

INTERAÇÕES ENTRE O RIO DOS MACACOS E A LAGOA RODRIGO DE FREITAS SOB A ÓTICA DOS PROBLEMAS DE DRENAGEM URBANA E AÇÕES INTEGRADAS DE REVITALIZAÇÃO AMBIENTAL

Marcelo Gomes Miguez¹, Osvaldo Moura Rezende² & Aline Pires Veról³

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Escola Politécnica, Programa de Engenharia Ambiental. Av. Athos da Silveira Ramos, nº:149, CT, Bloco I, Sala I-206, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. CEP: 21941-909.

² Aquaflex Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos. Rua Hélio de Almeida, s/ nº, Prédio 2, sala 34, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. CEP: 21941-972.

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Engenharia Civil. Av. Athos da Silveira Ramos, nº: 149, CT, Bloco I, Sala I-206, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. CEP: 21941-909.
E-mails: marcelomiguez@poli.ufrj.br, omrezende@aquaflex.com.br, alineverol@coc.ufrj.br

RESUMO

A Lagoa Rodrigo de Freitas é um dos mais belos cartões postais da cidade do Rio de Janeiro. Sua beleza, porém, não esconde problemas de infraestrutura que se acumularam com o tempo. O ambiente da Lagoa Rodrigo de Freitas, hoje, perdeu muito de suas características naturais. Nesse contexto, a intensificação da urbanização do entorno da Lagoa leva a um quadro de problemas diversos, em que se destacam as enchentes na bacia contribuinte e a deterioração ambiental do sistema lagunar. As deficiências do sistema de drenagem e o não planejamento da urbanização produziram graves alagamentos nas áreas planas e ocupadas da bacia. A bacia do Rio dos Macacos é a principal bacia hidrográfica a desaguar na Lagoa Rodrigo de Freitas. Ela contém, em sua área de drenagem, parte dos bairros do Jardim Botânico, Lagoa, Gávea e Alto da Boa Vista. No entanto, apesar do aspecto bucólico de suas encostas, ela sofre com enchentes. O funcionamento da drenagem urbana, em condições de alagamentos extensos, quando o sistema falha e estruturas urbanas passam a exercer funções hidráulicas, gera uma complexa rede de escoamentos. Nesse contexto, a modelagem matemática se impõe como ferramenta de apoio ao diagnóstico sistêmico dos problemas da bacia e como suporte às decisões de projeto, na avaliação integrada do sistema e mapeamento de suas respostas, em face de distintos cenários possíveis de atuação. Esse capítulo procura mostrar os padrões atuais de escoamento no sistema composto por Rio dos Macacos-Rio Rainha-Canal do Jóquei-Lagoa, de modo a poder avaliar os impactos de um conjunto de obras de engenharia, propostas no âmbito da recuperação ambiental da Lagoa, sobre as enchentes na bacia do Rio dos Macacos e, mais especificamente, no bairro do Jardim Botânico. Como consequência, são também discutidas ações de controle de cheias no meio urbano e propostas obras complementares. Por fim, avança-se com a discussão da operação das estruturas hidráulicas existentes, em conjunto com outras propostas complementares, para manejo dos escoamentos que interagem com a Lagoa, dando versatilidade ao sistema, sob o ponto de vista tanto de controle de quantidade quanto de qualidade das águas pluviais. **Palavras-chave:** drenagem urbana; controle de cheias; revitalização ambiental; modelagem matemática; Lagoa Rodrigo de Freitas.

ABSTRACT

INTERACTIONS BETWEEN MACACOS RIVER AND RODRIGO DE FREITAS LAGOON, FROM THE PERSPECTIVE OF THE URBAN DRAINAGE PROBLEMS AND INTEGRATED ACTIONS OF ENVIRONMENTAL REVITALIZATION. Rodrigo de Freitas Lagoon is one of the most beautiful postcards of Rio de Janeiro city. Its beauty, however, does not hide infrastructure problems that have been accumulating along time. The environment of the Lagoon has lost much of its natural characteristics. In this context, the intensification of urbanization around it leads to various problems, such as the floods in its tributary basins and the environmental deterioration of the Lagoon system. The weakness of the drainage system and the lack of urban planning have

produced a critical flooding situation in the occupied plain areas of the basin. Macacos River basin is the main watershed to flow into Rodrigo de Freitas Lagoon. It contains, in its drainage area, part of the neighborhoods of Jardim Botânico, Lagoa, Gávea e Alto da Boa Vista. However, despite the bucolic aspect of its hill slopes, it suffers from floods. The functioning of urban drainage under conditions of severe flooding, when the system fails and urban structures begin to perform hydraulic functions, generates a complex flow network. In this context, mathematical modeling arises as an aid to obtain a systemic diagnosis of the basin problems and as a support to design decisions, in an integrated evaluation of the system and mapping of its responses, due to different possible scenarios of operation. This work aims to identify the current patterns of flow in the system composed by Macacos River-Rainha River-Jóquei Channel-Lagoon, in order to assess the impacts of a set of engineering works, proposed in the context of the environmental recovering of the Lagoon, over the Macacos River floods and, more specifically, in Jardim Botânico neighborhood. As a consequence, there is a discussion about flood control actions in urban areas and complementary works are proposed. Finally, there is also a discussion about the operation of the existing hydraulic structures, together with other structures that are proposed here, for the management of flows that interact with the Lagoon, giving versatility to the system from the point of view of both quantity and quality control of rainwater.

Keywords: urban drainage; flood control; mathematical modeling; environmental revitalization; Rodrigo de Freitas Lagoon.

RESUMEN

INTERACCIONES ENTRE EL RÍO DE LOS MACACOS Y LA LAGUNA RODRIGO DE FREITAS DESDE LA ÓPTICA DE LOS PROBLEMAS DE DRENAJE URBANO Y LAS ACCIONES INTEGRADAS DE REVITALIZACIÓN AMBIENTAL. La Laguna Rodrigo de Freitas es el paisaje de una de las más bellas postales de la ciudad de Río de Janeiro. Su belleza, sin embargo, no esconde los problemas de infraestructura que se han acumulado con el tiempo. El ambiente de la laguna ha perdido muchas de sus características naturales. En ese contexto, la intensificación de la urbanización del entorno de la laguna ha conllevado a una serie de problemas diversos, entre los que se destacan las inundaciones en sus cuencas tributarias y el deterioro ambiental del sistema lagunar. Las deficiencias en el sistema de drenaje y la falta de planificación de la urbanización han generado una situación crítica de inundaciones en las áreas planas ocupadas de la cuenca. La cuenca del río Macaco es una de las principales vertientes a la Laguna Rodrigo de Freitas y contiene dentro de su área de drenaje parte de los vecindarios de Jardim Botânico, Laguna Gavea y Alto de Buena Vista. Pero a pesar del aspecto bucólico de sus pendientes, sufre de inundaciones. El funcionamiento del drenaje urbano bajo las condiciones de inundación severa, cuando el sistema falla y las estructuras urbanas comienzan a desempeñar funciones hidráulicas, genera una compleja red de flujo. En este contexto, el modelamiento matemático surge como una ayuda para obtener un diagnóstico sistémico de los problemas de la cuenca y como soporte para la toma de decisiones. Lo anterior teniendo en cuenta que permite una evaluación integrada del sistema y el mapeo de sus respuestas en diferentes escenarios posibles de operación. El objetivo de este trabajo fue identificar los patrones actuales de flujo en el sistema compuesto por el río Macacos, el río Rainha, el canal Jóquei y la Laguna, con el fin de evaluar los impactos de un conjunto de obras de ingeniería, propuestas en el contexto de la recuperación ambiental de la laguna. Esas obras serían desarrolladas en la cuenca del Río Macacos (control de inundaciones) específicamente en el vecindario Jardim Botânico. Se revisaron las acciones para el control de las inundaciones en las áreas urbanas y se proponen trabajos complementarios. Finalmente se analizaron la operación de las estructuras hidráulicas existentes y otras estructuras propuestas aquí, para el manejo de las inundaciones que interactúan con la Laguna, ofreciendo versatilidad al sistema desde los puntos de vista del control de la cantidad y calidad de las aguas lluvias.

Palabras clave: drenaje urbano; control de inundaciones; modelamiento matemático; revitalización ambiental; Laguna Rodrigo de Freitas.

INTRODUÇÃO

A Lagoa Rodrigo de Freitas é uma área emblemática da cidade do Rio de Janeiro, um de seus mais belos cartões postais. A beleza da lagoa, porém, não esconde problemas de infraestrutura que se acumularam com o tempo. As ações antrópicas na região são intensas e o ambiente da Lagoa Rodrigo de Freitas, hoje, perdeu muito de suas características naturais. Nesse contexto, a evolução e adensamento da urbanização no entorno da lagoa marca a redução de seu espelho d'água, o lançamento de esgotos sanitários em seu interior e a restrição de sua comunicação com o mar, levando a um quadro de problemas diversos, em que se destacam as enchentes na bacia contribuinte e a deterioração ambiental do sistema lagunar. As redes de drenagem urbana, que têm foz na lagoa, encontram nos níveis d'água desta um fator condicionante de sua capacidade de descarga. As deficiências do sistema de drenagem e o não planejamento da urbanização, que respondeu às necessidades de cada momento histórico em particular, produziram graves alagamentos nas áreas planas e mais ocupadas da bacia. A busca de soluções para os problemas de cheia e recuperação ambiental da bacia, incluindo os sistemas fluviais, a lagoa e a interação com o mar, precisa de um foco integrado, pois há influências recíprocas entre estes.

A bacia do Rio dos Macacos é a principal bacia hidrográfica a desaguar na Lagoa Rodrigo de Freitas. Ela contém, em sua área de drenagem, parte dos bairros do Jardim Botânico, Lagoa, Gávea e Alto da Boa Vista. O Jardim Botânico e o Jockey Club Brasileiro se destacam na paisagem da bacia, que apresenta ainda uma grande área verde, com predominância de florestas em suas vertentes, contrastando com uma ocupação urbana intensa nas áreas baixas, junto à Lagoa Rodrigo de Freitas. A bacia do Rio dos Macacos, porém, apesar do aspecto bucólico de suas encostas, sofre com enchentes, cuja marca de referência é o alagamento da Rua Jardim Botânico, importante via de comunicação entre a Zona Sul e a Zona Oeste, com lâminas d'água que chegam a valores em torno de 1,0m de altura, em eventos mais intensos. O funcionamento da drenagem urbana, em condições de alagamentos extensos, quando o sistema falha e estruturas urbanas passam a exercer funções hidráulicas, gera uma complexa rede de escoamentos.

Canais vertem para ruas e estas passam a atuar como condutos complementares, alagando quadras e passando a integrar a rede de drenagem e a paisagem urbana. No caso da bacia do Rio dos Macacos, a situação torna-se ainda mais complexa, em função da interação com a lagoa e, em última análise, com o mar. Na sua condição presente, o Rio dos Macacos também interage com a bacia vizinha do Rio Rainha, por meio de um canal de drenagem que passa através do Jockey Club Brasileiro, permitindo escoamento nos dois sentidos, dependendo dos níveis d'água nos rios principais das duas bacias. Nesse contexto, a modelagem matemática surge como necessidade de apoio ao diagnóstico sistêmico dos problemas da bacia e como suporte às decisões de projeto, como forma de avaliação integrada do sistema e mapeamento de suas respostas, face a distintos cenários possíveis de atuação.

A concepção de um conjunto de ações estruturais, voltado para a recuperação ambiental da lagoa, deve levar em consideração aspectos relacionados com a drenagem de águas pluviais das bacias que contribuem para este corpo hídrico. A macrodrenagem representa uma questão de base. Na situação de cheias urbanas, a definição de canais e/ou áreas de armazenagem apresenta-se como necessária ao controle das cheias. Há uma relação entre qualidade e quantidade de água que não pode ser desconsiderada. A implantação de ações de melhoria da qualidade depende, inicialmente, do controle da quantidade, garantindo a ordenação dos escoamentos. Em época de estiagem, porém, podem ser demandados controles específicos para a manobra dos escoamentos, com vistas a um melhor equacionamento dos problemas de qualidade da água. Nessa situação, um conjunto de comportas e/ou soleiras pode prover a capacidade necessária de desviar os escoamentos e definir seus caminhos.

Neste capítulo, procura-se mostrar, com base em estudos anteriores desenvolvidos pelos autores para a região, os padrões atuais de escoamento no sistema composto por Rio dos Macacos - Rio Rainha - Canal do Jockey - Lagoa, de modo a poder avaliar os impactos de um conjunto de obras de engenharia propostas no âmbito da recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas sobre as enchentes na bacia do Rio dos Macacos e, mais especificamente, no bairro do Jardim Botânico. Ferramentas de modelagem matemática são utilizadas para este fim,

sem perder de vista o caráter sistêmico das avaliações realizadas. Como consequência, e com finalidade complementar, são também discutidas ações de controle de cheias no meio urbano e são propostas obras adicionais àquelas de recuperação ambiental. Por fim, avança-se com a discussão da operação das estruturas hidráulicas existentes, em conjunto com outras que são aqui propostas, para manejo dos escoamentos que interagem com a Lagoa Rodrigo de Freitas, dando versatilidade ao sistema, tanto sob o ponto de vista de controle de quantidade das águas pluviais, como também de sua qualidade.

A ÁGUA E AS CIDADES

A água é um fator fundamental para o crescimento das cidades e, desde a Antiguidade, grandes civilizações floresceram junto a rios ou nas proximidades do mar. O abastecimento de água para consumo nas cidades, a veiculação e diluição de esgotos, a irrigação, a possibilidade de transporte, bem como o oferecimento de uma barreira de defesa natural são alguns dos múltiplos possíveis usos que sempre fizeram da água um recurso de grande importância. Há um paradoxo, porém, na relação entre as grandes cidades e o uso da água: a urbanização, acelerada após a era industrial, nem sempre foi acompanhada do planejamento necessário, nem do provimento da infraestrutura necessária, fatos que com frequência levam a problemas de degradação ambiental, afetando, em especial, a oferta dos recursos hídricos e deteriorando os ecossistemas associados à paisagem natural.

Durante séculos, a grande maioria da população concentrou-se nos campos, em áreas rurais, fato que começou a mudar com a Revolução Industrial. Até esta época, durante séculos, as cidades tinham menor importância (Benevolo 2001). A rapidez no processo de mudança do perfil de distribuição da população trouxe vários problemas de ocupação do solo urbano. A modificação do ambiente natural é uma característica marcante da urbanização.

A configuração de uma bacia hidrográfica natural é equilibrada e harmônica, com bosques protegendo o escoamento em encostas, vegetação ciliar protegendo as margens dos rios, a infiltração recarregando lençóis e garantindo a vazão de base. A ocupação urbana começa, normalmente, pelo

desmatamento de parte da bacia para instalação das comunidades e de alguma atividade produtiva, como a agricultura, por exemplo, num primeiro momento, e, depois, atividades industriais e comerciais. Por facilidade de construção e acesso, as áreas planas, mais próximas aos rios ou em planícies costeiras, são as primeiras a serem ocupadas e então a urbanização cresce em direção às encostas.

O processo de ocupação urbana provoca, desse modo, mudanças significativas na situação original de equilíbrio e no balanço hídrico da bacia. A substituição da vegetação natural por áreas construídas impermeabilizadas modifica as parcelas do balanço hídrico da região, fazendo diminuir a possibilidade de infiltração e aumentando o volume superficial de água disponível para escoamento. Mais ainda, estas áreas impermeabilizadas propiciam um escoamento das águas superficiais com uma velocidade maior do que aquela que podia ser adquirida no escoamento que encontrava a vegetação em seu caminho. Pode-se dizer, então, de forma geral, que o resultado desta modificação tende a aumentar e adiantar o pico de uma cheia, tendo em vista que mais água fica disponível para escoar, com o aumento da parcela de escoamento superficial, e que esta água passa a escoar mais rapidamente, pela diminuição das retenções superficiais, face à impermeabilização da bacia.

Com o crescimento da ocupação, a própria calha secundária do rio acaba recebendo obras de urbanização, com ruas e até quadras inteiras tomando o seu espaço, o que agrava ainda mais o processo de cheias. Uma vez eliminado o espaço que deveria ser deixado livre para acomodação das grandes enchentes, as águas acabam procurando outros caminhos, espalhando-se e atingindo regiões antes não alagáveis naturalmente.

Na maioria das vezes, esta situação é agravada por problemas de ordem socioeconômica. As populações mais pobres e carentes acabam se instalando em condições de sub-habitação, em áreas de pouca ou nenhuma infraestrutura urbana, configurando situações de risco. A coleta e tratamento de esgotos nem sempre é feita de forma adequada, sendo estes despejos frequentemente lançados nos corpos d'água sem nenhum tratamento. A questão dos resíduos sólidos e do lixo urbano também agrava o problema de degradação ambiental dos sistemas hídricos.

