

SOLUÇÕES PARA ENCHENTES EM PLANÍCIES ALUVIAIS NA ZONA URBANA: UM ESTUDO DE CASO DA BACIA DA VILA LEOPOLDINA EM SÃO PAULO/ SP

Brunoro, D. B. M.^{1,2} @; Garcia, J. I. B.^{1,2} @; Tominaga, E. N. S.² @; Conde, F.² @; Martins, J. R. S.^{1,2} @

RESUMO

O presente artigo visa realizar um estudo de caso das inundações frequentes que ocorrem na Bacia da Vila Leopoldina, localizada no município de São Paulo. As inundações nesta bacia são, primordialmente, decorrentes de dois eventos independentes entre si: chuvas locais e extravasamento do Rio Pinheiros. As chuvas locais causam enchentes devido ao tamanho insuficiente das galerias de drenagem de águas pluviais, enquanto que as cheias do Rio Pinheiros adentram a Bacia tanto pela superfície quanto por refluxo pelas galerias de drenagem.

Este artigo traz uma análise dos fatores principais que causam as enchentes nesta Bacia, e obras específicas capazes de atenuar as enchentes com nível alto no Rio Pinheiros. Dentre as obras propostas, destacam-se os condutos forçados – responsáveis por levar o escoamento de montante em carga direto para o Rio Pinheiros, vencendo a pressão hidráulica do nível d'água alto de jusante; além das estruturas do pôlder – responsáveis pelo barramento das águas com o dique e bombeamento forçado das águas da planície aluvial para o Rio Pinheiros.

Todas as cotas utilizadas neste artigo estão no referencial ortométrico SIRGAS 2000.

ABSTRACT

The case study presented here is the Vila Leopoldina River basin, located in the city of São Paulo, in Brazil. The floods that occur in this Basin are due to, mainly, two independent factors: local rain and overflow of the Pinheiros River. Local rain causes floods due to the small size of the rainwater drainage galleries, meanwhile the overflow of the Pinheiros River floods the Basin through the surface and by backflowing through the drainage galleries.

This article presents an analysis of the main factors that cause flooding in this Basin, and specific interventions that can minimize its effects when there's a high water level in the Pinheiros River. Amongst the proposed interventions, there are hydraulically loaded galleries – responsible for taking the upstream flow directly into the Pinheiros River, overcoming the hydraulic pressure of the high-water level downstream; and polder structures – responsible for damming the water with the dike and forced pumping of water from the alluvial plain to the Pinheiros River.

All dimensions used in this article use the SIRGAS 2000 reference system.

Palavras-Chave

Enchentes; macrodrenagem; pôlder

¹ Departamento de Hidráulica e Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, 05508-010, São Paulo, Brasil

² Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), 05508-020, São Paulo, Brasil

1. Introdução

São Paulo é uma megacidade de 950 km² de área urbana com alto grau de urbanização e impermeabilização. Assim como na maioria das cidades, seu desenvolvimento ocorreu ao longo de corpos d'água – neste caso, os Rios Pinheiros, Tietê e seus afluentes – e o processo de urbanização ocorreu muito rapidamente, passando de 240 mil habitantes em 1900 (DIRECTORIA GERAL DE ESTATÍSTICA, 1900), para 2 milhões em 1950 (IBGE, 1950) e, finalmente, para 12 milhões (IBGE, 2010) nos dias atuais.

Devido ao crescimento exponencial do processo de urbanização, sem planejamento, a cidade passou a acumular déficits estruturais (JACOBI, 2013), que, no seu somatório, geraram problemas diversos à população. Devido à falta de saneamento básico, muitos rios passaram a ser canalizados para esconder o lixo, esgoto e afastar os vetores de doenças (SEABRA, 1987).

A retificação dos Rios Tietê e Pinheiros começaram a ser idealizadas nas décadas de 20 e 30, com projetos de Prestes Maia, Saturnino de Brito, dentre outros, mas só foi implementada nas décadas de 50 e 60 (PESSOA, 2019).

As inundações provocadas por estes grandes rios eram comuns, em especial, a grande enchente de fevereiro de 1929, que atingiu níveis nunca antes vistos – porém especula-se que foi um ato criminoso da companhia Light para valorização de suas áreas de várzea (SEABRA, 1987). Há marcos desta enchente espalhados por São Paulo até os dias atuais – os marcos delimitam locais até onde as águas chegaram – e, em especial, o marco que se encontra na Rua Porto Seguro, próximo ao número 48, possui uma cota aproximada de 722,5 m (referencial SIRGAS 2000), indicando que as águas do Tietê alcançaram esta altura.

