo para o solo, oferece a possibilidade de melhoria na qualidade da água. Outra percepção importante vem da possibilidade de utilizar este sistema de espaços livres também para a recomposição ambiental. Em geral, é frequente encontrar uma grande fragmentação de áreas verdes em cidades mais densas. O uso de parques lineares ao longo dos rios oferece caminhos longitudinais capazes de diminuir esta fragmentação, conectando áreas verdes naturais e parques urbanos em uma rede de caminhos que favorecem o fluxo de matéria e energia.

A concepção do Sistema de Espaços Livres neste trabalho é um produto a ser desenvolvido, uma vez que o foco principal recaiu na definição de áreas importantes para o sistema de drenagem, sem a participação de um urbanista ou paisagista, em uma composição multidisciplinar que seria fundamental em uma proposta final. Porém, o sistema proposto foi considerado fundamental para composição da paisagem e qualificação do ambiente urbano em sua interface com as demandas do ambiente natural. Mesmo que estes ganhos não tenham sido quantificados especificamente, a integração dos espaços livres de uma bacia contribui significativamente para promover a aproximação da sociedade com o meio natural.

Uma série de indicadores foram propostos para verificação dos ganhos da implementação de um projeto multifuncional de drenagem apoiado em um sistema de espaços

livres, para representar as interações entre todos os eixos estruturantes da cidade considerados (habitação, sistemas de esgotamento sanitário, mobilidade, equipamentos sociais, economia e patrimônio cultural) e o eixo estruturante da drenagem urbana.

De forma específica e como caso de estudo, foi trazida para discussão a bacia do Rio Acari, na cidade do Rio de Janeiro, que tem enormes problemas de inundação, um histórico de ocupações inadequadas, com fragilidades ambientais e urbanas e vetores diversos de degradação, com lacunas importantes de infraestrutura e uma população carente, que sofre muito com inundações e condições precárias de saneamento. A bacia do Rio Acari tem ainda limitados espaços livres, principalmente em sua área mais baixa, onde a ocupação é muito densa e áreas de ocupação informal e irregular toma as margens do rio.

O diagnóstico do sistema de macrodrenagem do Rio Acari realizado com auxílio de simulações matemáticas permitiu observar extravasamentos dos cursos d'água em diversos locais. A região mais crítica em relação às inundações se encontra no trecho mais a jusante do Rio Acari, entre o Rio dos cachorros e o Rio Calogi. Este trecho apresenta severos problemas de inundação gerados pelo grande volume de águas pluviais da bacia contribuinte como um todo que acabam se acumulando nesta área mais baixa, somados à incapacidade de escoamento do Rio Acari e à falta de margens de inundação para alocação dos volumes de cheia. São encontradas nesta região lâminas de inundação urbanas superiores a 2 metros.

A construção de um projeto de macrodrenagem idealizado para controle das críticas inundações encontradas na bacia do Rio Acari contou com a realização de diversas simulações matemáticas com o auxílio do MODCEL, em etapas intermediárias e acumulativas de construção do projeto, que foram fundamentais para a escolha das intervenções apropriadas para a realidade da bacia hidrográfica perante a sua dificuldade em encontrar espaços para alocação do volume de cheias. O projeto final escolhido contou com correções estruturais básicas do sistema de drenagem urbana (revisão dimensionais de pontes e galerias), a limpeza e dragagem dos principais cursos d'água, a implementação dos reservatórios propostos no âmbito do PDMAP, a incorporação de um Sistema de Espaços Livres com foco no controle de cheias e sua complementação com parques fluviais.

As manchas de inundação gerada pelas falhas do sistema de drenagem na situação atual e na situação de projeto foram sobrepostas com as diversas camadas representativas dos demais eixos de planejamento. A sobreposição das camadas permitiu encontrar indicadores predecessores e posteriores à implementação do projeto e do SEL e quantificar os ganhos trazidos à cidade pelo bom funcionamento de um sistema de macrodrenagem. Os ganhos

trazidos pela implementação da proposta foram considerados excelentes e geraram: 73,5% de redução dos domicílios inundados; 48,6% de redução da lâmina média de inundação dos domicílios; 63,54% de diminuição de áreas contaminadas pela inundação de sistemas de esgotamento domiciliares; 66,2% de atenuação da severidade das vias inundadas; 47,8% menos estações do sistema de mobilidade urbana inundadas; 61,1% menos centros de saúde inundados; 61,2% de redução de centros educacionais inundados; ganhos trazidos a economia da bacia por mitigação de 62,9% das inundações em centros comerciais; e 100% de redução de patrimônios culturais inundados.

Especificar um sistema de espaços livres (SEL) multifuncionais na bacia e controlar o futuro uso e ocupação do solo em áreas estratégicas é uma parte significativa na metodologia de recuperação do sistema de drenagem. Como visto no caso estudado, os esforços para recuperar áreas degradadas por inundações são enormes, exigindo a incorporação de áreas de diversas áreas com usos já definidos no sistema de espaços livres; no entanto, os ganhos obtidos pela bacia como um todo são muito relevantes.

Levando em consideração somente o sistema habitacional como exemplo, o reassentamento de 2.300 domicílios para incorporação de áreas ao sistema de drenagem urbana fez com que 34.107 domicílios que se encontravam degradados pelas inundações passassem a não inundar em relação à chuva extrema de 25 anos de recorrência adotada. Os resultados representam uma eficiência de 15 domicílios não inundados a cada domicílio de uma área de risco reassentado.

Os resultados obtidos no caso corroboram com as hipóteses propostas, mostrando que as cidades com um uso ordenado e sustentável do solo, respeitando a dinâmica da água e preservando os espaços de água, podem responder de forma mais eficiente às inundações.