Um interessante registro histórico, a título de ilustração, refere-se ao trabalho de Giovanni Fontana, arquiteto do século XVI, que fez investigações sobre a cheia do Rio Tibre, em Roma, durante o Natal de 1598, resultando na publicação de um tratado em 1599 (Biswas 1970). Existiam, na época, numerosas controvérsias sobre a cheia do Rio Tibre, que, de acordo com Fontana, teve grandes efeitos negativos devido à falta de informação das pessoas que se estabeleceram próximo aos locais onde diferentes rios e canais aportavam no Tibre, bem como à falta de conhecimento dos resultados produzidos por chuvas e ventos fortes, que se fizeram presentes na época de ocorrência da cheia estudada. É interessante notar como essa observação de Fontana permanece atual. Muitas vezes, os efeitos das cheias são agravados, ainda hoje, por falta de conhecimento da população ribeirinha e pela ocupação de áreas inapropriadas.

Fontana efetuou um levantamento dos rios que contribuíam com volumes d'água para o Tibre, determinando a profundidade e a largura dos cursos d'água em condições normais e de cheia, de forma a determinar a área molhada da seção transversal de escoamento. A vazão foi então determinada pela fórmula " $Q = A$ ", ou seja, igualando a vazão do rio à área molhada da sua seção transversal ao escoamento, sem levar em conta a velocidade do mesmo – a correta representação da equação da Continuidade em regime permanente foi dada um pouco mais tarde, por outro italiano, Benedetto Castelli. A principal conclusão de Fontana indicava que era necessário melhorar as condições gerais do leito do rio, ampliando-o para eliminar os efeitos das enchentes em Roma – uma visão clássica de conduzir rapidamente os escoamentos para longe do local que se deseja proteger.

Diferentes abordagens podem se adequar a diferentes situações e a evolução destas abordagens varia, historicamente, com a com própria disponibilidade do ferramental tecnológico capaz de resolver o equacionamento proposto. O dimensionamento tradicional de uma rede de drenagem, em linhas gerais, usualmente divide a bacia urbana em bacias menores e, para estas sub-bacias, calcula vazões de contribuição, passando ao dimensionamento sem levar em consideração o caráter transiente deste tipo de escoamento. Mais recentemente, com a possibilidade do uso de modelos matemáticos e numéricos, pôde-se tratar com mais rigor o fenômeno

das enchentes urbanas e, principalmente, diagnosticar de forma sistêmica o comportamento do escoamento das cheias. Ainda assim, diferentes hipóteses, em função das considerações físicas inerentes ao modelo escolhido, tornam a discussão deste assunto bastante rica e variada.

Um projeto de drenagem deve, necessariamente, contemplar a bacia como um todo. O funcionamento da rede de drenagem, se ineficaz, pode vir a ser responsável por enchentes severas, devido à falta de capacidade de escoamento para as águas concentradas sobre ela. Dentro deste contexto, pode-se perceber a importância do funcionamento conjunto, integrado e harmônico das redes de micro e macrodrenagem e da relação desta última com o corpo receptor. Onde ocorre o adequado funcionamento integrado da rede, a microdrenagem é capaz de coletar, de forma distribuída sobre a bacia, as águas resultantes das chuvas, sem gerar alagamentos locais, levando-as, em seguida, até a rede de macrodrenagem, que, também com adequada capacidade, provê um escoamento seguro para as águas nela concentradas até sua descarga no corpo receptor.

Em geral, a definição da concepção do projeto de uma rede de drenagem deve-se desenvolver simultaneamente com o plano urbanístico que congrega o arranjo de ruas, quadras, praças e espaços públicos, sob o ponto de vista de uso do solo urbano, inclusive acompanhando as previsões de desenvolvimento e crescimento futuros. Esta preocupação se baseia na possibilidade de se chegar a uma situação de projeto integrado e uma visão maior do desenvolvimento da paisagem urbana, evitando casos economicamente indesejáveis em que o sistema de drenagem fica sem possibilidade de correção, por falta de espaço e de previsão.

AÇÕES DE CONTROLE DE CHEIAS E REQUALIFICAÇÃO DE CORPOS HÍDRICOS EM ÁREAS URBANAS

Práticas tradicionais de projetos de drenagem tendem a focar o problema do escoamento resultante na calha, em uma visão parcial do problema, de forma a adequá-la a este escoamento, envolvendo, em geral, obras de grande porte, grande custo e possibilidade de considerável impacto ambiental. Esta sistemática tradicional ataca a consequência indesejável, que,

no caso, é a concentração de um excesso de águas nas calhas ou condutos principais. No entanto, essa concepção muitas vezes é responsável pela transferência dos problemas de alagamento para os trechos situados a jusante, uma vez que parte de uma abordagem local, sem a consideração integrada do sistema.

A concepção tradicional de projeto, portanto, vem sendo complementada ou substituída por conceitos mais recentes, que buscam soluções sistêmicas para a bacia, com intervenções distribuídas, procurando resgatar padrões de escoamento próximos daqueles anteriores à urbanização e agregando preocupações de qualidade ao controle da quantidade d'água, além de valorizar a água da chuva como recurso a ser aproveitado, em uma abordagem integrada de manejo sustentável das águas pluviais urbanas. Em função de seu enfoque na compensação dos efeitos da urbanização, essas soluções são conhecidas como “técnicas compensatórias” e apresentam inúmeras vantagens em relação ao enfoque tradicional (Baptista *et al.* 2005). O emprego desse tipo de tecnologia possibilita a continuidade do desenvolvimento urbano com menores custos, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida nas cidades, com a recuperação e a preservação do meio ambiente e a redução das cargas de poluição de origem pluvial, criando condições para o desenvolvimento sustentável em áreas urbanas (Baptista *et al.* 2005). Neste contexto, o controle distribuído dos escoamentos, fazendo frente aos efeitos gerados pela própria urbanização, desponta como uma das principais alternativas de trabalho. A possibilidade de conjugar medidas de controle de enchentes com intervenções que agreguem valor ao espaço urbano, com funções múltiplas (Miguez *et al.* 2007), torna-se uma opção interessante, sob o ponto de vista de revitalização de áreas degradadas, com a otimização dos recursos investidos. Além disso, ao se controlar as vazões geradas sobre a bacia hidrográfica de forma distribuída, pode-se prescindir de áreas maiores para as intervenções, que precisariam ser destinadas ao armazenamento temporário da cheia, evitando grandes alagamentos, que ocorreriam por causa do extravasamento das redes de drenagem ou da incapacidade destas redes de receberem os escoamentos gerados.

Outra vertente que vem ganhando espaço como possibilidade de intervenção é a perspectiva de

requalificação ou, em sentido mais enfático, de renaturalização de rios (Rutherford *et al.* 2000, CIRF 2006, González del Tánago & García de Jalón 2007). A restauração fluvial pode assumir um papel principal na solução dos problemas mais importantes de uma bacia (risco de inundações, escassez de água, poluição hídrica, erosão e deposição de sedimentos, etc.) e não apenas como um ator complementar. A recuperação fluvial pode prover um conjunto de ferramentas técnicas e metodológicas tanto para o planejamento como para o projeto de intervenções e a gestão da bacia hidrográfica num contexto mais integrado e mais sustentável em relação à escola clássica. Esse, no entanto, é um grande desafio em cidades, pela intensidade das modificações impostas aos rios em áreas urbanas. Os métodos empregados, as lições aprendidas e os resultados dos processos de requalificação de rios em áreas menos perturbadas, com paisagens rurais e naturais, não são transferíveis para paisagens altamente urbanizadas, nas quais as superfícies são mais impermeáveis e possuem consideráveis alterações nas características geomorfológicas, hidrológicas e ecológicas da bacia de captação (Herzog *et al.* 2007). Mais do que isso, muitas vezes o ambiente construído do entorno do rio precisa ser, de fato, protegido e preservado de cheias, demandando obras que o modificam. Nesses casos, os conceitos de recuperação fluvial precisam ser adaptados e, eventualmente, reinterpretados, o que é um dos desafios existentes atualmente. Porém, essa alternativa abre uma possibilidade interessante, com um enfoque abrangente, procurando tratar a questão fluvial sob uma ótica multidisciplinar e reconhecendo a necessidade de preservação também de ambientes naturais, integrados ao ambiente construído.

De acordo com Gusmaroli *et al.* (2011), adotar uma abordagem ecossistêmica, com objetivo de complementar ou substituir o conceito de *waterfront design* (recuperação da relação entre rio e cidade em torno da linha onde eles se encontram), traz a oportunidade de propor uma recuperação fluvial, sob o ponto de vista de melhoria ambiental, olhando para a cidade como um organismo em constante transformação e, portanto, provavelmente capaz de moldar-se, mesmo que em parte, às demandas de resgatar características naturais em torno do curso de água. Neste sentido, trata-se de um desafio de encontrar formas de recuperar os rios de forma mais

natural e repensar o crescimento da cidade em função disso.

A requalificação fluvial, sob a ótica dos rios, engloba: aspectos hidrológicos, hidráulicos e morfológicos, de qualidade da água e ecossistêmicos (CIRF 2006). Nas cidades, a diminuição do risco hidráulico, com o controle de inundações, a reconexão do rio a suas planícies de inundação, eventualmente com a introdução do conceito de parques fluviais urbanos inundáveis (Carneiro 2008) e a melhoria da qualidade da água são fatores que se destacam neste contexto, como temas que podem marcar o início de um processo de requalificação fluvial em ambiente urbano.

OCUPAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO DOS MACACOS E ENTORNO DA LAGOA RODRIGO DE FREITAS

BREVE CONTEXTO HISTÓRICO DE OCUPAÇÃO DA BACIA

A ocupação e o uso do solo na bacia evoluíram ao longo do tempo passando por várias fases bastante distintas, cujo conhecimento ajuda a entender a ocupação atual. O texto a seguir é uma adaptação resumida do material disponível no Armazém de Dados do Instituto Pereira Passos (Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro 2003) acerca da evolução e ocupação urbana das bacias da Zona Sul do Rio de Janeiro.

No século XVI, após sua posse, em 1571, o governador Cristóvão de Barros funda o Engenho d'El Rey, no local onde atualmente se encontra o Jardim Botânico, às margens de uma lagoa de águas salobras conhecida pelo nome indígena Çapôpenypau, que significa "lagoa das raízes chatas". No século XVII, a vasta região é dividida em dois outros engenhos, o de Nossa Senhora da Cabeça e o de Nossa Senhora da Conceição da Lagoa. Em 1611, Sebastião Fagundes passa para seu genro, Rodrigo de Freitas Mello e Castro, o Engenho de Nossa Senhora da Conceição da Lagoa, cujos herdeiros conservam a posse das terras até o início do século XIX. O belo espelho d'água cercado por morros ganha então a sua atual denominação – Lagoa Rodrigo de Freitas. Durante mais de dois séculos, a propriedade permanece com os herdeiros de Rodrigo de Freitas. A chegada

da família real, no início do século XIX, levou à implantação da Fabrica Real de Pólvora nas margens da Lagoa e à criação do Horto Imperial, precursor do atual Jardim Botânico. A fábrica incendiou-se ainda na primeira metade do século XIX, parte das suas ruínas ainda está preservada no Jardim Botânico, assim como o pórtico da extinta Real Academia de Belas Artes. A partir da segunda metade do século XIX, com o declínio da produção de cana-de-açúcar, os diversos engenhos foram desativados e as fazendas se fragmentaram em chácaras de menores dimensões. A chegada do bonde, em 1871 – inicialmente à tração animal, depois substituídos por elétricos, em 1902 – trouxe grande valorização aos terrenos das chácaras remanescentes. No final do século XIX, tem início a ocupação da área por indústrias têxteis com suas vilas operárias. Essa ação transforma os bairros da Gávea e do Jardim Botânico em uma das regiões mais industrializadas do Rio de Janeiro no final do século XIX. Nos primeiros anos do século XX, o então prefeito Pereira Passos iniciou um plano de reforma urbana que incluía o saneamento da Lagoa Rodrigo de Freitas. Na administração do prefeito Carlos Sampaio (1920-1922), são realizadas importantes obras pelo sanitarista Saturnino de Brito, referentes ao aterramento e saneamento na orla da Lagoa, que muda mais fortemente de fisionomia. A Avenida Epitácio Pessoa é inaugurada e são regularizados o canal de escoamento do Jardim de Alá e o canal no eixo da Avenida Visconde de Albuquerque, no Leblon. Em 1926, foi fundado o Jôquei Clube Brasileiro. Na década de 1940, foram fechadas as fábricas têxteis, encerrando a fase industrial do bairro do Jardim Botânico. Com o retalhamento das antigas chácaras ao longo da primeira metade do século XX e a saída das fábricas da região, os terrenos locais foram loteados, reforçando a nova vocação residencial do bairro. É nas áreas que circundam a Lagoa Rodrigo de Freitas, especialmente na orla do Jardim Botânico, que surgem os primeiros núcleos residenciais dos bairros. A expansão do Jardim Botânico se faz mediante aterramentos realizados em direção ao Vale dos Macacos e ao talude do Corcovado. Esses novos lotes são inicialmente tomados por casarões e, posteriormente, ocupados por edifícios de apartamentos de alto luxo. O governador Carlos Lacerda, por sua vez, retirou algumas favelas da região e inaugurou, em 1967, o Túnel Rebouças,

que permanece ainda como uma das principais ligações entre as zonas Norte e Sul da cidade. Em 1975, o prefeito Marcos Tamoyo promulgou um decreto que proibia qualquer alteração adicional no espelho d'água. No mesmo ano, o prefeito estabelece o alinhamento das margens e a sua utilização para

fins recreativos, sendo em seguida criado o Parque da Catacumba, após a remoção da favela que ali existia.

A Figura 1 mostra a evolução da ocupação da região da Lagoa Rodrigo de Freitas ao longo do tempo, marcando a redução de sua área superficial e a urbanização do entorno.



Figura 1. Evolução da ocupação urbana na região da Lagoa Rodrigo de Freitas (Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro 2011).

Figura 1. Evolution of urban occupation in the region of Rodrigo de Freitas Lagoon (City hall of Rio de Janeiro 2011).

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

A bacia hidrográfica do Rio dos Macacos está situada na sub-bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, que, por sua vez, faz parte da sub-bacia da Zona Sul, no município do Rio de Janeiro. Ela engloba parte dos bairros do Jardim Botânico, Lagoa, Gávea e Alto da Boa Vista, com cerca de 300 mil habitantes. O bairro do Jardim Botânico possui uma das maiores rendas *per capita* da bacia e o bairro da lagoa, por sua vez, uma das maiores rendas *per capita* do município do Rio de Janeiro.

A bacia tem importância estratégica para a cidade, por estar diretamente ligada a corpos receptores de complexa gestão ambiental, por conter diversos pontos turísticos e também algumas das mais movimentadas vias de trânsito da Zona Sul do município. Além da Lagoa Rodrigo de Freitas e da praia do Leblon, que são algumas das paisagens mais visitadas do Brasil, outros pontos turísticos podem ser destacados, próximos ou dentro da bacia: o parque do Jardim Botânico, a Vista Chinesa e as Paineiras, além do acesso à estátua do Cristo Redentor. No que diz respeito ao trânsito, na bacia do Rio dos Macacos estão inseridas vias de elevado fluxo, com tráfego diário de cerca de 200 mil veículos. Ela é atravessada pela Rua Jardim Botânico e pela Avenida Borges de Medeiros, ambas importantes vias de acesso ao centro

da cidade e à Barra da Tijuca, bairros com atividade econômica muito intensa.

O relevo da bacia é característico do Estado do Rio de Janeiro, com maciços e baixadas litorâneas. A encosta da serra ocupa a maior parte do território da bacia e, ao longo desse percurso, recebe denominações diferentes, como Maciço da Tijuca, Serra da Carioca e Serra do Corcovado. No morro do Sumaré, no qual se encontram as torres de transmissão de diversas emissoras de televisão brasileiras, as elevações chegam a mais de 700m. A serra decai rapidamente até a Lagoa Rodrigo de Freitas. Sua encosta possui densas florestas, distribuídas pelo Vale do rio dos Macacos, nas Paineiras, na estrada do Sumaré, bem como na Floresta da Tijuca. Os mirantes das Paineiras, do Andaraí Pequeno, do Passo do Inferno, da Mesa do Imperador e da Vista Chinesa compõem pontos notáveis de observação da bacia. Próximo ao parque do Jardim Botânico, na região do Horto, ocorre o início da ocupação das encostas por construção de habitações irregulares. Caso essa tendência seja mantida e expandida, uma grande parte da cobertura vegetal e da parcela de solo permeável da bacia poderá ser perdida, intensificando o risco de alagamentos na região.

A bacia hidrográfica do Rio dos Macacos apresenta cerca de 9,07km² de área de drenagem, declividade média de 0,05894m/m e percentual de cobertura

vegetal da ordem de 40%. A proximidade de suas encostas, aliada à transição brusca destas para áreas de baixada, resultantes de aterros, indica a tendência de ocorrência de escoamentos velozes chegando às planícies, nas quais podem produzir alagamentos em função da mudança de declividade.