A enchente severa mais recente, de 10 de fevereiro de 2020, alcançou o nível de 722,15 m (nível de extravasamento: 722,40 m) no posto de monitoramento do Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP, 2022) no Rio Tietê próximo à ponte das Bandeiras, local próximo ao marco de enchente da Light. Apesar das leituras serem em locais próximos, as condições da enchente de 1929 não podem ser diretamente comparadas com as condições atuais devido a inúmeros fatores, dentre eles: alteração do uso do solo na cidade, canalização e retificação dos rios principais, além do fato que hoje em dia os Rios Pinheiros e Tietê têm seus níveis controlados por bombeamento da Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. (EMAE, 2022).

Neste mesmo evento de fevereiro de 2020 o nível máximo alcançado no Rio Pinheiros próximo à barragem de Retiro (próximo à CEAGESP) foi de 720,21 m (SAISP, 2022) (referencial SIRGAS 2000). Eventos similares de extravasamento ocorreram em anos anteriores, porém não foi possível obter os dados dos níveis máximos de tais eventos para comparação.

O evento de fevereiro de 2020 teve um registro de 132 mm em 17h, no posto de monitoramento localizado na área estudada, o que representa um período de retorno simples (T_r) de 26 anos. Apesar do baixo tempo de recorrência observado, os efeitos do nível d'água foram catastróficos: a ferrovia e vias marginais ficaram debaixo d'água, houve uma perda de mais de 7.000 toneladas de alimentos no entreposto Ceagesp e mais de 40 carros de luxo foram afogados em uma importadora de carros na Av. Gastão Vidigal, gerando um prejuízo estimado em milhões de reais (GLOBO, 2020; UOL, 2020).

Milhares de toneladas de alimentos já foram perdidos com os extravasamentos do Pinheiros para dentro da Ceagesp, a Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (GLOBO, 2009; SP-URBANISMO, 2016; TERRA, 2017; UOL, 2016), que é a maior central de abastecimento de frutas, legumes, verduras, flores e pescados da América Latina, por onde circulam diariamente cerca de 50 mil pessoas e 12 mil veículos (CEAGESP, 2022).

2. As Causas das Enchentes

A Bacia da Vila Leopoldina está localizada na zona oeste do município de São Paulo (Figura 1), engloba os bairros da Vila Leopoldina, Alto da Lapa e Boaçaça. Seu território está sob jurisdição das subprefeituras da Lapa e Pinheiros.



Figura 1: Localização da Bacia da Vila Leopoldina

Os córregos principais da Bacia são os córregos Vila Leopoldina e Cemitério da Lapa, que possuem suas nascentes na parte alta da Bacia e seguem canalizados sob as vias – com exceção de dois pequenos trechos intermediários onde o córrego Vila Leopoldina aflora à superfície.

Uma área de interesse estratégico da Bacia é a Ceagesp, que fica localizada em parte da extensa planície aluvial decorrente da confluência do Rio Tietê com o Rio Pinheiros, a Ceagesp também possui depressões no terreno, com cota aproximada de 718,5 m – enquanto a cota média da planície aluvial varia entre 719 e 720 m. O mapa hipsométrico pode ser observado na Figura 2, juntamente com o diagnóstico de inundações da Bacia, que contém dados das inundações frequentes da SIURB, pontos de alagamento da CET/CGE (Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo) e um levantamento de inundações realizado pela FCTH.

Observando a Figura 2 é possível notar que as inundações na bacia se concentram na parte de jusante, onde está localizada a grande planície aluvial. A rede de drenagem da bacia possui galerias com seções transversais pequenas, além de problemas locais de recalque, que geram aclives graves, como é o caso da galeria da Rua Mergenthaler. Somado a isto, a grande extensão da planície aluvial requereu um aprofundamento das galerias a fim de garantir declividade suficiente para o escoamento, porém isto gerou desemboques em cotas baixas no Rio Pinheiros.

As cotas das geratrizes inferiores (GI) dos desemboques no Rio Pinheiros das galerias do córrego Vila Leopoldina (via Rua Mergenthaler) e córrego Cemitério da Lapa (via Av. Queiroz Filho) são, respectivamente, 714,45 m e 715,61 m. Ao comparar estes valores com a curva de permanência do nível d'água máximo diário do Rio Pinheiros (Figura 3), é possível notar que a galeria do córrego Vila Leopoldina opera 100% do tempo parcialmente afogada, e a galeria do córrego Cemitério da Lapa opera 80% do tempo parcialmente afogada.

