

ANÁLISE DE MANCHA DE ALAGAMENTO NO CENTRO URBANO DO MUNICÍPIO DE PETRÓPOLIS/RJ, UTILIZANDO O MODELO MODCEL

Ana Costa Marques Machado¹; Matheus Martins de Sousa²; Miguel Alvarenga Fernández y Fernández³ & Marcelo Gomes Miguez⁴

Palavras-Chave – Drenagem Urbana, Rio Quitandinha, Modelo de Células - MODCEL.

RESUMO

A cidade de Petrópolis, localizada na região serrana do estado do Rio de Janeiro e conhecida devido seu enorme valor histórico, teve uma urbanização baseada em preceitos revolucionários para a época do império. No entanto, estes não foram seguidos ao longo dos anos e ocorreu crescimento intenso e desordenado da cidade, o que levou grande parte do município a ocupar áreas de risco como encostas e vales em planícies de inundação. O presente trabalho é uma proposta de estudo de mapeamento de inundação para a cidade de Petrópolis com base em um modelo hidrodinâmico Quasi-2D, o MODCEL. A aplicação deste modelo implica a segmentação da bacia em células de escoamento que se conectam por meio de equações de escoamento conhecidas, formando uma rede de fluxo bidimensional com possibilidade de escoamento em várias direções. Como resultado são apresentados três mapas de inundação para o rio Quitandinha, decorrentes de chuvas com tempo de recorrência de 10, 20 e 50 anos. Os três mapas gerados prestam-se como subsídio tanto à gestão da bacia, quanto à simulação de eventuais soluções de engenharia para o problema em questão.

ABSTRACT

The city of Petrópolis, located in a mountainous region of the state of Rio de Janeiro and known for its enormous historical value, had an urbanization based on revolutionary precepts at the empire period. However, these were not followed over the years, and the intense and disorderly city growth led a large part of the municipality to occupy risk areas, featuring slopes and floodplains. The present work carries out a study of flood mapping for the city of Petrópolis applying the hydrodynamic Quasi-2D model, MODCEL. Applying MODCEL, which requires subdividing the basin in flow cells connected by known hydraulic equations composing a two-dimensional flow network allowing flows in several directions. The results show flood maps for the Quitandinha River, resulting from rainfall events of 10, 20 and 50 years of return period. The three maps can contribute to both the management of the basin and the simulation of future engineering solutions to solve flooding.

INTRODUÇÃO

A cidade de Petrópolis é conhecida devido seu enorme valor histórico, por ter sido fundada em 1843 para residência de veraneio do então Imperador Dom Pedro II. Sua urbanização se deu de forma revolucionária para a época, nela os lotes urbanos foram posicionados de frente para os rios, o que alterou o conceito do rio no espaço urbano, já que eram utilizados apenas para lançamento de esgoto

1) Afiliação: Departamento de Engenharia Civil. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - Cefet/RJ, R. Gen. Canabarro, 485, Departamento de Engenharia Civil, Maracanã, Rio de Janeiro/RJ; +55 21 2566-3057. ana.machado@aluno.cefet-rj.br

2) Afiliação: Programa de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos, 149, sala I-206. Rio de Janeiro/RJ; +55 21 3938-7833. matheus@hidro.ufrj.br

3) Afiliação: Departamento de Engenharia Civil. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - Cefet/RJ, R. Gen. Canabarro, 485, Departamento de Engenharia Civil, Maracanã, Rio de Janeiro/ RJ; +55 21 2566-3057. miguel.fernandez@cefet-rj.br

4) Afiliação: Programa de Engenharia Civil, Programa de Engenharia Ambiental e Programa de Engenharia Urbana. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos, 149, sala I-206. Rio de Janeiro/RJ; +55 21 3938-7833. marcelomiguez@poli.ufrj.br

no fundo das construções. Foram consideradas, também, medidas de não ocupação de topos dos morros, a não subdivisão dos lotes criados, a não ocupação das áreas com maior declividade, a preservação da sua cobertura vegetal para evitar deslizamentos, entre outras inúmeras indicações que visavam uma preservação das matas (Guerra *et al.*, 2007).