O principal rio da bacia é o próprio Rio dos Macacos, que lhe empresta o nome. Com cerca de 4,46km desde a região mais alta de encosta, onde nasce, passando por um trecho em galeria sob a Rua Jardim Botânico e chegando, por fim, até a lagoa, o Rio dos Macacos recebe a contribuição de vários córregos pela margem esquerda, vindos das vertentes do maciço da Tijuca. Destaca-se especialmente a contribuição do Rio Cabeça, seu principal tributário, que aflui ao curso principal em confluência na Rua General Garzón. Pela margem direita, também em região próxima à sua foz, ocorre uma situação de possível transposição de vazões entre a bacia do Rio dos Macacos e a bacia do Rio Rainha. O canal que chega pelo Jóquei Clube Brasileiro liga as duas bacias, com fundo praticamente plano. Em condições de cheia, dependendo da intensidade do fenômeno em

cada bacia, as vazões do Rio Rainha podem chegar ao Rio dos Macacos, ou, ao contrário, o Rio dos Macacos pode passar a desaguar também na praia do Leblon, a partir do canal da Rua Visconde de Albuquerque. O exutório da bacia ocorre na Lagoa Rodrigo de Freitas, junto ao Clube Naval Piraguê, através de um canal artificial que segue pela Rua General Garzón. Junto à sua foz existe uma comporta, que permanece fechada durante a maior parte do tempo. Em condições de marés mais elevadas, essa comporta pode se encontrar submersa.

A urbanização se desenvolve principalmente nas áreas mais baixas e planas, espalhando-se em uma estreita, porém extensa faixa de área impermeabilizada, entre a Lagoa Rodrigo de Freitas e o maciço da Tijuca. Em eventos de chuva intensa, é usual o alagamento das ruas mais baixas da bacia, em especial da própria Rua Jardim Botânico, onde a rede de drenagem mostra-se insuficiente.

A Figura 2 apresenta uma foto da bacia, obtida a partir do aplicativo *Google Earth*, indicando seu posicionamento em relação a alguns pontos importantes da cidade.



Figura 2. Foto de satélite da bacia do Rio dos Macacos, com a Lagoa Rodrigo de Freitas como limite de jusante. Destaques para o Rio dos Macacos, em trecho dentro do Jardim Botânico (à esquerda, embaixo), e para o Canal do Jóquei (à direita, embaixo). Figura adaptada de Google Earth (2009).

Figure 2. Satellite photo of Macacos river basin, with Rodrigo de Freitas Lagoon as the downstream boundary. It is important to note Macacos River, in a section inside the Botanical Garden (left, bottom), and the Jockey Channel (right, bottom). Figure adapted from Google Earth (2009).

A Figura 3 mostra um detalhe da região da foz do Rio dos Macacos, com as confluências do Rio Cabeça e do Canal do Jóquei.



Figura 3. Detalhe da foz do Rio dos Macacos, na Lagoa Rodrigo de Freitas. Figura adaptada de Google Earth (2009).
Figure 3. Detail of the river mouth of Macacos River, in Rodrigo de Freitas Lagoon. Figure adapted from Google Earth (2009).

Por fim, cabe ressaltar que a hidrografia da bacia, tomando o Rio dos Macacos como principal, pode ser complementada pelos rios perenes que definem 7 sub-

bacias de encosta, conforme Tabela 1. As demais sub-bacias de encosta apresentam rios efêmeros, ou seja, existentes apenas durante um curto período após o início da chuva.

Tabela 1. Caracterização das sub-bacias do rio dos Macacos.
Table 1. Characteristics of Macacos River sub-basins.

Rio	Área (m ²)	Extensão (km)	Cotas de jusante e montante na extensão considerada (m)
dos Macacos (parte alta)	979.883	1,64	100 a 500
do Pai Ricardo	1.400.900	1,55	100 a 525
Xaxim	302.765	1,10	65 a 400
Ouriço	502.399	1,60	60 a 535
Sete Quedas	828.358	1,54	55 a 500
Algodão	647.174	1,00	65 a 470
Cabeça	1.438.490	1,52	55 a 430
do Grotão	496.863	1,42	25 a 230

Os rios Algodão e Cabeça, afluentes ao Rio dos Macacos, que se encontram mais a leste da bacia, não deságuam diretamente no rio principal. Ao chegarem no trecho inferior, eles escoam por galerias que saíram nos canais da Rua Batista da Costa e da Avenida Lineu

de Paula Machado, que chegam ao Rio dos Macacos. As contribuições de escoamento superficial das sub-bacias do Riacho do Pai Ricardo e do Rio Cabeça são as mais significativas, com as maiores áreas de drenagem dentre as descritas.

O restante da bacia é formado por trechos de parques, ruas, calçadas e edificações. Essas construções se encontram no trecho inferior, onde as inundações provocam maiores problemas econômicos e um maior impacto no trânsito. Nessa região, é possível destacar o Jóquei Clube Brasileiro e o Jardim Botânico como áreas com menores coeficientes de geração de escoamento superficial e com baixas declividades. Em contrapartida, os trechos mais impermeáveis e com maior movimentação de veículos são as ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão e as avenidas Lineu de Paula Machado e General Garzón, além dos seus arredores.

PLUVIOMETRIA

Na área em estudo, são encontradas diversas estações pluviométricas. A administração desses postos divide-se entre dois órgãos, a antiga Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA), hoje Instituto Estadual do Ambiente (INEA), e Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, hoje Fundação Geo-Rio, órgão da Secretaria Municipal de Obras da Prefeitura. Os postos administrados pelo INEA são os do Horto Florestal, Clube Caiçaras, Lagoa Rodrigo de Freitas e Chácara do Cabeça. Os administrados pela Geo-Rio são os do Jardim Botânico e Sumaré. Pela facilidade de obtenção de dados a partir da Subsecretaria de Águas Municipais, e pelo posicionamento geográfico, os postos do Jardim Botânico e do Sumaré foram os escolhidos para representar o regime de chuvas intensas da bacia.

O posto do Jardim Botânico se encontra no Jóquei Clube Brasileiro, na Rua Jardim Botânico, n.º 1003. Trata-se de uma estação remota, com leitura e transmissão automáticas de dados. Está posicionada em uma cota próxima à do nível do mar. Sua Equação de Chuvas Intensas, do tipo IDF, é definida pela Equação 1, apresentada a seguir (Fonte: Rio-Águas).

$$i = \frac{1239.T_R^{0,15}}{(t + 20)^{0,74}} \quad (1)$$

A estação pluviométrica do Sumaré está posicionada na torre de transmissão da Rede Globo, na Estrada do Sumaré, s/n.º. Ela é uma estação

concentradora, ou seja, com leitura e transmissão automática de dados, que ainda valida e retransmite os dados recebidos de estações remotas para a estação central, e está posicionada na cota 768m. De acordo com os dados observados no Sistema Alerta Rio, esse é o posto que apresenta as maiores medições de precipitações dentre aqueles administrados pela Geo-Rio e que integram este sistema. Esse dado indica que a região apresenta uma grande influência de chuvas orográficas.

Infelizmente, porém, não está disponível uma Equação IDF para o posto do Sumaré. Com isso, foi necessária a utilização de dados de outra região com características hidrológicas semelhantes, para que o objetivo pretendido de representar o efeito orográfico fosse alcançado. Nesse sentido, o posto pluviométrico escolhido foi o da Capela Mayrink. Essa estação é administrada pelo INEA e sua equação IDF foi atualizada (por técnicos da Subsecretaria de Águas Municipais) de forma bastante apurada, com uma série histórica de cerca de 30 anos, disponibilizada em 2004. Ela está localizada no bairro do Alto da Boa Vista, também conhecido por ser uma região muito úmida e situado próximo às montanhas onde se encontra o posto do Sumaré. O posto está posicionado a uma altitude de 460m. A equação disponível está apresentada na Equação 2 (Fonte: Rio-Águas).

$$i = \frac{921,39.T_R^{0,162}}{(t + 15,46)^{0,673}} \quad (2)$$

A partir dessas informações, estabeleceram-se as áreas de influência dos respectivos postos, a fim de definir a abrangência destes em relação aos estudos hidrológicos desenvolvidos neste trabalho. De um modo geral, para a planície foi usada a equação do posto do Jardim Botânico e para as encostas foi usada a equação do posto da Capela Mayrink, que representou os dados não disponíveis do Sumaré.

MODELAGEM MATEMÁTICA, COMO APOIO AO ESTUDO DE CHEIAS

A modelagem matemática de um dado fenômeno físico procura traduzi-lo em formulações a partir de hipóteses simplificadoras, consideradas aceitáveis conforme os objetivos estabelecidos. A representação

de um fenômeno físico não é, em geral, uma atividade simples. Pelo contrário, normalmente a complexidade associada é grande e tanto mais difícil quanto maior a escala espacial de ocorrência do fenômeno e sua variabilidade nessa escala. Uma maior variabilidade, em geral, limita as possibilidades de simplificação do processo de modelagem. Em uma bacia urbana, diversos aspectos tornam ainda mais diversificada e complexa a modelagem de uma cheia, como a quantidade de estruturas hidráulicas envolvidas, a grande ramificação das redes de drenagem, a possibilidade de transição de escoamentos à superfície livre para escoamentos sob pressão, a formação de áreas de preservação e o fato prático de que as ruas passam a atuar como uma rede de canais complementares.

A escolha do modelo adequado para uma dada aplicação é uma decisão fundamental dentro do próprio processo de modelagem. Nesse contexto, destacam-se, como necessidades básicas para o processo de modelagem, a identificação e caracterização do problema, com o diagnóstico de suas principais causas, a caracterização dos principais processos intervenientes no problema em estudo e a identificação das possíveis hipóteses simplificadoras para, por fim, chegar a uma formulação coerente para o modelo mais adequado aos objetivos propostos.

É comum tratar-se o problema de cheias em rios e canais de forma unidimensional, extrapolando-se os resultados de nível d'água na calha principal para as planícies, ou seja, para as regiões próximas que sofrem alagamentos. Nas enchentes urbanas, em grande parte das abordagens de modelagem, o problema é tratado da mesma forma, mas considerando uma rede de drenagem ramificada, eventualmente aceitando galerias fechadas e escoamento sob pressão. Entretanto, esta ótica refere-se à consideração de que o extravasamento do rio, ou da rede de drenagem, é a causa única e direta dos alagamentos. Conceitualmente, esta consideração é pertinente, pois as enchentes são definidas como o resultado do extravasamento da calha do rio, provocando inundações. Este tipo de abordagem, contudo, melhor se enquadra ao caso de cheias urbanas em países desenvolvidos, nos quais, realmente, a infraestrutura disponível garante o funcionamento da drenagem conforme previsão de projeto, com a microdrenagem adequadamente dimensionada interagindo com a

macrodrenagem de forma harmônica, não sendo as ruas alagadas senão residualmente ou, em casos extremos, pelo extravasamento dos rios e canais.

No caso de cheias urbanas, em que as condições da rede não são as ideais, porém, esta consideração pode se revelar menos abrangente do que seria necessário para a representação do fenômeno no ambiente construído. Há uma diversidade ainda maior neste caso, com inúmeras possibilidades de escoamento, não só pela rede de drenagem, mas também sobre a paisagem urbana, que dispõe de estruturas diversas do cenário cotidiano que podem revelar-se verdadeiras estruturas hidráulicas na passagem das cheias. Pode-se dizer, por exemplo, que uma rua que tenha captação de microdrenagem insuficiente, seja por subdimensionamento, por obsolescência, por entupimento das bocas de lobo com resíduos sólidos urbanos, ou por qualquer outro motivo, funcionará como um verdadeiro canal para o escoamento superficial, de forma independente da rede de drenagem principal, podendo levar a água da chuva a alagar áreas quaisquer, mesmo sem que a própria rede tenha ainda extravasado. Onde ocorrem afogamentos, as ruas passam a interagir com as galerias subterrâneas, podendo receber de volta parte da água destas. Assim, ruas se tornam canais, muros de parques se tornam vertedouros, os próprios parques, praças e quadras, em geral, se tornam reservatórios, indesejavelmente, concentrando águas que não retornarão à rede de drenagem. Tudo isso acaba por complementar a rede de macrodrenagem e se integrar a esta em termos de funcionamento.

Estes fatos tornam difícil a aplicação dos conceitos de modelagem mais tradicionais ao problema de cheias urbanas, demandando uma abordagem sistêmica para a bacia, ou seja, é necessária a modelagem da bacia com as interações de todas as suas diversas partes e a integração entre as várias estruturas hidráulicas existentes com a paisagem urbana.

Nesse contexto, percebe-se que há indicações para o uso de um modelo de características sistêmicas, capaz de representar hidráulica e hidrologicamente, de forma distribuída, a superfície da bacia. Esta necessidade pode ser acolhida pela concepção de células de escoamento, originalmente concebida por Zanobetti *et al.* (1970), para representação de grandes planícies rurais alagáveis, e depois adaptada para o contexto de bacias urbanas por Miguez (2001). A

representação do espaço urbano se faz através de um conjunto de células que atuam como compartimentos homogêneos que integram o espaço da bacia. Essa é uma formulação dita *quasi*-bidimensional, que representa o espaço e suas interações bidimensionais, mas adota equações unidimensionais, sendo capaz de particularizar a representação de diferentes estruturas hidráulicas, complementares à rede de canais, formando uma rede multidirecional de escoamentos, além de realizar processos hidrológicos associados aos escoamentos superficiais sobre toda a bacia, particularizando esses caminhos. Esse modelo hidrodinâmico recebeu o nome de MODCEL (Miguez 2001, Mascarenhas & Miguez 2002, Mascarenhas *et al.* 2005, Miguez *et al.* 2011), sendo apropriado na representação de sistemas hídricos complexos, com diferentes leis hidráulicas intervenientes.

DIAGNÓSTICO DE CHEIAS NA BACIA DO RIO DOS MACACOS E SUA INTERAÇÃO COM A LAGOA

A bacia do Rio dos Macacos é composta por uma complexa rede de escoamentos, que combina trechos de canal natural e artificial com galerias de drenagem. A parte mais baixa e plana da bacia conta com várias áreas que permitem armazenamentos temporários e escoamentos superficiais, formando redes secundárias e complementares ao próprio sistema de drenagem. Outro fator que aumenta a complexidade de funcionamento da rede de drenagem refere-se à possibilidade de transposição de parte da vazão entre os rios dos Macacos e Rainha, através do Canal do Jóquei. Há, ainda, a interferência de maré na foz do sistema, agindo sobre a Lagoa Rodrigo de Freitas. Nesse contexto, justifica-se a escolha do MODCEL como ferramenta de apoio ao diagnóstico de cheias. Como citado anteriormente, a utilização do MODCEL pressupõe a construção de uma rede bidimensional de escoamentos escritas nas diversas direções em que estes escoamentos podem ocorrer. A definição da rede de escoamentos, que se forma pela ação combinada da rede de drenagem e sua interação com a paisagem da bacia, é de fundamental importância para a modelagem, sendo crucial para o bom resultado da modelagem, e pode ser dividida entre as atividades de reconhecimento, interpretação

de padrões de escoamento, modelagem topográfica, hidráulico-hidrológica e topológica.

PREMISSAS BÁSICAS DE TRABALHO, AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO COMPORTAMENTO DA BACIA E CONFIGURAÇÃO DA MODELAGEM PROPOSTA

A definição da configuração final do modelo depende de algumas premissas assumidas a partir de duas linhas distintas de interpretação:

- o comportamento hidráulico da bacia deve ser pré-avaliado, a fim de se articular o modelo para gerar padrões de escoamento próximos do real e que possam ser ajustados e verificados a partir de medições de campo (processo de calibração);
- a representação topográfica e de ocupação urbana precisa ser pré-definida, a fim de gerar informações médias representativas da bacia.

Assim, sob o ponto de vista do comportamento hidráulico, a partir da avaliação do histórico de cheias na região, percebe-se que as áreas baixas são as mais afetadas, destacando-se a própria Rua Jardim Botânico, especialmente no cruzamento com a Rua Pacheco Leão. As imediações desta área registram níveis observados de alagamento da ordem de 0,80m a 1,00m, em situações de chuvas intensas. Há também registro de extravasamento do Rio dos Macacos a partir do canal da Rua General Garzón. Entretanto, este extravasamento parece ser menos significativo que as lâminas que se acumulam sobre as ruas de montante. Essa situação indica que a rede de drenagem parece ser insuficiente. Problemas de insuficiência da rede advêm basicamente de três fatores: subdimensionamento (seja por falha de planejamento, falta de controle da ocupação urbana ou obsolescência); falta de manutenção (com o acúmulo de sedimentos e resíduos sólidos diversos, que diminuem a capacidade de descarga da rede); e obstruções na foz (com restrições geradas pelo corpo receptor). O caso da bacia do Rio dos Macacos parece sofrer com um pouco de cada um destes três fatores: a falta de planejamento de ocupação, como pode ser evidenciada pelo breve histórico relatado anteriormente; a presença de assoreamento na calha e de trechos com singularidades ao escoamento; e a comporta de comunicação com a Lagoa Rodrigo de

Freitas, no canal da Rua General Garzón. As Figuras 4 a 7, com imagens da bacia, ilustram estas restrições citadas.

Pode-se citar ainda que as áreas mais altas, mesmo com vegetação de floresta, têm um papel fundamental na atenuação das vazões que chegam às planícies da bacia. Estas áreas não apresentam inundações, mas são capazes de reter uma grande quantidade de água. Além disso, o próprio Jardim Botânico, no coração da bacia, é responsável pelo armazenamento temporário de parte das vazões geradas.