Não obstante, a cota média da via marginal pinheiros – que atua como um dique, causando o barramento superficial das águas – em frente à bacia varia entre 719,5 e 720,5 m. Desta forma, ao observar a Figura 3 é possível concluir que, em eventos de altos níveis d'água do Rio Pinheiros, suas águas invadem a Bacia pela superfície. Além disto, as águas do Rio principal também invadem a Bacia por refluxo pelas galerias, aflorando à superfície através das bocas de lobo nos trechos mais baixos do terreno, como é o exemplo de uma área de depressão da CEAGESP que tem cota de 718,5m.

Desta forma, é possível concluir que as enchentes da Bacia da Vila Leopoldina são causadas por dois fatores independentes entre si: precipitações locais que sobrecarregam a rede de drenagem subdimensionada; e altos níveis do Rio Pinheiros que causam enchentes por refluxo pelas galerias ou por avanço superficial das águas. Notoriamente, eventos de chuva local concomitantes a um extravasamento do Rio Pinheiros têm seus efeitos intensificados.

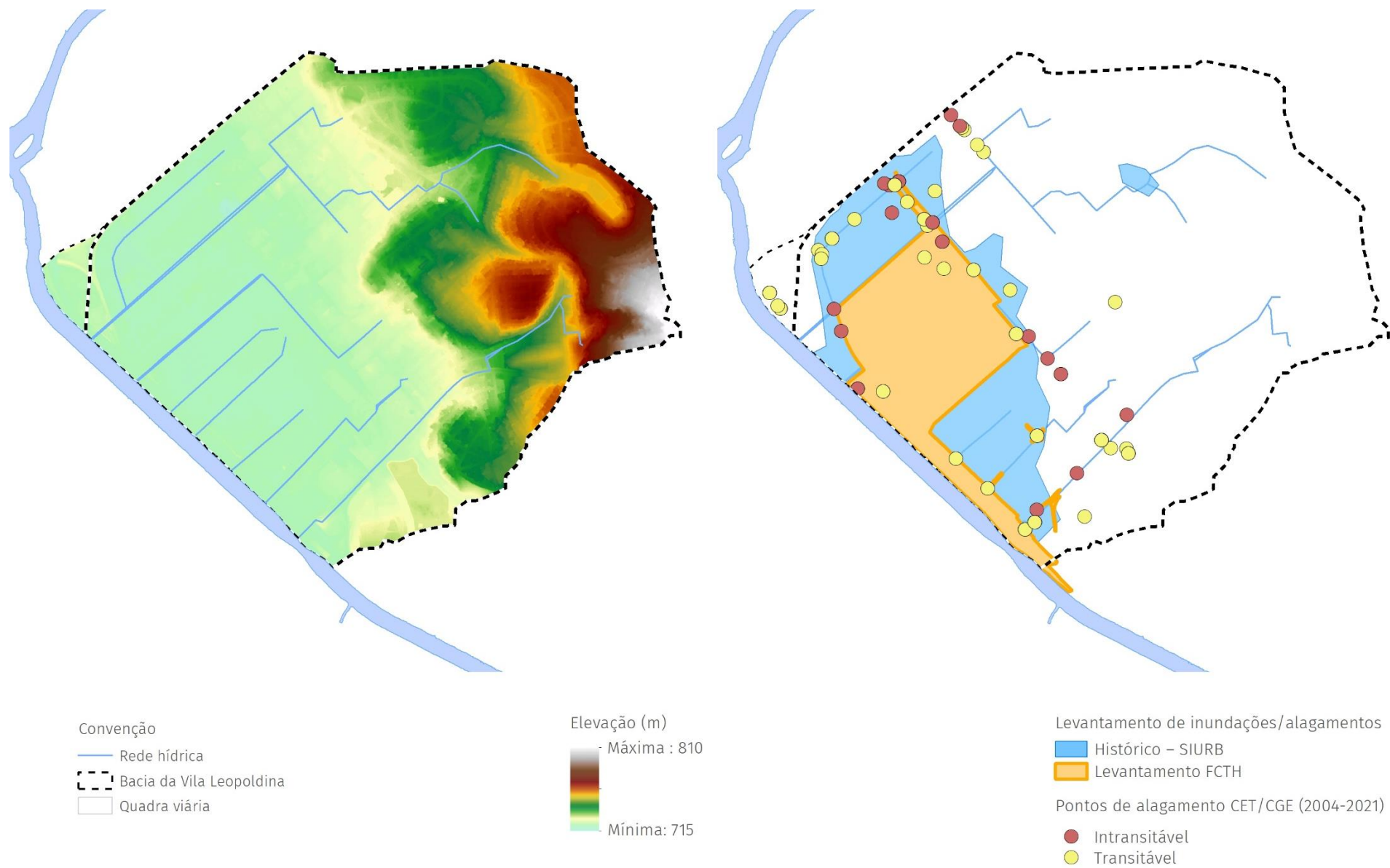


Figura 2: Mapa hipsométrico e diagnóstico de inundações da Bacia da Vila Leopoldina