No entanto, os preceitos estabelecidos na época do império não foram seguidos ao longo dos anos, e nenhum outro tipo de plano de ocupação foi formulado para a cidade. O aumento da área urbana de forma descontrolada e a rápida impermeabilização dos espaços sem considerar medidas compensatórias devido às modificações na bacia, colaborou significativamente para a intensificação de inundações na cidade.

Atualmente, o problema de cheias urbanas constitui um dos principais desafios das cidades. Quando as enchentes se estabelecem de forma recorrente em uma bacia, torna-se necessário analisar o escoamento desde a sua geração inicial até a maneira como este vai acontecer ao longo de toda bacia e no tempo (CIRIA, 2013). Neste sentido, é necessário a elaboração de soluções de cunho sistêmico, adotando a bacia como uma unidade de planejamento a fim de ter um projeto integrado. Portanto, a realização de um mapeamento detalhado das áreas com maior risco de inundação é de grande interesse para embasar as medidas preventivas que minimizam as perdas geradas por este tipo de processo, assim como para simular as possíveis soluções para o local analisado.

Para o desenho de soluções integradas para uma bacia, geralmente, são realizadas simulações de possíveis soluções de forma combinada, onde, frequentemente, são utilizadas ferramentas computacionais. A modelagem matemática é capaz de fornecer respostas sistêmicas para cenários diversos, em um exercício de predição e antecipação de efeitos resultantes de possíveis medidas de projeto (Lou, 2010). Portanto, os modelos matemáticos se tornam fundamentais para a análise do comportamento do sistema de drenagem da bacia perante projetos de controle de cheias e alterações nos padrões de urbanização, visto que atuam de forma distribuída e conseguem combinar os efeitos das medidas propostas no espaço e no tempo (Miguez *et al.*, 2017a).

O histórico do município de Petrópolis, no Rio de Janeiro, indica que desde sua fundação a questão da drenagem e o manejo de suas águas pluviais urbanas é bastante significativa. Por se situar numa região serrana, com relevo acidentado, e com a ocupação urbana ocorrendo nos fundos de vales e encostas a cidade sofre constantemente com inundações na bacia do rio Quitandinha. Nos últimos anos, com o crescimento intenso e desordenado da cidade, verificou-se uma piora substancial no desempenho do rio Quitandinha durante as cheias e, conseqüentemente, um significativo aumento na frequência dos eventos associados a inundações. Neste sentido, o presente trabalho se desenvolve com apoio do modelo hidrodinâmico MODCEL, para determinar manchas de inundação na bacia do rio Quitandinha, no centro da cidade de Petrópolis, a fim de auxiliar simulações de possíveis soluções para esta bacia.