Sob o ponto de vista de representação topográfica e de ocupação urbana, a inspeção local e a avaliação de fotos aéreas permitiu definir alguns parâmetros fundamentais de modelagem, a saber:

- a particularização de coeficientes de escoamento superficial para cada uma das células consideradas, que, individualmente, representam pequenas áreas da bacia, com características homogêneas, e que irão participar do processo de transformação de chuva em vazão, através da aplicação do método racional;

- a caracterização de um padrão de urbanização médio para a parte baixa da bacia, definindo alturas de meio fio, altura média do piso das edificações, percentagem de ruas, áreas livres e áreas edificadas.

A partir desta avaliação preliminar, que levou a uma série de premissas norteadoras e ao detalhamento das configurações internas do modelo, passou-se a dispor do conjunto básico de suporte ao estudo em questão.



Figura 4. Vista do Rio dos Macacos pouco antes de entrar em galeria, sob a Rua Jardim Botânico. No detalhe, entrada em galeria do Rio dos Macacos, dentro do Jardim Botânico, junto ao muro que define seu limite externo – percebe-se, nitidamente, o estrangulamento do escoamento, que sai de uma seção com largura superior a 6m para outra de cerca de 2,0m, depois de passar por um vertedouro. Acervo pessoal (Miguez 2009).

Figure 4. View of Macacos River just before the entrance of the river in an underground gallery, under Jardim Botânico Street. In the detail, Macacos River goes through the gallery, inside the Botanical Garden, near the wall that defines its outer limit – it can be clearly seen the constriction of the flow, leaving a 6m width section to another of about 2m, just after passing through a weir. Miguez (2009).



Figura 5. Detalhes de assoreamento do Rio dos Macacos, dentro do Jardim Botânico. Acervo pessoal (Miguez 2009).

Figure 5. Sedimentation in Macacos River, inside the Botanical Garden. Miguez (2009).



Figura 6. Vista da comporta que liga o Rio dos Macacos com a Lagoa Rodrigo de Freitas (na ocasião fechada). Comunicação franca do Rio dos Macacos com o Canal do Jóquei, por baixo da rua, na margem direita. Acervo pessoal (Miguez 2009).

Figure 6. View of the gate that connects Macacos River with Rodrigo de Freitas Lagoon (in the picture, the gate is closed). Free communication between Macacos River and the Jockey Channel, under the street, on the right river bank. (Miguez 2009).

MODELAGEM TOPOGRÁFICA E HIDRÁULICA

Diferentes tipos de células são utilizados para representar a superfície da bacia, integrando canais, galerias e áreas de armazenagem, levando em conta o padrão de urbanização. A interação entre as células, a partir da definição de leis hidráulicas adequadas, materializa, então, a rede de escoamentos representativa da região modelada, cujo esquema está representado na Figura 8.

No caso do Rio dos Macacos, foi criado um conjunto de 193 células (Figura 9), que representam em detalhes a bacia, cobrindo sua superfície desde as encostas onde nascem o rio principal e seus tributários, descendo para as áreas planas urbanizadas, chegando até à Lagoa Rodrigo de Freitas, através do canal da Rua General Gárzon, e até o mar, a partir da transposição que chega ao canal da Rua Visconde de Albuquerque, que desagua na praia do Leblon.



Figura 7. Vista do Canal do Jóquei e detalhe da sua entrada no canal da Rua Gal. Garzón. Acervo pessoal (Miguez 2009).

Figure 7. View of the Jockey Channel and a detail of its entry in the channel of Gal. Garzón Street. (Miguez 2009).

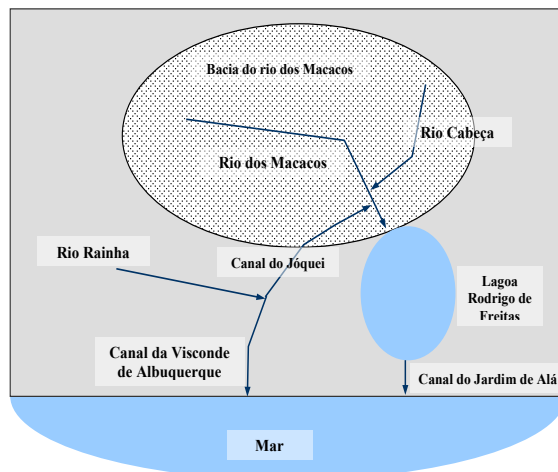


Figura 8. Representação esquemática da área estudada.

Figure 8. Schematic representation of the studied area.

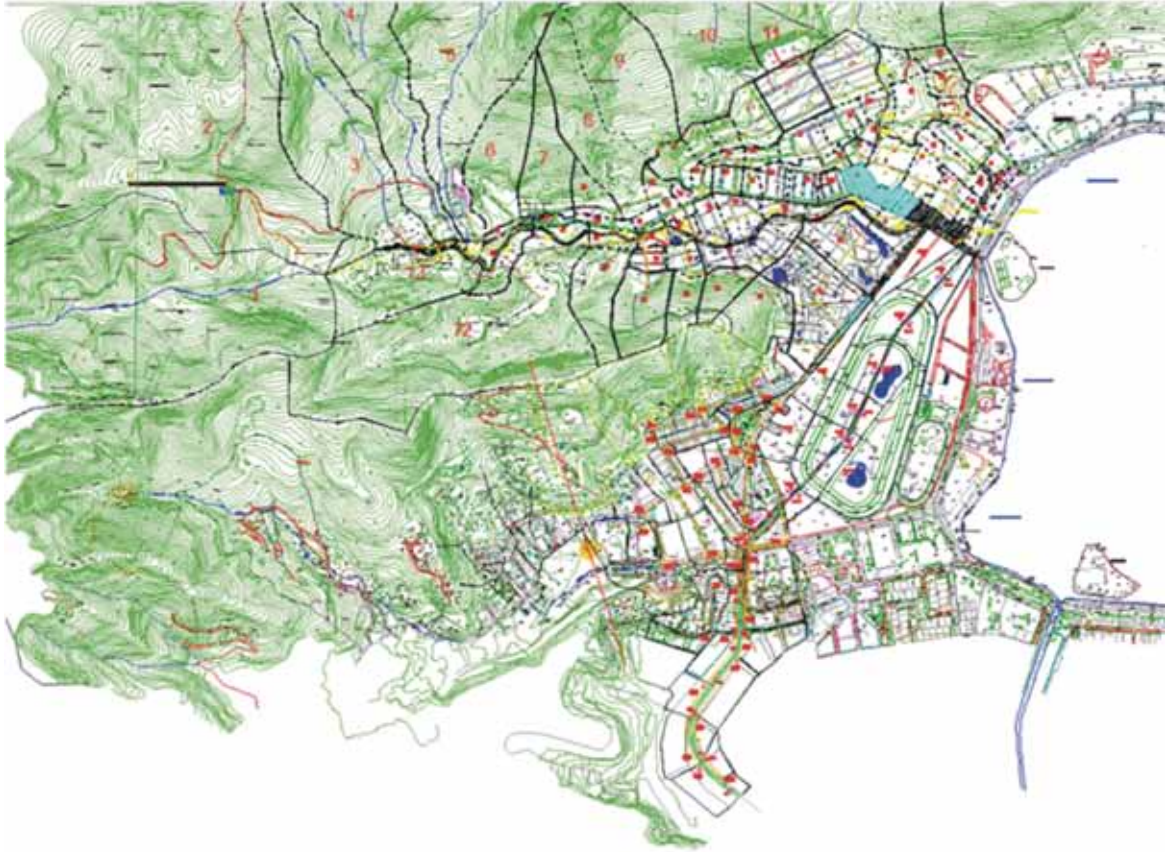


Figura 9. Divisão da bacia do Rio dos Macacos em células – detalhe da área urbana.
Figure 9. Division of Macacos river basin in cells – detail of the urban area.

HIDROLOGIA

As áreas de encosta representam uma grande porção da bacia. Essas áreas, em sua maior parte vegetadas e com grandes declividades, são geradoras de escoamento para as áreas mais baixas, porém não representam uma preocupação sob o ponto de vista de alagamentos. Nesse contexto, a modelagem proposta neste estudo não necessita de um detalhamento destas áreas, mas precisa calcular adequadamente as transformações de chuva em vazão que lá ocorrem, de forma a estimar os hidrogramas resultantes de uma chuva caindo sobre a bacia. Por esse motivo, optou-se pelo uso do Sistema HIDRO-FLU (Magalhães *et al.* 2005) na modelagem das sub-bacias que afluem ao Rio dos Macacos, especialmente nas vertentes de sua margem esquerda para calcular as vazões de projeto com maior acurácia, sem sobrecarregar a necessidade de detalhamento das áreas de encosta em células. Com o HIDRO-FLU, serão elaborados estudos hidrológicos complementares à simulação hidrodinâmica, entre os quais o cálculo do tempo

de concentração da bacia e de seus afluentes, a determinação da chuva de projeto, a determinação dos parâmetros de separação do escoamento superficial, e o cálculo dos hidrogramas de projeto relativos a diversas áreas de contribuição, que serão representados através de condições de contorno na modelagem com o MODCEL.

O tempo de concentração da bacia, ou seja, o tempo necessário para que toda a bacia contribua para seu exutório, foi estimado em cerca de 70 minutos, através da fórmula de George Ribeiro, que é recomendada pela Rio-Águas para estudos e projetos na cidade do Rio de Janeiro. Esse tempo foi utilizado como igual ao da duração da chuva crítica para a bacia. O tempo de recorrência para avaliação do funcionamento da rede de macrodrenagem foi adotado como 20 anos. Os hietogramas para alimentação do modelo foram calculados para 14 intervalos de tempo de 5 minutos. Como foram considerados dois postos na modelagem, dois hietogramas foram gerados, os quais são apresentados na Figura 10.

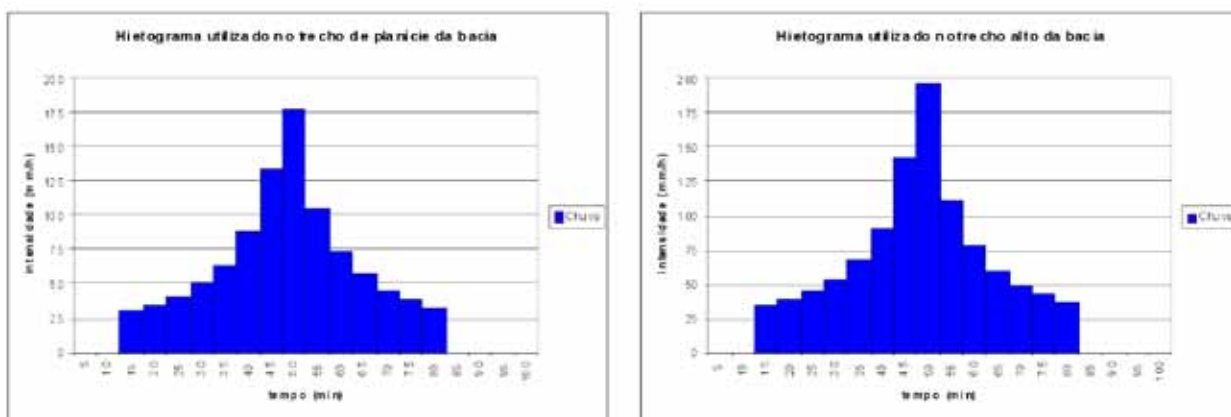


Figura 10. Hietogramas obtido a partir das equações IDF dos postos do Jardim Botânico e da capela Mayrink, respectivamente.
Figure 10. Hyetographs obtained from the IDF equations of the Botanical Garden and the Mayrink Chapel rainfall gauges, respectively.

As vazões máximas dos hidrogramas obtidos para cada bacia de encosta estão apresentadas na Tabela 2 e, a título de ilustração, a forma de um dos hidrogramas, no caso o obtido para a parte alta da própria bacia dos Macacos, é mostrada na Figura 11.

Como forma de quantificação das vazões aportadas à bacia, ainda sem considerar as vazões que são geradas pela transformação da chuva em escoamento superficial nas áreas mais baixas e urbanizadas, a Figura 12 mostra a soma dos hidrogramas resultantes nas encostas.

CALIBRAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

A calibração de um modelo matemático se refere ao processo de ajuste de parâmetros deste modelo para que ele seja capaz de representar a área em estudo de uma forma adequada, coerente com a realidade observada. Nesse processo, em geral, necessita-se dispor de um conjunto de dados medidos, correlacionando eventos de chuvas observadas com alagamentos ocorridos, decorrentes destas chuvas. A partir do ajuste que leva à reprodução de um evento, o modelo passa a ser testado para outros eventos e seu comportamento avaliado de forma a verificar a adequação dos ajustes para situações diversas daquela para os quais os parâmetros foram definidos.

No caso em estudo, porém, não se dispunha de um conjunto de dados capaz de permitir o processo de calibração usual. Não existiam dados fluviométricos nem registros de alagamentos coincidentes com registros de chuva na bacia. Havia, entretanto, a indi-

cação de uma mancha frequente de alagamentos, com uma faixa de alagamentos associados a chuvas intensas (como citado anteriormente, com valores entre 0,80 e 1,00m de lâmina d’água na região baixa da bacia, próxima à foz). A partir do conhecimento destas informações, ou seja, da extensão dos alagamentos e da faixa de níveis de alagamento usuais na Rua Jardim Botânico, associado à ocorrência de chuvas intensas, os parâmetros de modelo foram ajustados para que a própria chuva de projeto (que é uma chuva intensa, com tempo de recorrência de 20 anos) fosse capaz de reproduzir estes alagamentos observados na bacia.

Tabela 2. Vazões máximas das sub-bacias de encosta.
Table 2. Maximum flows of the slope sub-basins.

Célula	Rio	Q _{máxima} (m ³ /s)
1	Alto rio dos Macacos	10,30
2	Rio do Pai Ricardo	14,74
3	Rio Xaxim	3,17
4	Rio Ouriço	5,07
5	Rio Sete Quedas	8,86
6	Bacia Incremental 1	1,94
7	Bacia Incremental 2	1,60
8	Bacia Incremental 3	2,13
9	Bacia Incremental 4	3,24
10	Rio Algodão	8,01
12	Alto Rio Cabeça	22,33
72	Rio do Grotão	5,85

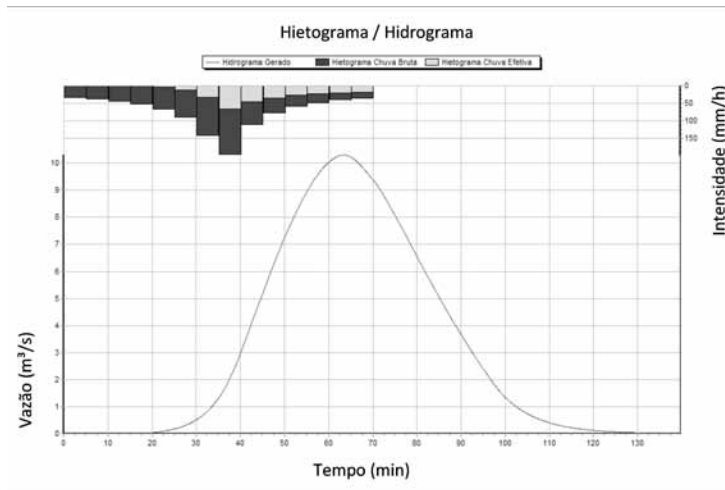


Figura 11. Hidrograma calculado, pelo Sistema HIDRO-FLU, para a parte alta da bacia do Rio dos Macacos.

Figure 11. Hydrograph calculated by HYDRO-FLU system for the upper Macacos River basin.

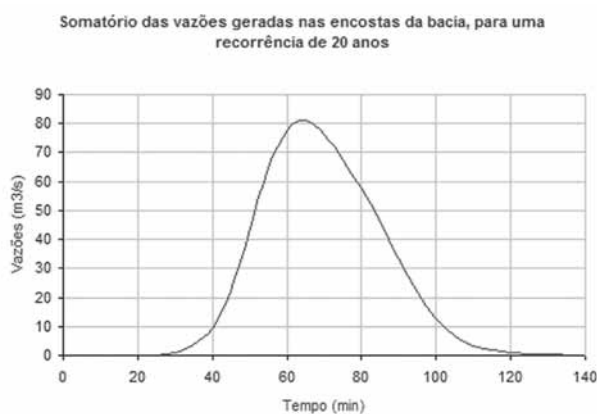


Figura 12. Soma das vazões de projeto, obtidas para as encostas da bacia.

Figure 12. Total design discharges, obtained for the hill slopes of the basin.

CALIBRAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

A calibração de um modelo matemático se refere ao processo de ajuste de parâmetros deste modelo para que ele seja capaz de representar a área em estudo de uma forma adequada, coerente com a realidade observada. Nesse processo, em geral, necessita-se dispor de um conjunto de dados medidos, correlacionando eventos de chuvas observadas com alagamentos ocorridos, decorrentes destas chuvas. A partir do ajuste que leva à reprodução de um evento, o modelo passa a ser testado para outros eventos e seu comportamento avaliado de forma a verificar a adequação dos ajustes para situações diversas daquela para os quais os parâmetros foram definidos.