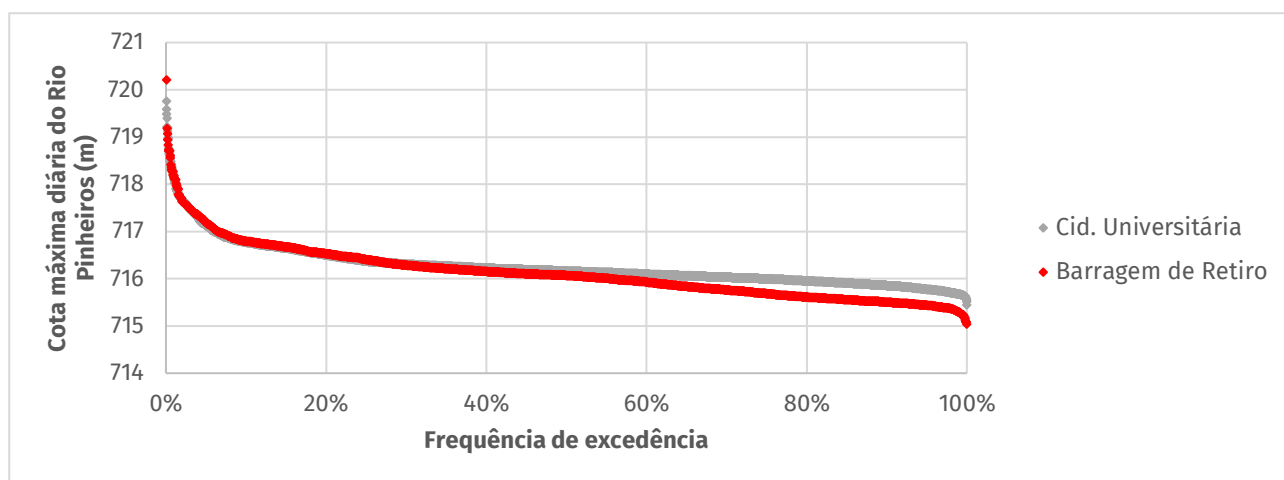


Figura 3: Curva de permanência do nível d'água máximo diário do Rio Pinheiros, para dois postos próximos da área de estudo (SAISP, 2022)

3. Metodologia

Este artigo é embasado nos extensos estudos realizados para o Caderno de Bacia Hidrográfica Bacia da Vila Leopoldina, da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH, 2022). A simulação da rede hídrica foi realizada em modelo hidráulico-hidrológico com o software PCSWMM (CHI, 2022), foram levados em conta declividade do terreno, taxa de impermeabilização para cada sub-bacia, n de Manning para superfícies impermeáveis e permeáveis, tormentas de projeto e demais parâmetros que podem ser encontrados na publicação original.

A segurança de projeto foi estabelecida para uma tormenta de projeto T_r 100 anos e nível normal do Rio Pinheiros; a eficácia das intervenções propostas também foram verificadas para um cenário de T_r 25 anos e nível do Rio Pinheiros em 721,50 m, por questões de segurança por exceder o nível d'água (NA) de 720,21 m observado em fevereiro de 2020.