Os espaços livres multifuncionais propostos para incorporar a dinâmica das águas foram capazes de reduzir significativamente os níveis de água no rio principal, diminuindo as áreas inundadas e aumentando a segurança das estruturas hidráulicas na faixa de inundação. Pode ser destacado, assim, que um projeto adequado de sistema de drenagem deve preceder o planejamento urbano, evitando expor a população ao risco e, conseqüentemente, evitando a necessidade de ações de mitigação.

Como principal conclusão, considera-se que a drenagem deve ser consolidada como eixo estruturante do planejamento urbano, gerando oportunidades e desenvolvimento para outros eixos, demarcando locais de acordo com o risco de inundação que devem guiar o

desenvolvimento da cidade; e gerando uma interface amigável entre os ambientes naturais e construídos.

O trabalho não esgota a discussão sobre os impactos da drenagem nos diversos eixos da cidade, porém, abre caminho para a determinação da drenagem como estruturador do espaços e planejamento urbano.

Uma outra questão interessante se refere a aplicação e interpretação dos indicadores propostos em diferentes escalas. A lógica de trabalho em problemas de drenagem utiliza a bacia hidrográfica como área de planejamento, mas não se deve esquecer das particularidades dos eixos diversos em escalas menores de planejamento, dentro da cidade, uma vez que indicadores gerais para a bacia como um todo, podem não retratar realidades locais. Um exemplo disso foi observado quando os bairros de Acari e Marechal Hermes tiveram os indicadores de interface dos eixos com a drenagem quantificados de forma separada. Os resultados mostraram que para a situação de diagnóstico, os indicadores obtidos para a bacia como um todo não retratavam de forma correta a realidade destes bairros, que apresentavam prejuízos muito maiores no que diz respeito a inundações. Da mesma forma, após a implementação do projeto, os ganhos gerais apresentados para a bacia hidrográfica eram inferiores aos ganhos trazidos para estes bairros pela mitigação das inundações. Não se defende apenas um olhar local para a interação dos eixos da cidade com a drenagem, mas sim a necessidade de abordar os problemas da cidade sempre com diversas escalas de planejamento, complementando a visão macro da bacia com a visão meso e micro, sempre que identificadas diferenças urbanas locais. Nesse contexto, seria possível e desejável evoluir a avaliação de indicadores de um número integrado para a bacia, para mapas especializados, com possibilidade de visualização de áreas mais ou menos carentes em cada eixo específico.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, A. A. Q. et al. Metodologia para Levantamento e Classificação dos Espaços Livres de uma Bacia Hidrográfica com Foco na Solução dos Problemas de Drenagem Urbana. Congresso ABES FENASAN 2017. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017.

CAPPS, K., BENTSEN, C. AND RAMÍREZ, A. Poverty, urbanization, and environmental degradation: urban streams in the developing world. *Freshwater Science*, 35(1), pp.429-435, 2016.

CHANDRASENA, D. C. N. et al. Blocked Drains Syndrome: Physical Degradation of the Storm Drainage System in a Compact City. *Advanced Science Letters*, v. 23, n. 2, p. 1407-1411, 2017.

CONSORCIO HIDROSTUDIO - FCTH. Plano Diretor De Manejo De Aguas Pluviais Do Município Do Rio De Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

EUROPEAN COMMISSION, 2012. COM 673 final. A Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources, 2012.

GUIMARÃES, L. F., Metodologia para avaliação da capacidade de recuperação em função de prejuízos de sucessivos eventos de inundação. Thesis, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

MAGALHÃES P. C. et al., Operação do Serviço de Esgoto sob o Princípio do Poluidor-Pagador. XI Encontro Nacional de Águas Urbanas. Belo Horizonte, 5 a 7 de julho de 2017.

MAGALHÃES, P. C., MIGUEZ, M. G., Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana do Rio de Janeiro – Eixo Estruturante de Saneamento e Resiliência Ambiental. Câmara Metropolitana do Rio de Janeiro, 2018.

MCCONNELL, V.; WALLS, M. The value of open space: evidence from studies of Nonmarket benefits. *Resources for the Future*. January 2005.

MCKEE, L. et al. A review of urban runoff processes in the Bay Area. *San Francisco Estuary Institute Contribution*, 66, 2003.

- MEEROW, S. & NEWELL, J. P. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, v. 159, p. 62-75, 2017.
- MIGUEZ, M. G. 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*. In Tech, 2018.
- MIGUEZ, M. G.. Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas. 2001. 410 f. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P. *Drenagem Urbana: Do Projeto Tradicional à Sustentabilidade*. Elsevier Brasil, 2015.
- PARKINSON, J.; MARK, O. Urban stormwater management in developing countries. IWA publishing. 2005.
- PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. Programa Acari Projeto Rio Vivo. Secretaria Municipal de Urbanismo. Coordenadoria de Planos Locais 3a. Gerência De Planos Locais- 3a. GPL, setembro de 2007.
- SILVEIRA, A., Problems of modern urban drainage in developing countries. *Water Science and Technology*, v. 45, n. 7, p. 31-40, 2002.
- TEJASWINI, V.; SATHIAN, K. K. (2018). Calibration and Validation of Swat Model for Kunthipuzha Basin Using SUFI-2 Algorithm. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 7(1), 2162-2172.
- WALSH, C., ROY, A., Feminella, J., Cottingham, P., Groffman, P. and Morgan, I. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3), pp.706-723, 2005.
- WANG, L., VAN MEERVELD, H. J.; SEIBERT, J. (2017). When should stream water be sampled to be most informative for event-based, multi-criteria model calibration?. *Hydrology Research*, 48(6), 1566-1584.
- WU, J. *Didactic Approaches in Riverfront City Landscape Design*. 2016.