No caso em estudo, porém, não se dispunha de um conjunto de dados capaz de permitir o processo de ca-

libração usual. Não existiam dados fluviométricos nem registros de alagamentos coincidentes com registros de

Assim, o cotograma obtido para a Rua Jardim Botânico, no cruzamento com a Rua Pacheco Leão, com nível de alagamento máximo de 0,93m, foi considerado como resultado final da calibração. Adicionalmente, deve-se sinalizar que, na obtenção deste resultado, foi garantida que a Lagoa Rodrigo de Freitas também reproduzisse condições próximas daquelas observadas nas condições usuais de funcionamento do Canal do Jardim de Alá, ou seja, com níveis médios elevados e pequena oscilação devido às marés.

ANÁLISE HIDRODINÂMICA E DIAGNÓSTICO DE CHEIAS NA BACIA

Para propor medidas de controle de cheias e manejo do sistema de drenagem de uma bacia, é preciso, antes, entender bem o seu comportamento. Essa compreensão será subsidiada pela análise hidrodinâmica, em modelo matemático, que disponibilizará informações para esta avaliação. Esses resultados deverão, entretanto, ser avaliados de forma conjunta com o conhecimento histórico de alagamentos e com as características de urbanização da bacia.

Na bacia do Rio dos Macacos, a urbanização do seu trecho inferior se destaca. As principais vias de trânsito e áreas de lazer e comércio estão localizadas em áreas com cotas baixas, em uma faixa de urbanização muito estreita entre o principal corpo receptor, que é a Lagoa Rodrigo de Freitas, e as encostas, conforme já mencionado na caracterização anterior da bacia.

Com isso, à exceção do parque do Jardim Botânico, que ainda exerce uma ação de amortecimento, existe pouco espaço para acomodar inundações, sem provocar transtornos e prejuízos para a população. De fato, há prejuízos para a população moradora local, riscos à saúde pública e interrupção do sistema viário na ocorrência de chuvas intensas e cheias.

Ainda neste mesmo trecho, os dois principais rios da bacia, que são o Rio dos Macacos e o Rio Cabeça, tiveram suas seções regularizadas e interligadas através de canais de concreto. Neles, observa-se uma acentuada elevação do nível d'água durante as chuvas mais intensas, chegando ao transbordamento para as ruas. Na foz do Rio dos Macacos, na lagoa, há uma comporta para controle de descarga, que opera apenas nas cheias e mostra sinais de assoreamento significativo a montante.

Já no trecho superior, a alta declividade das encostas e a grande área ocupada por afloramentos rochosos fazem com que a geração de escoamento superficial para o trecho inferior seja significativa, apesar de haver uma grande área de cobertura vegetal que compensa parte dos efeitos.

Com base nesta análise, é possível perceber que as cheias na região são provocadas, principalmente, pela própria topografia local, pela intensidade da urbanização, por deficiências nas galerias de águas pluviais, pelo assoreamento dos canais e pela obstrução parcial do exutório da bacia. A comprovação destas hipóteses pode ser confirmada pelos resultados da modelagem, como apresentados nas Figuras 13, 14 e 15, a seguir.

Na Figura 13 são apresentadas as vazões na região de jusante do Rio dos Macacos. Os valores de vazão nesta região são bastante reduzidos, quando comparados com as vazões que afluem ao modelo pelas encostas de montante. Esta constatação permite concluir que parte significativa dos escoamentos encontra-se retida na bacia, alagando áreas urbanas.

Na Figura 14, é apresentado o alagamento nas ruas baixas, no entorno da região de controle, ou seja, nas proximidades do cruzamento das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão.

Já a Figura 15 apresenta as variações de nível d'água no trecho final do canal da Rua General Garzón, na Lagoa Rodrigo de Freitas e no mar.

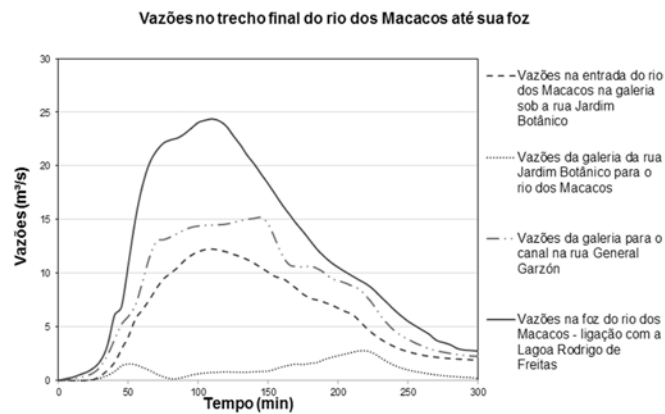


Figura 13. Vazões no exutório da bacia.

Figure 13. Basin outfall discharges.

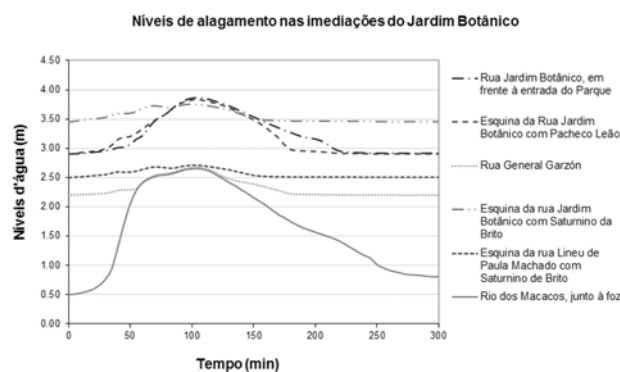


Figura 14. Níveis d'água na região de maior alagamento.

Figure 14. Water levels in the region with higher flooding.

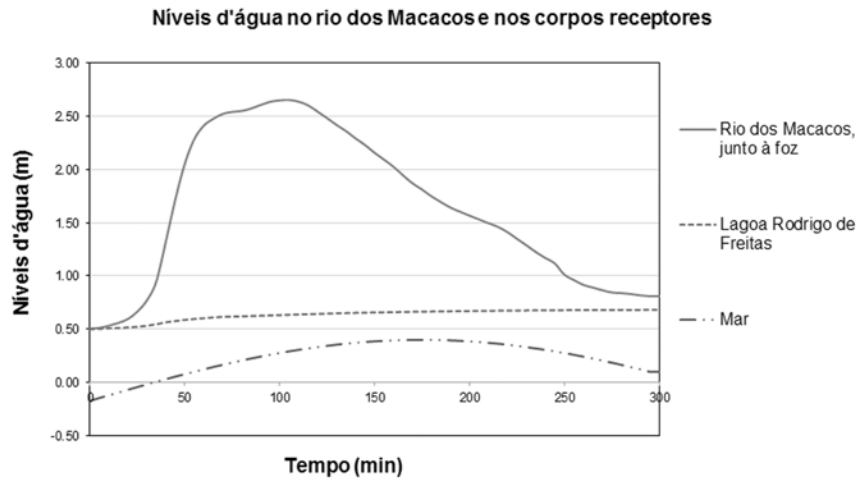


Figura 15. Variações de NA no rio dos Macacos, Lagoa Rodrigo de Freitas e mar.
Figure 15. Variations of water level in Macacos River; Rodrigo de Freitas Lagoon and the sea.

Complementarmente, dado que a inundação é um efeito espacial, avaliou-se também a mancha de alagamentos

resultante da modelagem do cenário equivalente à situação atual, como pode ser visto na Figura 16.



Figura 16. Mancha de inundações máximas observada na simulação da cheia para as condições atuais da bacia.
Figure 16. Flood map observed for the current situation of the basin.

CONSIDERAÇÕES SOBRE O DIAGNÓSTICO DE CHEIAS NA BACIA

A abertura do Rio dos Macacos na sua foz, bem como a redução de níveis d'água na Lagoa Rodrigo de Freitas, através de medidas específicas para este fim, podem ser importantes fatores para iniciar o processo

de controle de cheias na bacia. Pelos resultados obtidos, estas medidas provavelmente liberariam a descarga no canal da Rua General Garzón, permitindo desafogar as restrições de descarga da galeria que passa sob a rua Jardim Botânico, bem como do próprio rio dos Macacos, em seu trecho de canal fechado. Entretanto, dada a criticidade do problema

de enchentes no local, estas não seriam medidas suficientes, embora sejam medidas necessárias e estruturantes, ou seja, que preparam a bacia para ações posteriores para a solução de seus problemas de alagamento, permitindo um deságue mais eficaz para a mesma.

A correção de pontos obstrutivos da própria rede de drenagem e, se possível, a combinação destas medidas, objetivando aumentar a condutância das seções, com medidas de amortecimento em reservatórios, provavelmente gerariam maiores reduções dos níveis de alagamento. Medidas de amortecimento combinadas com medidas de canalização tendem a dar soluções de cunho mais sustentável ao longo do tempo, ao tratarem o problema de geração descontrolada de escoamento e não apenas a necessidade de conduzir tais escoamentos. É importante, ao tratar o problema de cheias de uma região, saber re-equacionar a distribuição dos escoamentos gerados no tempo e no espaço. Estas atuações configurariam complementos adequados para as ações de desobstrução da foz.

DISCUSSÃO E PROPOSIÇÃO DE MEDIDAS DE CONTROLE DE CHEIAS E MANEJO DO SISTEMA DE DRENAGEM NO CONTEXTO DA RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DA LAGOA RODRIGO DE FREITAS.

O projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas previu, como proposta básica de intervenção, a melhoria das condições de renovação das águas da lagoa, fixando e aumentando a capacidade hidráulica da sua comunicação com o mar. Assim, foram previstas basicamente três ações. A primeira delas e, talvez, a mais fundamental sob a perspectiva de circulação da lagoa, refere-se à implantação de um sifão no Canal do Jardim de Alá, permitindo a comunicação com o mar de forma contínua, independentemente da manutenção do canal ou da operação de sua comporta. Na adoção desta medida, está sendo previsto o fechamento do canal após a estrutura da comporta hoje existente, permitindo a continuidade da linha de costa e, portanto, da praia. O sifão, com 18m² de área de seção transversal de escoamento, seria responsável pela ligação da Lagoa Rodrigo de Freitas com o mar. Além disso, duas intervenções complementares com caráter combinado também foram previstas: uma delas prevê

o fechamento da saída do Canal do Jóquei para o Rio dos Macacos, impedindo que uma possível contribuição de carga poluente chegue à lagoa a partir do próprio Jóquei Clube ou advinda de uma transposição de vazões do Rio Rainha; e outra intervenção prevê a abertura da comporta da Rua General Garzón com o desassoreamento de seu canal, considerando medidas de saneamento do Rio dos Macacos, que passaria a contribuir diretamente para a lagoa, com águas mais limpas. Estas medidas estão esquematicamente mostradas na Figura 17.

Considerando as obras de recuperação ambiental implantadas e um evento de cheia de projeto de 20 anos de recorrência na bacia contribuinte à Lagoa, a melhora na capacidade de troca de águas pelo sistema Lagoa-Mar modifica o comportamento dos níveis d'água na Lagoa Rodrigo de Freitas, que se reduzem e ganham maior oscilação.

Considerando as obras de recuperação ambiental implantadas e um evento de cheia de projeto de 20 anos de recorrência na bacia contribuinte à Lagoa, a melhora na capacidade de troca de águas pelo sistema Lagoa-Mar modifica o comportamento dos níveis d'água na Lagoa Rodrigo de Freitas, que se reduzem e ganham maior oscilação.

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO PROJETO DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DA LAGOA SOBRE AS CHEIAS NA BACIA DO RIO DOS MACACOS

As intervenções propostas no projeto de recuperação ambiental foram avaliadas individualmente, para possibilitar a visualização dos efeitos e a eficiência de cada ação prevista. Para isso, foram simulados diversos cenários, passo a passo, introduzindo as ações progressivamente. A Tabela 3 indica cada um dos passos para chegar à solução final proposta, com as vazões máximas de deságue do sistema, bem como a cota de nível d'água no trecho final do canal do Rio dos Macacos. Destaca-se que o nível d'água no Rio dos Macacos, próximo a sua foz, é um dos principais indicadores do resultado positivo das obras propostas, uma vez que minimiza a possibilidade de extravasamento e possibilita abrir espaço para o recebimento (e amortecimento) da cheia. A Figura 18 mostra os hidrogramas e cotogramas junto à foz, para cada passo simulado.



Figura 17. Localização esquemática das três principais intervenções propostas para recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas – sifão no Jardim de Alá, implantação de comporta no Canal do Jôquei e abertura da comporta do Rio dos Macacos na Rua General Garzón.

Figure 17. Schematic location of the three main interventions proposed for the environmental recovery of Rodrigo de Freitas Lagoon – a siphon in Jardim de Alá Channel, implementation of a gate in the Jockey Channel and opening of the gate on Macacos River, in General Garzón Street.

Tabela 3. Intervenções do projeto de recuperação ambiental, tomadas passo a passo
Table 3. Project interventions, considered step-by-step.

Cenários passo a passo	Descrição	Vazão máxima – foz do rio dos Macacos (m ³ /s)	NA máx – canal da R. General Garzón, antes da foz do Rio dos Macacos (m)
Passo 1	Situação Atual – cenário base de referência para a modelagem. ¹	24,4	2,65
Passo 2	Passo 1, considerando dragagem no canal da Rua General Garzón, ou seja, sem assoreamento na foz do Rio dos Macacos.	40,5	1,43
Passo 3	Passo 1 + Sifão na lagoa.	38,1	1,87
Passo 4	Passo 2 + Passo 3, ou seja, combinação de dragagem na foz, com sifão na Lagoa.	41,2	1,16
Passo 5	Passo 4 + fechamento comporta do Jôquei.	27,2	0,84
Passo 6	Passo 5 sem comporta na Rua General Garzón.	29,4	0,37

¹ Considera-se a Lagoa operando com restrições em sua foz, com nível d'água na casa de 0,5m, Canal do Jôquei aberto e canal da Rua General Garzón assoreado, com comporta funcional.

Após a análise passo a passo das intervenções, foi realizada uma avaliação comparativa entre a situação atual de alagamentos na bacia e o novo cenário, considerando todas as ações implantadas. De uma forma geral, foi verificado que as propostas atenuam bastante os níveis d'água no canal da Rua General Garzón, reduzindo os alagamentos nas áreas mais críticas, ou seja, ao longo da Rua Jardim Botânico e no cruzamento desta com a Rua Pacheco Leão. Esta redução, em

termos de profundidade máxima de alagamento, chega a valores de aproximadamente 38%, reduzindo também o tempo de permanência dos alagamentos em cerca de 40 minutos. Mais especificamente, as lâminas d'água se reduzem, na esquina da Rua Jardim Botânico com a Pacheco Leão, de 93cm para 58cm, e o tempo em que a rua fica alagada com mais de 15cm de lâmina d'água reduz-se de 140 minutos para 100 minutos. A Figura 19 ilustra esta comparação.

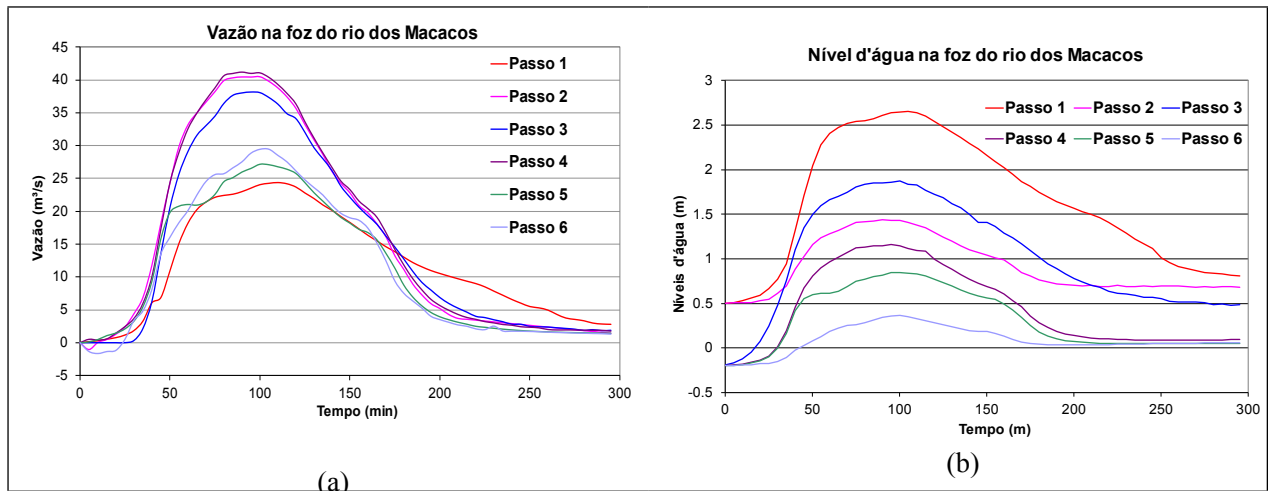


Figura 18. (a) Vazões na foz do Rio dos Macacos para a lagoa e (b) variações de níveis d'água próximos à foz do Rio dos Macacos na Lagoa, onde pode ser observado, de forma mais efetiva, o efeito das obras propostas sobre o sistema de drenagem.

Figure 18. (a) Outfall discharges of Macacos River, reaching the Lagoon and (b) variations in the water levels near Macacos River outfall, in the Lagoon, where it is possible to notice, more clearly, the effect of the proposed works on the drainage system.



Figura 19. Comparação de alagamentos na esquina das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão, tomada como ponto de controle para comparação de resultados.

Figure 19. Comparison between the flooding at the crossing of Jardim Botânico Street and Pacheco Leão Street, taken as a control point, for comparing results purposes.