4. Soluções Principais

Para o caso da Bacia da Vila Leopoldina, as estratégias principais a serem seguidas a fim de sanar as enchentes oriundas de nível elevado do Rio Pinheiros e chuvas locais são:

- Instalação de válvulas unidirecionais nos desemboques: impedem o refluxo;
- Reservação a montante: amortecer o pico de vazão ao longo das galerias, diminuindo a quantidade de água a ser bombeada pelo polder;
- Implementação de um sistema de dique e polder: responsável por proteger a bacia contra o avanço superficial das águas e também por realizar o escoamento forçado das áreas baixas para o corpo hídrico principal;
- Conduto forçado: canalização de grande porte que recebe a contribuição de montante em um trecho de cota alta. O escoamento segue sem contribuições ao longo do caminho, e, portanto,

com a carga hidráulica disponível é capaz de drenar as águas para o corpo receptor de jusante, vencendo a pressão hidráulica do nível d'água no desemboque;

- Reforço de seção: aumentar a capacidade da rede a fim de diminuir as enchentes por chuvas locais.

Este artigo focará nas intervenções do pôlder e do conduto forçado, devido à escassez de materiais acadêmicos que abordam os temas.

4.1. Pôlder

Polderes e diques são estruturas de proteção contra inundações usadas em todo o mundo em locais com terrenos situados abaixo das linhas de inundações. Têm como vantagem o fato de não obrigar a remoção da ocupação e como desvantagem a necessidade de operação e manutenção. O sistema de dique e pôlder opera fazendo o barramento superficial das águas e bombeando a vazão das áreas baixas para a parte externa aos mesmos. Deve ser definida a cota de proteção pretendida, que, por segurança, deve exceder as cotas já observadas em eventos anteriores. A extensão do dique deve cobrir toda a área diretamente afetada pelo extravasamento, o topo superior do dique deve coincidir com a cota de proteção determinada. No caso da Bacia da Vila Leopoldina, como o nível de segurança projeto foi estipulado em 721,50 m, o topo do dique deve atingir a cota de 722 m, garantindo uma borda livre de 50 cm.

A escolha dos pontos de fechamento deve ser estratégica, pois deve assegurar que as águas não entrem na bacia dando a volta por trás do dique. Preferencialmente o fechamento deve ocorrer em uma porção mais elevada do terreno, que atinja a cota de segurança. Se não for possível, então deve ser realizado um aterramento a fim de garantir a cota de segurança.

Na bacia da Vila Leopoldina os dois pontos de fechamento sugeridos são:

- Norte: junto à barragem de retiro, devido a existência do alteamento do terreno junto à ferrovia;
- Sul: Como toda a margem direita do Rio Pinheiros é uma planície com cotas muito semelhantes, seria necessário realizar o alteamento da via marginal e ferrovia para alcançar a cota de 722 m. Devido ao desafio imposto que seria o alteamento da ferrovia – que interromperia o funcionamento dos trens, afetando assim todo o sistema de transporte do município e a vida de todos os cidadãos – sugere-se a instalação do dique em toda a margem esquerda da via Marginal Pinheiros, entre a usina elevatória de retiro e traição.

A vazão calculada de bombeamento para uma chuva de Tr 25 anos e NA do Rio Pinheiros em 721,50 m é de 18 m³/s, dividida igualmente em dois pôlderes em áreas distintas (Figura 4). Isto, claro, levando em consideração as demais obras sugeridas na bacia, com 94 mil m³ de reservação a montante, além dos dois condutos forçados (3,2 km).

4.2. Conduto forçado

A drenagem forçada é, da mesma forma que o pôlder, uma solução que permite evitar a remoção da ocupação e garantir a segurança contra inundações, devendo para tanto ser operada adequadamente. São galerias de grande porte, responsáveis por levar o escoamento de montante diretamente para a foz vencendo o alto NA de jusante (721,50 m) devido à carga hidráulica do escoamento. Neste estudo de caso foi sugerida a implementação de dois condutos, um em cada córrego principal; o conduto do córrego Vila Leopoldina recebe sua contribuição na Rua Carlos Weber, enquanto o conduto do córrego Cemitério da Lapa, na Rua Bacopari (Figura 5). O primeiro tem extensão de 2 km, e o segundo, de 1,2 km.

4.3. Simulação hidráulico-hidrológica

As intervenções foram simuladas em modelo quasi-2D no software PCSWMM, utilizando as condições de contorno: chuva de Tr 5 anos e nível do Pinheiros em 710,21 m – nível referente à inundação de fevereiro de 2020. A mancha de inundação para o cenário hidráulico atual pode ser observada na Figura 4, onde se observa a extensa inundação na planície aluvial, mesmo com um evento de precipitação de baixa intensidade. A mancha inicial era de 1,825 km², com a implantação das duas intervenções a mancha diminuiu em 1,528 km², gerando cerca de 84% de redução de mancha. Com a implementação dos pôlderes, dique e válvulas unidirecionais a mancha diminuiu drasticamente, restando apenas as inundações devido ao déficit de macrodrenagem.