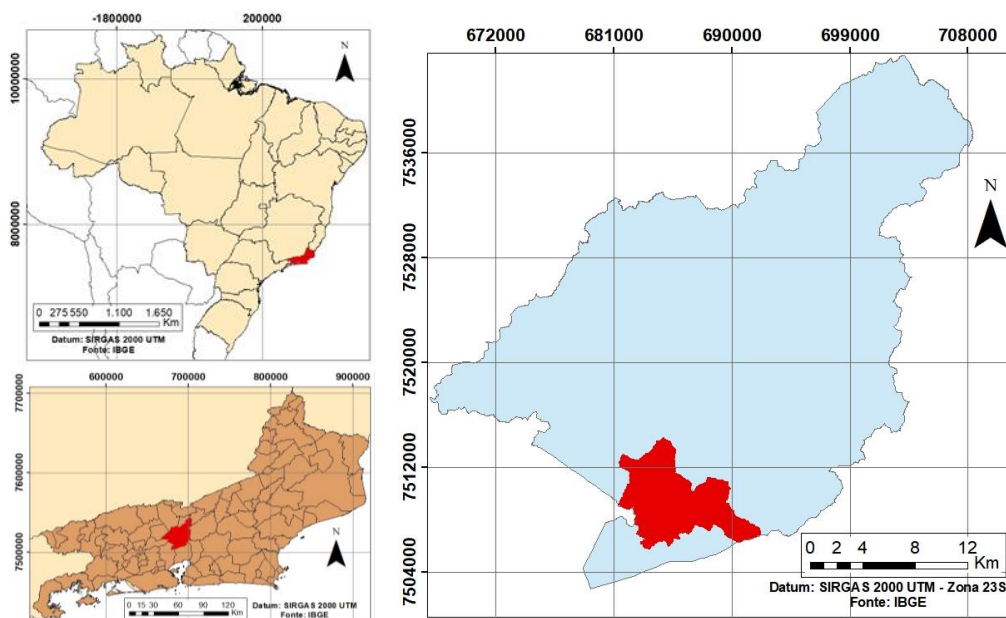
ESTUDO DE CASO

O município de Petrópolis está localizado, aproximadamente, a 60 quilômetros ao norte da cidade do Rio de Janeiro, sobre a Serra do Mar e Serra dos Órgãos, Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. Segundo IBGE (2020), o município de Petrópolis possui, aproximadamente 306.200 habitantes, sendo 95% dos habitantes localizados em áreas urbanas do município.

A principal bacia do centro urbano da cidade de Petrópolis é a bacia do rio Quitandinha, que se encontra localizada na bacia do rio Piabanha, e na sub-bacia do rio Paraíba do Sul. A bacia do rio Quitandinha apresenta alto nível de modificação do uso do solo (Santos, *et al.*, 2019), com regiões residenciais densas e intenso tráfego de veículos ao longo da calha principal do rio e, de maneira dispersa pela bacia, ocorrem áreas residenciais mescladas com vegetação, assim como com afloramentos rochosos, áreas de gramado, vegetação de maior porte e densidade (em maiores altitudes), vias e pequenas localidades com solo exposto. A situação da área da bacia de estudo em

relação ao município de Petrópolis e seus distritos é apresentada na Figura 1. A área de estudo deste trabalho compreende toda a bacia do rio Quitandinha e a parte alta do rio Piabanha, devido a influência de remanso que este exerce sobre o rio Quitandinha.

Figura 1 - Localização da área de estudo no Município de Petrópolis.



Apesar da urbanização da cidade de Petrópolis ter sido revolucionária para a época, o projeto aproveitou os cursos de água da cidade para traçar ruas e avenidas ao longo de suas margens (Rabaço, 1985 *apud* Guerra *et al.*, 2007). Durante este processo, alguns trechos de cursos d'água foram modificados para que as avenidas passassem nos locais desejados. Nestas mudanças, um ponto alarmante foi a alteração dos rios Quitandinha e Palatinato, que passaram a se encontrar de forma frontal, para depois fazerem uma curva de 90° e seguir seu curso na rua da Imperatriz (ou seja, em forma de um "T"). Este trecho modificado, entre a Rua do Imperador e o Palácio de Cristal, ainda possui mais 4 curvas bruscas, sendo duas de noventa graus, e declividade baixíssima, por vezes negativa, o que também dificulta o escoamento e favorece a sedimentação e o acúmulo de resíduos sólidos. Esta configuração ocasiona uma grande perda de carga no escoamento, diminuindo a sua velocidade e podendo acarretar remanso a montante do encontro dos rios. O trecho citado e sua configuração são apresentadas na Figura 2.

Figura 2 - Encontro dos rios Quitandinha e Palatinato no centro da cidade de Petrópolis.