A Figura 20 mostra o efeito das obras propostas sobre as vazões junto ao exutório do Rio dos Macacos. O resultado é um aumento destas vazões, exatamente como consequência da diminuição dos níveis d'água na lagoa e da abertura da comporta. Destaca-se que as vazões crescem, mesmo sem a contribuição do Canal do Jôquei, que neste cenário estaria fechado.

A observação da envoltória máxima de níveis d'água, apresentada na Figura 21, mostrou uma redução acentuada de profundidades no canal da Rua General Garzón. Entretanto, dadas as restrições encontradas na rede de macrodrenagem da região, o benefício desta redução, que desobstrui a foz, acaba não se propagando muito para montante. As obras propostas para recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas, tomadas de modo isolado, são capazes de diminuir os alagamentos a jusante, mas ainda não são suficientes para controlá-los de forma geral e efetiva, ou seja, as obras propostas são positivas, mas para que os problemas específicos de drenagem sejam ade-

quadamente tratados, de maneira sistêmica em toda a bacia, são necessárias ações complementares.

A Figura 22 apresenta o mapa de alagamentos para a situação modificada pelas obras de recuperação da

Lagoa Rodrigo de Freitas, permitindo a visualização da eficiência das obras propostas para a diminuição dos problemas de inundações existentes no bairro Jardim Botânico.

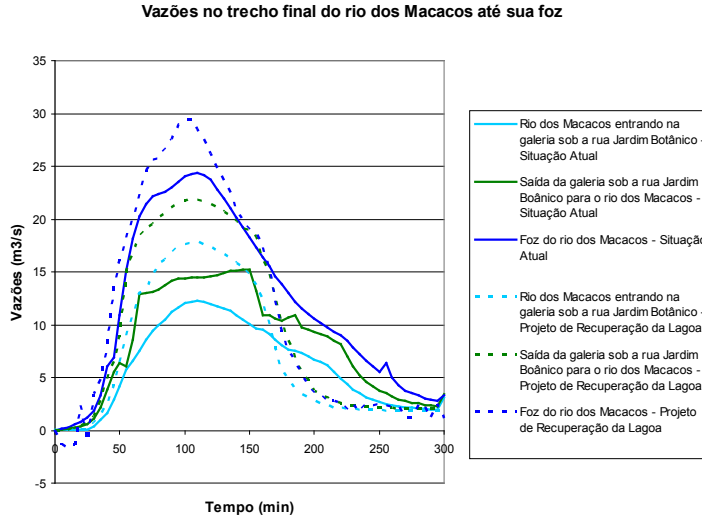


Figura 20. Comparação de vazões no trecho final do Rio dos Macacos, considerando a situação atual e a situação modificada pelas obras propostas de recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas.

Figure 20. Discharges comparison at the final reach of Macacos River, considering the current situation and the one modified by the proposed works for Rodrigo de Freitas Lagoon environmental recovery.

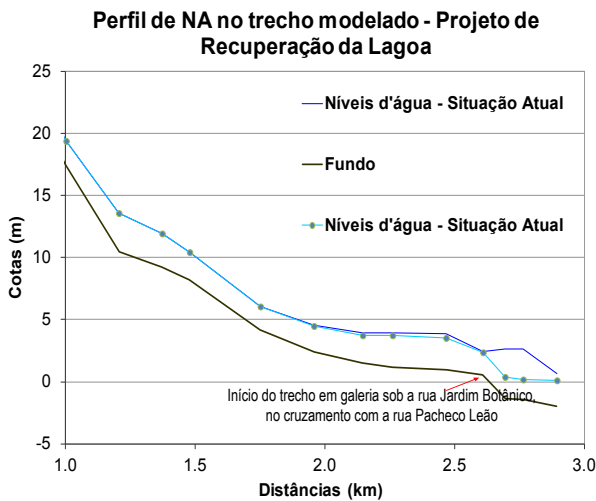


Figura 21. Envoltória máxima do perfil de linha d'água no trecho médio-baixo do Rio dos Macacos.

Figure 21. Maximum envelope of the water level profile in the medium-low stream reach of Macacos River.

De uma forma geral, percebe-se o seguinte:

- a dragagem e desassoreamento do canal da Rua General Garzón são fundamentais para o funcionamento da rede e já resultam em um bom aumento da capacidade de descarga da foz, embora os níveis d'água no canal ainda permaneçam

relativamente altos, para compensar a restrição imposta pela Lagoa Rodrigo de Freitas;

- a introdução do sifão na lagoa, por si só, permite o aumento das descargas na foz do Rio dos Macacos, mas em menor proporção que a dragagem;
- sob o ponto de vista de redução de níveis d'água nos trechos de jusante do sistema de drenagem, a combinação da dragagem na foz e a introdução do sifão se potencializam, pois permitem o aumento da condutância e a redução do nível de controle do exutório do sistema de drenagem;
- o fechamento do Canal do Jóquei diminui a descarga na foz, pois impede a transposição das vazões do Rio Rainha para o Rio dos Macacos, o que também ajuda a diminuir os níveis d'água observados no canal junto à foz;

- a remoção da comporta do canal da Rua General Garzón, na foz do Rio dos Macacos, permite um pequeno aumento na seção hidráulica, bem como uma redução do coeficiente de rugosidade neste trecho, resultando em um pequeno incremento na vazão e redução adicional de níveis no canal.

Assim, considerando os resultados obtidos, o conjunto de obras referente ao cenário proposto no passo

5 de desenvolvimento da solução parece ser o mais indicado, sendo satisfatório sob o ponto de vista de vazões e níveis d'água, e mantendo a possibilidade de controle na foz do Rio dos Macacos e manobra de vazões, o que pode ser estratégico para a manutenção do sistema.

Com a situação simulada no cenário que considera as obras de recuperação da lagoa implantadas, tomada como ponto de partida, foi discutida a possibilidade de complementação destas ações, sob o ponto de vista de minimização de inundações e adequação do sistema de drenagem do Rio dos Macacos, extrapolando a proposta original de recuperação da Lagoa Rodrigo de Freitas. Essas ações complementares partem do princípio de que o projeto de recuperação da lagoa

pode contribuir eficazmente para o controle de inundações e fazer parte da solução do problema de alagamentos na região do Jardim Botânico.

São consideradas, inicialmente, duas obras complementares para auxiliar no controle de inundações. Uma delas prevê a ampliação da galeria do Rio dos Macacos, que atravessa o cruzamento das ruas Jardim Botânico e General Garzón, visando um aumento na capacidade hidráulica deste trecho e, assim, desafogando o rio para montante. Essa é uma intervenção tradicional, que, porém, se mostra propícia, tanto pela proximidade com a foz, como pela singularidade local, que indica uma contração importante na calha do rio. Outra intervenção prevê a implantação de um reservatório de detenção no

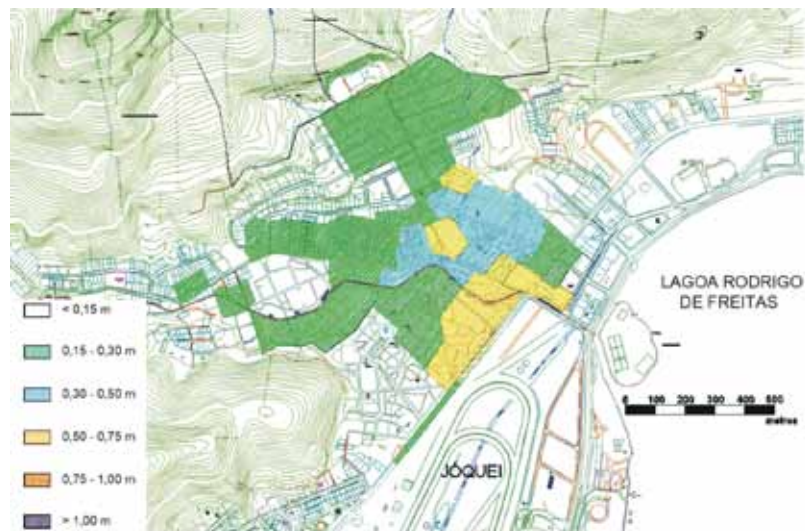


Figura 22. Mancha de alagamentos para a situação de implantação do projeto de recuperação da Lagoa Rodrigo de Freitas.
Figure 22. Flood map considering the implementation of Rodrigo de Freitas Lagoon environmental recovery project.

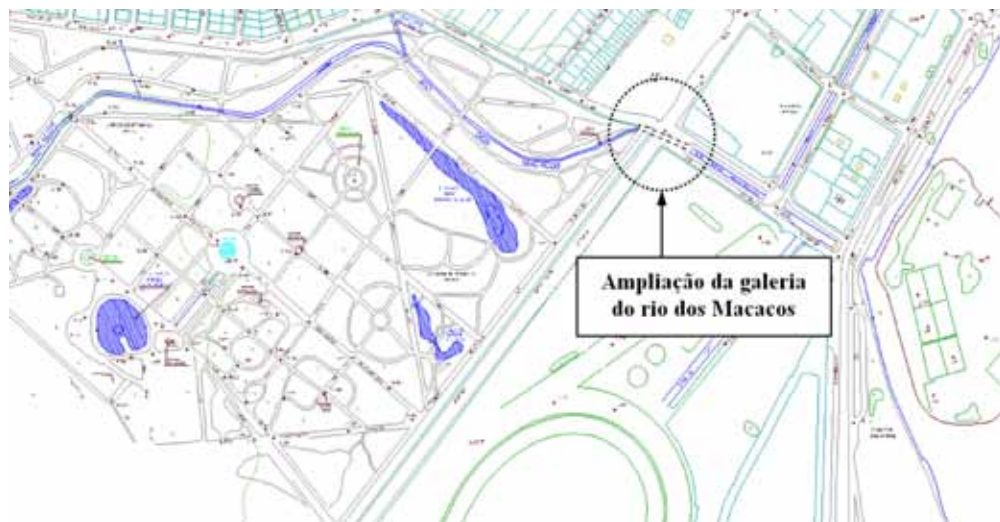


Figura 23. Indicação do trecho crítico da galeria do Rio dos Macacos.
Figure 23. Indication of the critical stream of Macacos River gallery.

interior do Jardim Botânico, visando a realocação das águas que extravasariam da calha do rio para as ruas. Essa segunda proposição visa ilustrar o conceito da solução por amortecimento, podendo ser explorada com reservatórios distribuídos, inclusive nas áreas de encosta. Assim a utilização do Jardim Botânico, em princípio, é apenas ilustrativa do conceito. A seguir, nos próximos itens, essas propostas são apresentadas e discutidas.

COMPLEMENTAÇÃO DAS OBRAS PROPOSTAS COM A CORREÇÃO DA GALERIA DO RIO DOS MACACOS A MONTANTE DO CANAL DA RUA GENERAL GARZÓN

Como primeira abordagem, tendo em vista a notória insuficiência da rede no seu trecho final, foi proposta a ampliação da galeria do Rio dos Macacos, sob o cruzamento das ruas Jardim Botânico e Pacheco

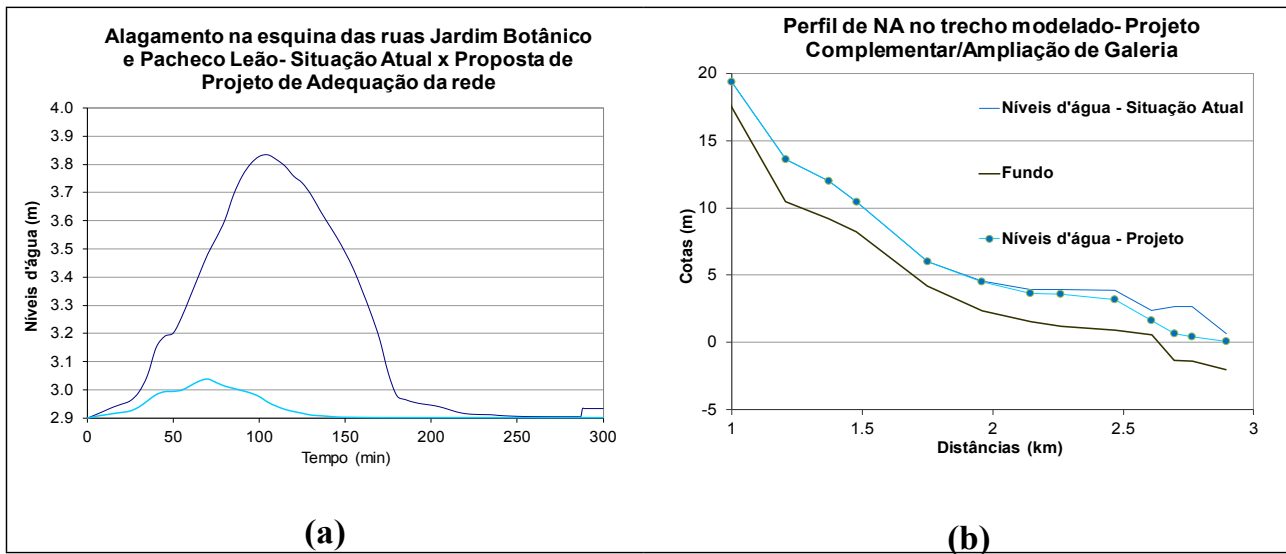


Figura 24. (a) Comparação de alagamentos na esquina das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão, considerando o projeto de recuperação da lagoa, complementado por uma ampliação da rede em seu trecho final, em relação à situação atual e (b) envoltória máxima do perfil de linha d'água no trecho médio-baixo do Rio dos Macacos – cenário complementar com ampliação de galeria.

Figure 24. (a) Comparison between the flooding on the corners of Jardim Botânico Street and Pacheco Leão Street, considering the Lagoon environmental recovery project, complemented by an expansion of the network on its final stream, compared to the current situation and (b) maximum envelope of the water level profile in the medium-low stream of Macacos River – additional scenario with expansion of the gallery.



Figura 25. Mancha de alagamentos para a situação de implantação do projeto de recuperação da Lagoa Rodrigo de Freitas, com ampliação da galeria do Rio dos Macacos sob a Rua Jardim Botânico, esquina com Rua Pacheco Leão.

Figure 25. Flood map considering the implementation of Rodrigo de Freitas Lagoon environmental recovery project, with the enlargement of Macacos River gallery, under Jardim Botânico Street, at the crossing with Pacheco Leão Street.

Leão, como obra complementar. Esta ampliação almejou compatibilizar as dimensões da galeria local com as do canal na Rua General Garzón, que possui largura de 6,5m e altura de 2,4m. A Figura 23 indica o local da galeria a ser ampliada. Destaca-se que obras de canalização e/ou ampliação de galerias são medidas que tendem a transferir problemas de cheias para jusante. Entretanto, nesta situação, a conjugação de medidas tradicionais de canalização com as medidas de recuperação da lagoa, que tendem a rebaixar os níveis d'água desta, permite evitar este tipo de problema.

Esta configuração de projeto, complementando as obras de recuperação da lagoa, reduz em 85% os alagamentos na Rua Jardim Botânico, na esquina com a Pacheco Leão, deixando apenas alagamentos residuais, para todos os fins práticos. Este cenário foi simulado considerando também uma triplicação do número de bocas de lobo na região próxima da ampliação, de modo a potencializar a captação superficial pela microdrenagem local. O gráfico que mostra esta redução aparece na Figura 24, assim como o efeito desta obra sobre o perfil de níveis d'água do rio. Agora, nesta nova configuração, percebe-se o efeito da redução de níveis se propagando para montante da galeria. O efeito sobre as vazões do Rio dos Macacos, na região de sua foz, é um aumento nos picos de vazão, ao longo do rio, ocasionado pela eliminação do estrangulamento que afogava o rio. Os valores de pico de cheia podem ser vistos na Tabela 4, que apresenta todos os resultados a fim de comparação. Por fim, para completar a observação dos resultados obtidos com a ampliação das dimensões da galeria no trecho final do Rio dos Macacos, a Figura 25 mostra o mapa de alagamentos para este cenário complementar, evidenciando a eficiência desta medida.

COMPLEMENTAÇÃO DAS OBRAS PROPOSTAS COM A IMPLANTAÇÃO DE UM RESERVATÓRIO DE DETENÇÃO NO JARDIM BOTÂNICO

Alternativamente, mas também de forma complementar ao projeto de recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas e atendendo a conceitos mais modernos de drenagem sustentável, propõe-se considerar a implantação de um reservatório de detenção no Jardim Botânico, junto à margem

esquerda do Rio dos Macacos e ao passeio que corre ao longo da entrada do parque, totalizando uma área de cerca de 20.000m² e um volume de cerca de 30.000m³. A Figura 26 mostra, esquematicamente, a área para implantação do reservatório. A proposição deste reservatório, em princípio, é ponto de partida para uma discussão acerca do conceito e não necessariamente refere-se a uma configuração a ser adotada. De fato, seria recomendável a procura por locais de armazenagem distribuídos na bacia, com as menores interferências possíveis.