No segundo exemplo, tem-se a simulação de uma chuva de Tr 5 anos e um nível normal do Rio Pinheiros (Figura 5). É mostrado o resultado da mancha de inundação simulada para o cenário atual e para um cenário com a implementação dos dois condutos forçados, um em cada córrego principal da bacia. A mancha inicial era de 0,469 km², com a implantação das duas intervenções a mancha diminuiu em 0,315 km², gerando cerca de 67% de redução de mancha. Como as galerias dos córregos principais são independentes entre si, foi possível simular uma obra análoga em cada córrego sem haver efeito cumulativo em série.

Comparando as manchas da rede atual (Figura 4 e Figura 5) nota-se também os efeitos do refluxo do Rio Pinheiros, que ocupa toda a grande planície aluvial; na Figura 5 a mancha de inundação resultante é majoritariamente gerada pelo déficit de vazão suportada pela rede de drenagem atual, requerendo obras de reservação a montante e reforços de galeria.

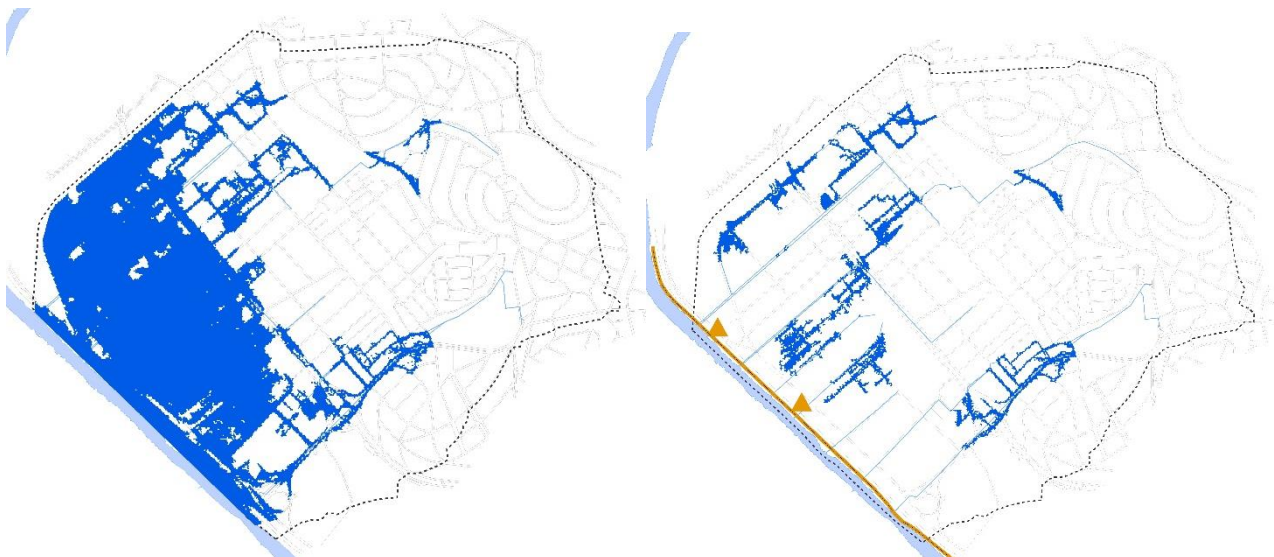


Figura 4: Manchas simuladas para condição de Tr 5 anos e nível do Rio Pinheiros em 720,21 m: cenário hidráulico atual (esquerda); cenário com as obras dos pôlderes, dique e válvula unidirecional (direita)



Figura 5: Manchas simuladas para condição de Tr 5 anos e nível do Rio Pinheiros normal: rede atual (esquerda); condutos forçados nos dois córregos principais (esquerda)

5. Conclusão e Considerações Finais

Este artigo traz à tona o estudo de caso de uma área comumente assolada por enchentes, que possui extensa planície aluvial e eventos frequentes de nível alto no corpo receptor de jusante, e trazendo também a exemplificação de duas soluções estruturais não usuais: o polder e o conduto forçado. O polder apresentou uma redução de mancha de 84% para uma chuva de Tr 5 anos e um nível alto do Rio Pinheiros, enquanto os condutos forçados apresentaram uma redução de mancha de 67% para a mesma chuva de projeto, porém com nível do Rio Pinheiro normal. O conteúdo aqui disponibilizado é um excerto dos estudos do Caderno de Bacia Hidrográfica Bacia da Vila Leopoldina – onde é possível ler com detalhes as soluções propostas para as inundações de Tr até 100 anos.