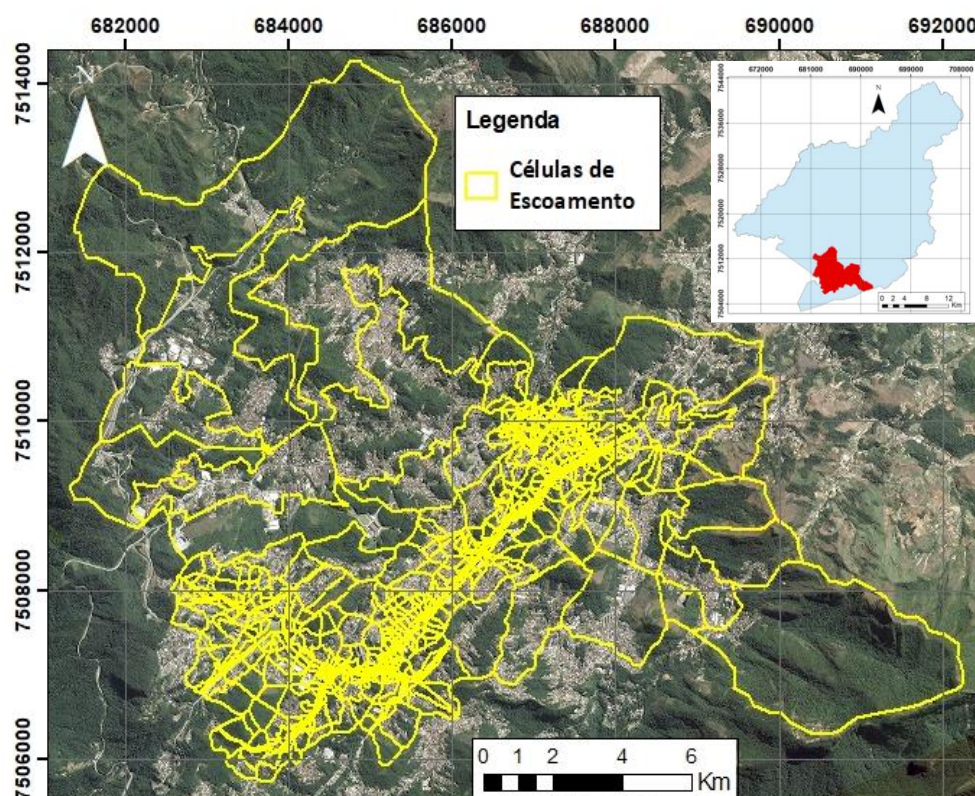


METODOLOGIA

Para a construção das manchas de alagamento da cidade de Petrópolis, foi necessária a utilização de um modelo matemático hidrodinâmico, devido a necessidade de representar dinamicamente os escoamentos nas planícies de inundação, simultaneamente com o funcionamento hidrodinâmico da rede fluvial e a necessidade de interligar rios e canais diversos, de forma integrada. Para cumprir esse objetivo, foi definida como ferramenta de modelagem o Modelo de Células de Escoamento – MODCEL, desenvolvido por Miguez (2001). Este é um modelo Quasi-2D, que tem como princípio a representação do espaço urbano através de compartimentos homogêneos (células de escoamento) que cobrem toda a superfície da bacia, integrando todo o espaço bidimensional. As interações entre as células, porém, são reproduzidas através de ligações representando relações unidimensionais, que formam uma rede bidimensional em loop, com possibilidade de escoamento em várias direções. Esse arranjo, capaz de reproduzir os diversos padrões de escoamento, representa a bacia de forma integrada. Os padrões de escoamento entre essas células podem ser calculados através de leis hidráulicas conhecidas, como, por exemplo, a equação dinâmica de Saint-Venant, completa ou simplificada, a equação de escoamento sobre vertedouros, livre ou afogado, a equação de escoamento através de orifícios, equações de escoamento através de bueiros, entre outras várias (Miguez et al., 2017b).

O processo de modelagem por células de escoamento inicia-se pela análise da região através de levantamentos e plantas topográficas, aerofotogrametria, imagens de satélite e visitas de campo, entre outras fontes de informações disponíveis. Com isso, foi feito um Modelo Digital de Terreno (MDT), que, como apoio de ferramenta SIG, serviu como base para a divisão da bacia em 841 células de escoamento, sendo 90 células de canal, 2 células de galeria, 501 células de planície e 248 células de encosta. A Figura 3 apresenta o domínio da modelagem definido e a representação em células de escoamento da bacia hidrográfica.