A adoção desta medida complementar, somando-se às obras de recuperação da lagoa (sem a correção da galeria, mostrada no cenário anterior), reduz em 66% os alagamentos na Rua Jardim Botânico, na esquina com a Rua Pacheco Leão, deixando alagamentos de menor porte, mas em uma situação que pode ser considerada aceitável, por não invadir residências, embora no limite e gerando, ainda, alguma interferência sobre o tráfego na região. O gráfico que mostra esta redução aparece na Figura 27, assim como o efeito desta obra sobre o perfil de níveis d'água do rio, que permite observar o efeito da redução de níveis se propagando para montante da região crítica. Diferente do projeto de ampliação da galeria, a implantação do reservatório não aumenta as vazões na foz do rio, mantendo o pico de cheia bem próximo à situação encontrada hoje, como pode ser visto na Tabela 4. Por fim, a figura 28 mostra o mapa de alagamentos resultante deste cenário complementar.

Uma importante observação acerca das obras propostas diz respeito ao fechamento da ligação do Canal do Jóquei com o Rio dos Macacos, através de uma comporta. Essa conformação permite que o Rio dos Macacos deságue livremente na Lagoa Rodrigo de Freitas, sem receber águas potencialmente poluídas do Rio Rainha. Porém, não evita que o Jóquei receba essas águas de qualidade não controlada, pela ligação do Canal do Jóquei com o canal da Avenida Visconde de Albuquerque.

Assim, foi proposta a instalação de uma estrutura de soleira no fundo do Canal do Jóquei, junto da sua interseção com o canal da Avenida Visconde de Albuquerque, evitando que as águas de tempo seco da bacia do Rio Rainha afluam para o interior do Jóquei. Esta nova configuração do Canal do Jóquei pode ser

vista na Figura 29(a), em planta e perfil. Um desenho esquemático desta proposta pode ser visto em perfil, na Figura 29(b).

Para avaliar os efeitos dessa intervenção nas condições de drenagem do Canal do Jóquei, foi elaborado um novo modelo matemático, considerando a base antiga com a alteração das células correspondentes ao terreno do Jóquei e da

parte baixa da bacia do Rio Rainha, desde a saída do Túnel Acústico até sua foz na praia do Leblon. Essa alteração buscou um maior detalhamento desta área, a fim de proporcionar melhores resultados dos níveis d'água no Canal do Jóquei. Assim, o sistema modelado neste novo estudo compreendeu a bacia do Rio Rainha e do Rio dos Macacos, como pode ser observado na Figura 30.



Figura 26. Indicação das áreas de armazenagem temporárias no Jardim Botânico, como proposta complementar ao projeto de recuperação ambiental da Lagoa.

Figure 26. Indication of temporary storage areas at the Botanical Garden, as a complementary proposal for the Lagoon environmental recovery project.

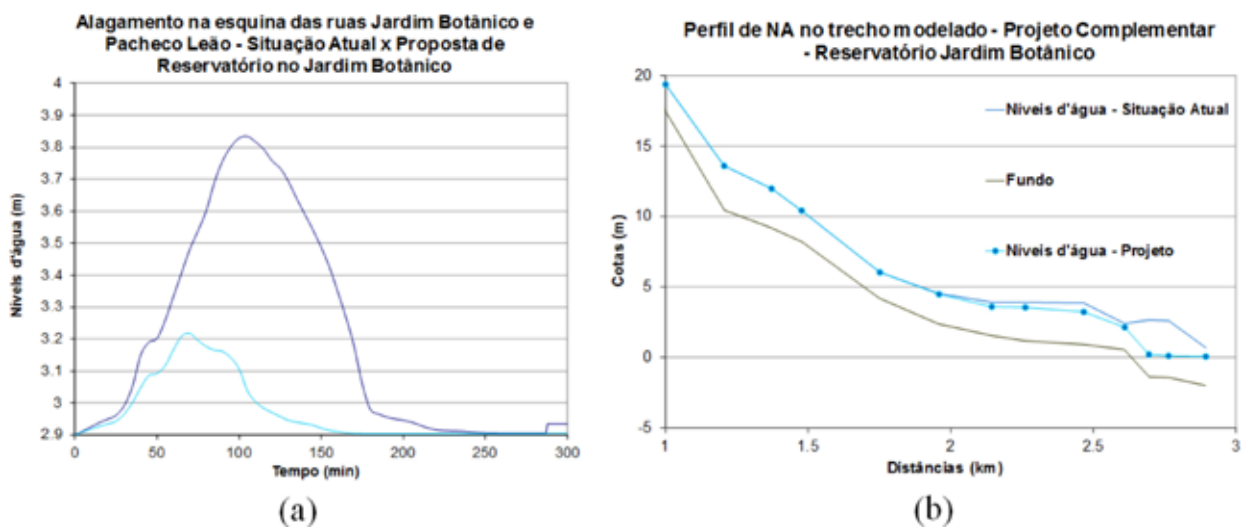


Figura 27. (a) Comparação de alagamentos na esquina das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão, considerando o projeto de recuperação da lagoa, complementado por um reservatório no Jardim Botânico, em relação à situação atual e (b) envoltória máxima do perfil de linha d'água no trecho médio-baixo do Rio dos Macacos – cenário complementar com reservatório no Jardim Botânico.

Figure 27. (a) Comparison between the flooding at the crossing of Jardim Botânico Street and Pacheco Leão Street, considering the Lagoon environmental recovery project, complemented by a reservoir in the Botanical Garden, compared to the current situation and (b) maximum envelope of the water level profile in the medium-low stream reach of Macacos River – additional scenario with a reservoir in the Botanical Garden.

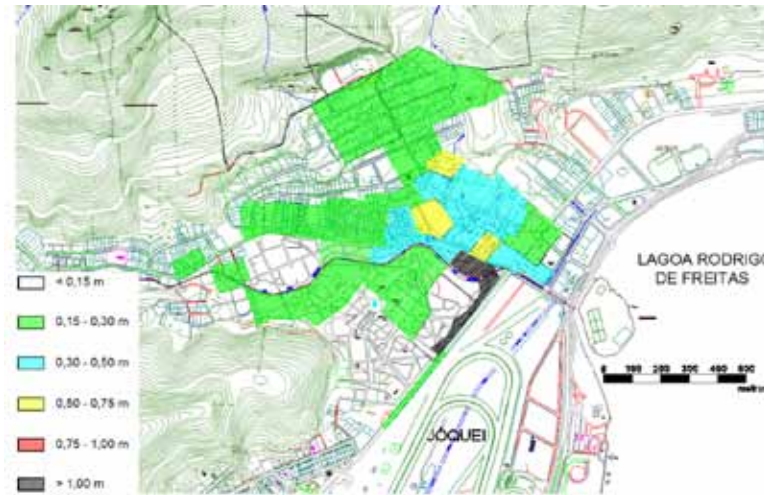


Figura 28. Mancha de alagamentos para a situação de implantação do projeto de recuperação da Lagoa Rodrigo de Freitas, com implantação de reservatório de detenção no Jardim Botânico.

Figure 28. Flood map considering the implementation of Rodrigo de Freitas Lagoon environmental recovery project, with the implementation of a detention reservoir in the Botanical Garden.

Tabela 4. Vazões máximas para cada cenário de simulação em diferentes seções do Rio dos Macacos.
Table 4. Maximum flows for each simulated scenario in different sections of Macacos River.

SEÇÃO	SITUAÇÃO			
	Atual	Projeto de Recuperação da Lagoa	Com ampliação da rede de drenagem	Com reservatório de detenção
Rio dos Macacos entrando na galeria sob a Rua Jardim Botânico	12,2m ³ /s	17,8m ³ /s	23,3m ³ /s	19,2m ³ /s
Saída da galeria sob a Rua Jardim Botânico para o Rio dos Macacos	15,2m ³ /s	21,9m ³ /s	38,3m ³ /s	23,8m ³ /s
Foz do Rio dos Macacos	24,2m ³ /s	29,4m ³ /s	41,0m ³ /s	25,9m ³ /s



Figura 29. (a) Desenho esquemático das obras propostas para o Canal do Jockey e (b) perfil esquemático da soleira de fundo.

Figure 29. (a) Schematic figure of the proposed works for the Jockey channel and (b) schematic profile of the drowned weir.

Inicialmente, o primeiro cenário simulado, considerado como **Cenário 1**, admitiu as mesmas condições de projeto propostas no âmbito do “Projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas”, já simuladas anteriormente, no intuito de possibilitar a calibração do novo modelo a partir destes resultados. Esse procedimento é necessário para garantir que a continuidade dos estudos, com as novas células modeladas para o detalhamento da bacia do Rio Rainha, continue sendo equivalente ao estudo anterior, que tinha essa região representada de forma simplificada.

Com o modelo calibrado, foi realizada uma série de simulações, variando a cota da crista da soleira a ser implantada entre o Canal do Jockey e o canal da Avenida Visconde de Albuquerque, a montante da Avenida Bartolomeu Mitre, no intuito de se otimizar essa estrutura e avaliar seus resultados. Com os resultados desses testes, foi estabelecida como cota

de crista para a estrutura de soleira a cota 0,80m, sendo apresentado aqui como **Cenário 2**. Nessa cota, o Canal do Jóquei estaria protegido contra escoamentos do Rio Rainha em águas baixas, mesmo em condições de maré alta.

Após a análise dos efeitos da instalação da soleira no Canal do Jóquei, foram concebidos cenários alternativos para simular condições adversas que poderiam minimizar a eficiência do funcionamento do sistema de macrodrenagem local. Primeiramente,



Figura 30. Identificação dos cursos d'água a serem modelados e seus pontos de comunicação (imagem gerada com o programa Google Earth).
Figure 30. Identification of the modelling water courses and its connecting points (adapted image – from Google Earth).



Figura 31. Posição alternativa para a comporta que separa as bacias do Rio Rainha e do Rio dos Macacos.
Figure 31. Alternative location for the gate that separates the basins of Rainha River and Macacos River.

como **Cenário 3**, foi assumido que, na ocorrência de uma chuva intensa, a comporta entre o Canal do Jóquei e o Rio dos Macacos não tivesse sido aberta, impedindo a transposição das águas entre as bacias dos rios Rainha e dos Macacos.

Em uma segunda consideração, foi modelada uma situação em que não houvesse a implementação completa do “Projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas”, ou seja, não foram consideradas as obras de melhoria na foz do Rio dos Macacos (basicamente com sua dragagem, onde hoje se tem um grande assoreamento) e a implementação do sifão de ligação da Lagoa Rodrigo de Freitas com o mar, definindo assim, o

Cenário 4

Também foi estudada uma opção para permitir que o Canal do Jóquei drene suas águas para o Rio Rainha em tempo seco, sem que seja necessário um nível d’água no interior do canal superior a cota da crista da soleira (0,80m). Para isso, foi prevista a instalação de uma comporta de sentido único na estrutura de soleira, com diâmetro de 1,0m, no fundo do Canal do Jóquei, que só permitirá o fluxo de água no sentido *Canal do Jóquei à Rio Rainha*. Essa simulação, que permite que o canal do Jóquei funcione de forma similar ao comportamento atual, define o **Cenário 5** e o **Cenário 6**.

O **Cenário 7** considera uma soleira alta, sem permitir o vertimento do Rio Rainha para o Jóquei, mesmo na cheia, e um conjunto de 4 comportas *flap* entre o Canal do Jóquei e o canal da Visconde de Albuquerque. Essa configuração visa tentar evitar o extravasamento do Canal do Jóquei, mas permitindo que suas águas tenham saída, aumentando a capacidade das comportas de fundo.

O **Cenário 8**, por sua vez, mostra uma opção de fechamento do Canal do Jóquei, recebendo apenas águas da derivação do Rio dos Macacos, no Jardim Botânico, com comportas *flap* restringindo a entrada tanto pelo Rio Rainha, como pelo Rio dos Macacos, na comunicação com a Rua General Garzón. Esse cenário serve de referência, como situação extrema. O número de comportas *flap* foi definido em simulações tentativas sucessivas.

Já os **Cenários 9 e 10** modificam a concepção inicial do projeto, deslocando a comporta que isola os rios Rainha e Macacos da posição originalmente

prevista, próxima da Rua General Garzón, para o outro lado do Canal do Jóquei, na Avenida Bartolomeu Mitre, conforme mostra a Figura 31. Essa nova concepção incorpora a contribuição do Jóquei à bacia do Rio dos Macacos e separa as bacias dos rios Rainha e Macacos, permitindo a manobra de vazões de um para outro, apenas quando desejado, ou necessário.

No **Cenário 9**, considera-se a implantação de todas as obras do projeto de recuperação ambiental da Lagoa, incluindo a dragagem na foz do Rio dos Macacos, desde a Rua General Garzón até a entrada do rio na Lagoa Rodrigo de Freitas.

O **Cenário 10**, por sua vez, simula a mesma solução dada para a comporta no Cenário 9, mas sem considerar as dragagens requeridas na foz do Rio dos Macacos. Ou seja, este cenário reproduz as condições encontradas ainda hoje na foz do rio (ou, mais precisamente, a situação encontrada antes das primeiras intervenções do Projeto de Recuperação da Lagoa), ou podem representar uma situação futura, em que as intervenções a serem implantadas no Projeto de Recuperação da Lagoa não recebam manutenção adequada. Na Tabela 5 é apresentado um resumo dos cenários apresentados .

Observando os resultados dos cenários simulados, uma série de conclusões pode ser tirada, dentre as quais são listadas:

- O **Cenário 1** mostra que, com as obras de recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas, a redução dos níveis d’água médios da lagoa, combinada com a dragagem da foz do Rio dos Macacos, faz com que haja a tendência das águas do Rio Rainha escoarem para o Rio dos Macacos e, na sequência, para a própria lagoa. Essa situação, diferentemente da situação observada nas condições atuais, em que o Rio dos Macacos acaba, em parte, drenando através do Canal do Jóquei, decorre em função do rebaixo dos níveis d’água no canal da Rua General Garzón, que cria condições propícias para a inversão da declividade de linha d’água. Essa simulação traz uma importante informação para o projeto: em caso de cheia, com a foz do Rio dos Macacos dragada e ligando diretamente para a Lagoa Rodrigo de Freitas, num cenário em que esta tem seus níveis médios mais baixos, a operação da comporta deveria prever

que ela se mantivesse fechada, para evitar que a Lagoa recebesse uma carga poluidora maior. Essas características foram observadas tanto na simulação da Situação de Projeto quanto na Situação Atual.

- No **Cenário 2**, a introdução da soleira no Canal do Jóquei, próximo à sua saída para a Rua Visconde de Albuquerque faz diminuir o fluxo do Rio Rainha para o Canal do Jóquei na cheia e impede seu acesso na estiagem. Entretanto, ainda permanece a tendência do escoamento seguir do Rio Rainha para o Rio dos Macacos. Os níveis d'água máximos no Canal do Jóquei se reduzem de um patamar de cerca de 1,1m de cota, para algo em torno de 1,0m, quando considerada a Situação de Projeto. Para a Situação Atual, não foram observados efeitos significativos nos níveis d'água máximos após a implantação da soleira.

- O **Cenário 3** simula a cheia que atinge o Canal do Jóquei por contribuição, principalmente, do Rio

Rainha, uma vez que a comporta do Rio dos Macacos permanece fechada (há ainda a contribuição da derivação do Rio dos Macacos que vem de dentro do Jardim Botânico, mas esta é uma contribuição em menor escala, chegando lateralmente no trecho inicial do Canal do Jóquei). Destaca-se que esta proposição de operação resulta da observação feita no Cenário 1. Para a Situação de Projeto, com a crista da soleira em 0,8m, o Canal do Jóquei quase atinge o limite superior de suas margens mais baixas, mas permanece ainda com escoamentos dentro do canal. As cotas de nível d'água ficam um pouco menores que 1,7m. Neste cenário, não há acesso do Rio Rainha para a Lagoa Rodrigo de Freitas e o Canal do Jóquei permanece sem extravasamento, na plenitude de seu uso. Porém, quando considerada a Situação Atual, a cota de nível d'água dentro do canal atinge 1,9m, ocasionando um pequeno extravasamento do canal.

Tabela 5. Cenários de simulação considerados no processo de modelagem do sistema.

Table 5. Simulation scenarios considered in the system modelling process.

CENÁRIO	DESCRIÇÃO
1	Obras de engenharia propostas no âmbito do “Projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas” implementadas.
2	Obras do Cenário 1 , mais a implantação da estrutura de soleira no canal da Av. Visconde de Albuquerque com crista na cota 0,80m.
3	Obras do Cenário 2 , considerando a não abertura da comporta de ligação entre o Canal do Jóquei e o Rio dos Macacos.
4	Implantação da estrutura de soleira no Canal do Jóquei, sem as obras principais do “Projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas”.
5	Obras do Cenário 2 , com implantação de uma comporta de sentido único (<i>FLAP</i>) com diâmetro de 1,0m na soleira.
6	Cenário 3 , com implantação de uma comporta de sentido único (<i>FLAP</i>) com diâmetro de 1,0 m na soleira.
7	Cenário 3 , com implantação de uma estrutura com 4 comportas de sentido único (<i>FLAP</i>) no canal da Av. Visconde de Albuquerque. Essa estrutura deverá ter altura suficiente para impedir o vertimento das águas de cheia do Rio Rainha.
8	Obras do Cenário 1 , considerando a implantação de dois conjuntos de estruturas de comportas de sentido único, um no canal da Av. Visconde de Albuquerque e outro na ligação entre o Canal do Jóquei e o Rio dos Macacos, dotadas de 5 e 6 comportas, respectivamente.
9	Obras de engenharia propostas no âmbito do “Projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas” implementadas, com o deslocamento da comporta de separação dos rios dos Macacos e Rainha para junto da Av. Bartolomeu Mitre.
10	Implantação de comporta junto à Av. Bartolomeu Mitre, mas com foz do Rio dos Macacos não dragada.