Em casos de problemáticas similares, isto é, com enchentes em planícies aluvionares devido ao extravasamento do corpo receptor de jusante, a implementação de estruturas de pôlder, com dique, e condutos forçados, podem ser analisadas como possíveis soluções viáveis. Outras soluções com seus impactos já comprovados são a reservação a montante, que diminui o pico de vazão máximo, e os reforços de galeria, que devem ser implantados com bom planejamento para que não piores as condições de jusante.

Novos estudos sobre pôlderes e condutos forçados podem ser realizados com análise de eficácia em diferentes cenários, localidades, além de estudos teóricos analisando a carga hidráulica e perda de carga nos condutos forçados.

6. Referências

CEAGESP. **Companhia de Entrepostos e Armazéns Gerais de São Paulo**. Disponível em:

<<https://ceagesp.gov.br/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

CHI. **Computational Hydraulics International**. Disponível em: <<https://www.chiwater.com/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

DIRECTORIA GERAL DE ESTATÍSTICA. **Synopse do Recenseamento**. Rio de Janeiro, 31 dez. 1900.

EMAE. **Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A.** Disponível em: <<http://emae.com.br/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

FCTH. **Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica**. Disponível em: <<https://www.fcth.br/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

GLOBO. **Prejuízo com enchente na Ceagesp em SP é de R\$ 15 milhões**. Disponível em:

<<https://g1.globo.com/Noticias/SaoPaulo/0,,MUL1409312-5605,00-PREJUIZO+COM+ENCHENTE+NA+CEAGESP+EM+SP+E+DE+R+MILHOES.html>>. Acesso em: 1 out. 2021.

GLOBO. **Ceagesp estima prejuízo de R\$24 milhões por conta da chuva em São Paulo**. Disponível em:

<<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2020/02/11/ceagesp-estima-prejuizo-de-r-24-milhoes-por-counta-da-chuva-em-sp.ghtml>>. Acesso em: 1 out. 2021.

IBGE. **Estado de São Paulo – Censo Demográfico**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

IBGE. **Estimativas de População**. Disponível em: <<https://www.emplasa.sp.gov.br/RMSP>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

JACOBI, P. R. São Paulo metrópole insustentável – como superar esta realidade? **Cadernos Metrópole**, v. 15, n. 29, p. 219–239, 2013.

PESSOA, D. F. O processo de retificação do rio Tietê e suas implicações na cidade de São Paulo, Brasil. **Paisagem e Ambiente**, v. 30, n. 44, p. e158617, 27 nov. 2019.

SAISP. **Sistema de Alertas a Inundações de São Paulo**. Disponível em: <<https://www.saisp.br/>>. Acesso em: 28 fev. 2022.

SP-URBANISMO. **Nota Técnica CEAGESP**. São Paulo, 2016.

SEABRA, O. C. DE L. **Os meandros dos Rios nos Meandros do Poder Tietê e Pinheiros: Valorização dos Rios e das Várzeas na cidade de de São Paulo**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1987.

TERRA. **Chuva alaga parte da Ceagesp em SP**. Disponível em:

<<https://www.terra.com.br/noticias/brasil/cidades/vc-reporter-chuva-alaga-parte-da-ceagesp-em-sp,3ade68f40d94b310VgnCLD200000bbccceb0aRCRD.html>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

UOL. **Ceagesp perde 200 toneladas de frutas com enchente da última madrugada**. Disponível em:

<<https://m.folha.uol.com.br/cotidiano/2016/03/1748783-ceagesp-perde-30-toneladas-de-frutas-com-enchente-da-ultima-madrugada.shtml>>. Acesso em: 1 out. 2021.

UOL. **Chuva provoca prejuízo milionário em bairro da Zona Oeste de São Paulo**. Disponível em:

<<https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/agencia-estado/2020/02/12/chuva-provoca-prejuizo-milionario-em-bairro-da-zona-oeste-de-sao-paulo.htm>>. Acesso em: 1 out. 2021.