• O **Cenário 4** funciona como cenário de alerta: nele se simula a introdução da comporta e da soleira no Jóquei, mas não se consideram as principais intervenções na lagoa, ou seja, ela permanece com níveis médios mais altos e o Rio dos Macacos também não recebe qualquer dragagem de limpeza. Nessa configuração, mantém-se, como nos dias de hoje, o escoamento do Rio dos Macacos seguindo tanto para a lagoa, como para o Canal do Jóquei. Essa situação faz com que o Canal do Jóquei extravase em seus pontos de cota mais baixa, registrando níveis d'água na casa de 2,0m para a Situação de Projeto e 2,1m para a Situação Atual, o que implica em cerca de 0,20m a 0,30m fora da calha.

• O **Cenário 5**, simulado apenas para a Situação de Projeto, mostra a soleira com uma comporta *flap*, que tem a vantagem de permitir escoamento sempre que o nível das águas internas seja maior do que o das externas, garantindo a possibilidade de limpeza do fundo do Canal do Jóquei. Nesse cenário, os níveis máximos, com a comporta do Rio dos Macacos aberta, são bastante similares aos do Cenário 2. Um resultado interessante, porém, diz respeito aos níveis mínimos, que praticamente se igualam aos níveis da própria lagoa, uma vez que eles são comandados pela comunicação com o Rio dos Macacos e podem descarregar no Rio Rainha, na recessão da cheia.

• No **Cenário 6**, simulado apenas para a Situação de Projeto, foi representado o efeito da não abertura da comporta de ligação com o Rio dos Macacos, considerando a comporta *flap* na soleira do Canal do Jóquei. Os resultados não se diferenciaram significativamente dos resultados apresentados na simulação do Cenário 3, que não considerava a implantação da comporta *flap*. A partir desses resultados, pode-se observar que a comporta *flap* não tem efeito sobre os níveis máximos de cheia dentro do Canal do Jóquei (uma vez que os níveis no rio Rainha são altos e determinam a permanência da comporta fechada, boa parte do tempo na cheia), sendo importante para garantir um escoamento no canal em épocas de seca, melhorando a limpeza do fundo.

• O **Cenário 7** considera o total isolamento do Canal do Jóquei dos rios Rainha e dos Macacos, através de comportas com cristas mais altas que a cheia máxima desses rios. Para permitir o

esvaziamento do canal, foi prevista a implantação de uma estrutura de comportas *flap* na ligação com o Rio Rainha, porém, com a cheia desse rio, a comporta permanece muito tempo fechada, ocasionando um grande extravasamento no interior do Jóquei, com cotas de nível d'água acima de 2,9m, o que mostra a inviabilidade desta solução.

• No **Cenário 8**, foi prevista, também, a implantação de uma estrutura de comportas *flap* na ligação do canal do Jóquei com o Rio dos Macacos, buscando-se aumentar a capacidade de esvaziamento do canal do Jóquei, dado que os níveis d'água no Rio dos Macacos são menores. Nesse cenário, há um melhor funcionamento da comporta que liga o Jóquei ao Rio dos Macacos, que apresenta menores restrições para a descarga do Canal do Jóquei, reduzindo os níveis máximos dentro deste canal para aproximadamente 1,85m. Vale ressaltar que nessa situação, o Canal do Jóquei tem capacidade para escoar as suas águas para os dois rios, através das comportas *flap*, o que possibilita o carreamento de uma água com menor qualidade, oriunda da limpeza do próprio Jóquei e do sistema de drenagem de regiões urbanas circunvizinhas afluentes ao canal, em direção ao Rio dos Macacos e, em consequência, para a Lagoa Rodrigo de Freitas. Essa solução, porém, não é viável, sob o ponto de vista prático, sendo mais simples ter a comporta tradicional aberta, em lugar do conjunto de *flaps*.

• O **Cenário 9**, ou seja, a modificação da posição da comporta associada às obras de recuperação da Lagoa Rodrigo de Freitas permite um funcionamento do Canal do Jóquei com folga, sem extravasamentos. Essa configuração evita também a construção da soleira, uma vez que o Canal do Jóquei passa a receber apenas águas do Rio dos Macacos. O próprio Jóquei, porém, passa a contribuir diretamente para o Rio dos Macacos, também em águas baixas, o que não ocorre hoje, com a comporta da Rua General Garzón fechada. Em termos qualitativos, essa opção também reduz a vazão do Rio dos Macacos, no canal da Rua General Garzón, por não mais permitir a transposição do Rio Rainha. Essa transposição foi verificada, em condições de cheia, para todos os cenários em que se dragou a foz do Rio dos Macacos. Em termos práticos, diminui-se a possibilidade de maiores alagamentos na Rua Jardim Botânico, uma vez que a descarga do Rio dos Macacos fica mais folgada.

• O **Cenário 10**, por sua vez, mostra que a solução da comporta junto à Av. Bartolomeu Mitre provoca alagamentos no Jóquei, caso a foz do Rio dos Macacos não seja dragada/mantida. Importante destacar que esta observação condiz com o próprio funcionamento atual, em que o Rio dos Macacos, com níveis mais altos pelo assoreamento de sua calha, depende do Canal do Jóquei para extravasar parte de suas vazões para o Rio Rainha.

Destaca-se, então, que o aumento de eficiência do Rio dos Macacos pode trazer águas do Rio Rainha para a Lagoa Rodrigo de Freitas, durante as cheias. A comporta imaginada apenas para conter, em águas baixas, as descargas do Jóquei e do Rio Rainha para o Rio dos Macacos, mostra uma possível necessidade de se manter fechada também na cheia, separando os dois sistemas. A soleira de fundo, proposta para a calha do Canal do Jóquei, na cota de 0,8 (com 1,6m de profundidade), isola o Rio Rainha do Canal do Jóquei e ainda mantém o Canal do Jóquei em calha, mesmo com a comporta do Rio dos Macacos fechada, na situação de projeto, mas gera extravasamentos quando considerado o fundo atual do Canal do Jóquei (resultados do cenário 3). Esse extravasamento supera em cerca de 0,20m o ponto mais baixo da margem do Canal do Jóquei. A presença de uma comporta *flap* no fundo desta soleira baixa, na cota 0,8m, permitiria, primordialmente, um melhor funcionamento na estiagem e limpeza de fundo no canal. Com a comporta aberta do Canal do Jóquei, para o Rio dos Macacos, a situação de projeto funciona com folga, enquanto

a situação atual, com o fundo mais elevado chega ao limite de extravasamento, mas ainda é funcional (resultados do cenário 2). Essa situação, porém, como já comentado, leva a um aporte de águas do Rio Rainha para a Lagoa Rodrigo de Freitas, com uma qualidade sem controle, embora diluída pela própria cheia. As tentativas de isolar o Canal do Jóquei das águas de cheia do Rio Rainha (Cenário 7) não são funcionais para a comporta junto à Rua General Garzón, pois ocorrem grandes alagamentos dentro do Jóquei. A partir desta constatação, foi considerada a possibilidade de deslocar a comporta para o outro extremo do Canal do Jóquei, junto à Av. Bartolomeu Mitre, o que mostrou bons resultados para a foz do Rio dos Macacos dragada, como pode ser visto na Figura 32. Essa opção permite uma operação versátil do sistema, facultando a separação completa dos rios Rainha e dos Macacos, tanto na estiagem, como na cheia. O Jóquei passa a receber apenas águas do Rio dos Macacos, com uma boa qualidade, o que evita a possibilidade de degradação de suas áreas internas por aporte de águas de qualidade não controlada do Rio Rainha.

Consideradas todas as opções simuladas, cabe ainda destacar a possibilidade de manter a operação atual, que poderia ser classificada como opção “zero”, com a comporta da Rua General Garzón fechada durante a estiagem, de modo que o Rio dos Macacos continue fluindo pelo Canal do Jóquei e auxilie a melhorar as condições de qualidade do Rio Rainha. Na cheia, essa comporta da Rua General

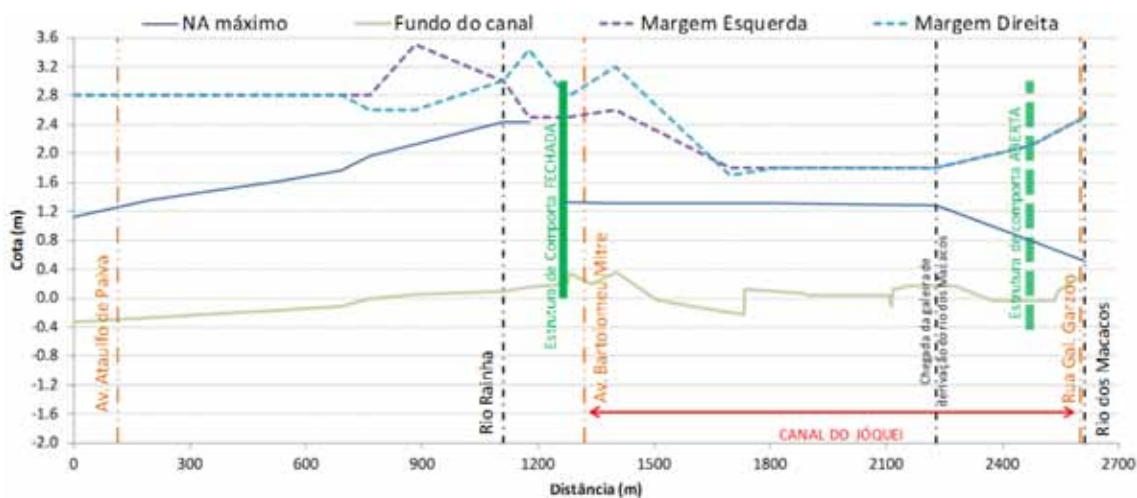


Figura 32. Perfil longitudinal do Canal do Jóquei e trecho inferior do Rio Rainha, até desaguar no mar, considerando o Cenário 9 de simulação.

Figure 32. Longitudinal profiles of Jockey Channel and lower stream of Rainha River, until it flows into the sea, considering the 9th scenario of simulation.

Garzón seria aberta e o Rio dos Macacos, bem como o Rio Rainha, poderiam ambos descarregar na lagoa. Essa configuração, porém, permite aporte de poluição diluída para a lagoa, embora evite a construção de uma nova comporta (e de uma soleira), com resultados que seriam semelhantes aos do Cenário 2. Perder-se-ia, porém, a possibilidade de devolver o Rio dos Macacos à lagoa, em uma ação de resgate de sua foz original.

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DA MODELAGEM

As obras propostas para a Lagoa Rodrigo de Freitas, considerando a abertura da comporta da Rua General Garzón, o fechamento do Canal do Jóquei, também através de comportas, para evitar o aporte da cheia do Rio Rainha, e a implantação de um sifão invertido no Canal do Jardim de Alá, para melhorar a comunicação contínua entre lagoa e mar, mostraram resultados muito positivos sob a ótica da drenagem urbana. O efeito observado no canal do Rio dos Macacos, na Rua General Garzón, mostra uma significativa redução dos níveis de alagamento, mesmo no pico da cheia, abrindo espaço no canal para receber maiores vazões do sistema. A simples implementação das obras propostas no projeto de recuperação ambiental da lagoa geram uma redução de 38% nas profundidades de alagamentos no principal ponto de controle da bacia, situado na esquina das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão.

Cenários complementares de análise mostram que a implantação de uma galeria maior no trecho final do Rio dos Macacos, sob a Rua Jardim Botânico, praticamente eliminaria os alagamentos na região, sobrando uma lâmina residual associada à própria passagem da cheia. Outra possibilidade considerada, referente à implantação de um reservatório de retenção, inicialmente proposto na área interna do parque Jardim Botânico, mostra também eficácia no controle de cheias, com reduções de níveis d'água de quase 66%. Estes cenários complementares ilustram as possibilidades de ações para o controle de cheia que se abrem a partir da melhoria da capacidade de descarga da foz do sistema e, por consequência, do rebaixamento dos níveis d'água da Lagoa Rodrigo de Freitas. Ambas as propostas demandam detalhamento

e a questão de um reservatório no Jardim Botânico demandaria, certamente, uma discussão aprofundada, em função da importância do parque. Além disso, outras possibilidades de retenção poderiam ser abordadas, com a proposição de reservatórios menores, distribuídos nas vertentes de encostas, em áreas ainda desocupadas, de modo a suprir a mesma capacidade de amortecimento, assim como estruturas associadas a equipamentos urbanos, sob o conceito de paisagens multifuncionais, agregando a função de controle de inundações aos dispositivos urbanísticos, como praças e quadras de esporte. Não é objetivo deste trabalho detalhar qualquer destas soluções. Entretanto, a discussão destas concepções e os possíveis efeitos sobre a redução de cheias na região são importantes resultados aqui observados.

Desta forma, observando o conjunto de cenários modelados, percebe-se que as obras de recuperação ambiental propostas para a lagoa têm efeito positivo também sobre o sistema de drenagem urbana da bacia do Rio dos Macacos, abrindo portas para ações complementares mais eficazes no controle de cheias.

REFERÊNCIAS

- BENEVOLO, L. 2001. *História da Cidade*. Terceira Edição. Editora Perspectiva, São Paulo, SP. 728p.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. 2005. *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. ABRH, Porto Alegre, RS. 266 p.
- BISWAS, A.K. 1970. *History of Hydrology*. North Holland Publishing Company, Amsterdam-London. 336p.
- CARNEIRO, P.R.F. 2008. Controle de Inundações em Bacias Metropolitanas, Considerando a Integração do Planejamento do Uso do Solo à Gestão dos Recursos Hídricos. Estudo de Caso: Bacia dos Rios Iguaçu/Sarapuá na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 296p.
- CIRF. 2006. *La riqualificazione fluviale in Italia. Linne guida, strumenti ed esperienze per gestire I corsi d'acqua e il territorio*. A. Nardini, G. Sansoni (curatori) e collaboratori. Mazzanti Editori, Venezia, Itália. 832p.
- GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M. & GARCÍA DE JALÓN, D. 2007. *Restauración de Ríos. Guía Metodológica para la Elaboración de Proyectos*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, Espanha. 318p.

- GUSMAROLI, G.; BIZZI, S. LAFRATTA, R. 2011. L'approccio della Riqualificazione Fluviale in Ambito Urbano: Esperienze e Opportunità. *In: 4° Convegno Nazionale di Idraulica Urbana*. Venezia, VE, Itália. 1 CD-ROM.
- HERZOG, C.P. & ROSA, L.Z. 2007. Infraestrutura Verde: Sustentabilidade e Resiliência para a Paisagem Urbana. *Revista LABVERDE*, 1. <<http://www.revistalabverde.fau.usp.br>>. (Acesso em 07/04/2011).
- MAGALHÃES, L.P.C.; MIGUEZ, M.G.; MASCARENHAS, F.C.B.; MAGALHÃES, P.C.; BASTOS, E.T. & COLONESE, B.L. 2005. Sistema Hidro-Flu para Apoio a Projetos de Drenagem. *In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. João Pessoa, PB, Brasil. 1 CD-ROM.
- MASCARENHAS, F.C.B.; TODA, K.; MIGUEZ, M.G. & INOUE, K. 2005. *Flood Risk Simulation*. WIT PRESS, Southampton and Boston. 436p.
- MASCARENHAS, F.C.B. & MIGUEZ, M.G. 2002. Urban Flood Control through a Mathematical Cell Model. *Water International*, 27: 208-218, <http://dx.doi.org/10.1080/02508060208686994>
- MIGUEZ, M.G. 2001. Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 301p.
- MIGUEZ, M.G.; MASCARENHAS, F.C.B. & VERÓL, A.P. 2011. MODCEL: A Mathematical Model for Urban Flood Simulation and Integrated Flood Control Design. *In: 4° Convegno Nazionale di Idraulica Urbana*. Venezia, VE, Itália. 1 CD-ROM.
- MIGUEZ, M.G.; MASCARENHAS, F.C.B. & MAGALHÃES, L.P.C. 2007. Multifunctional Landscapes For Urban Flood Control In Developing Countries. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, WIT PRESS, Issue 2, Volume 2.
- PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. 2003. Nota Técnica nº 12: Zona Sul a Imagem do Carioca. *Coleção Estudos da Cidade*. Rio Estudos, Rio de Janeiro, RJ. 41p.
- PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. 2011. *Evolução e Ocupação Urbana do Rio*. <<http://portalgeo.rio.rj.gov.br>>. (Acesso em 10/08/2011).
- RUTHERFURD, I.D.; JERIE, K. & MARSH, N. 2000. *A Rehabilitation Manual for Australian Streams*. Volume 1. Land and Water Resources Research and Development Corporation, Canberra, Australia.
- ZANOBETTI, D.; LORGERÉ, H.; PREISSMAN, A. & CUNGE, J.A. 1970. Mekong Delta Mathematical Program Construction. *Journal of the Waterways and Harbours Division – ASCE*, 96: 181-199.

Submetido em 21/10/2011

Aceito em 03/04/2012