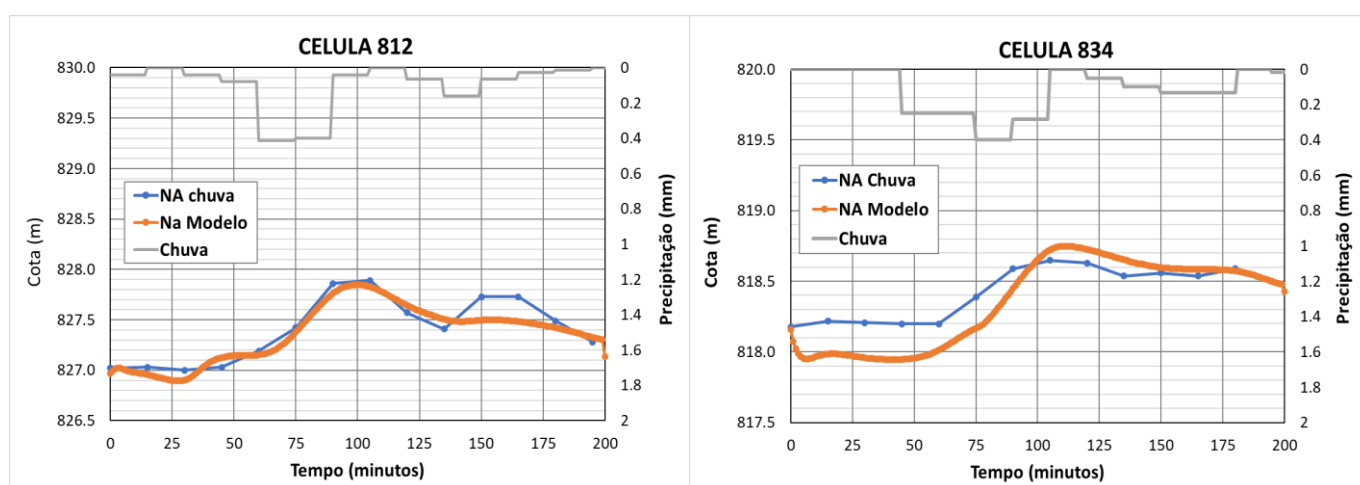
Figura 3 - Divisão da bacia do Rio Quitandinha em células de escoamento.



Após a montagem dos dados de entrada do MODCEL, foi necessário realizar a calibração do modelo. A etapa de calibração do modelo matemático se refere ao processo de ajuste dos parâmetros, dentro de uma faixa de variação aceitável, buscando-se a maior proximidade possível entre os dados que representam a resposta do modelo e a medição do fenômeno físico. Portanto, para esse processo foram realizadas comparações entre as respostas do modelo matemático construído e as medições registradas para as estações de monitoramento do sistema de alerta do INEA (INEA, 2021), existentes para o Rio Quitandinha. Foram analisados os dados da chuva que ocorreu no horário de 19:15 até 22:00 horas no dia 01/04/2021, da estação 2243317, na rua Coronel Veiga, e da estação 2243313, no centro da cidade.

As estações de monitoramento do INEA são correspondentes às células 812 (estação 2243317) e 834 (estação 2243313) do modelo. A calibração do modelo teve como referência o comportamento dessas células, comparado com o observado nas respectivas estações, como apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Calibragem do modelo utilizando os dados pluviométricos e as seções das estações fluviométricas do INEA.



Após a calibração do modelo, foram simuladas chuvas de TR 10, 25 e 50 anos. Essas chuvas foram calculadas com base na curva IDF, elaborada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2016), para o município, como apresentados na Equação 1.

$$i = \frac{2655,6 \times Tr^{0,1644}}{(t_d + 30,6)^{0,8862}} \quad (1)$$

Onde:

i : intensidade da chuva (mm/h);

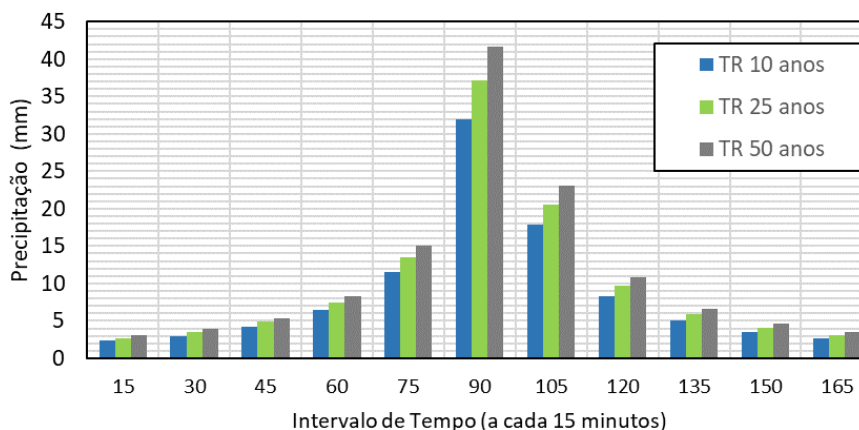
Tr : Período de Retorno (anos);

td : tempo de duração da chuva (min).

Para simularmos uma chuva contribuindo para toda a bacia do Rio Quitandinha, utilizou-se o tempo de duração da chuva igual ao tempo de concentração (T_c) da bacia, de 165 minutos. Foram obtidas chuvas com intensidade de 36,14 mm/h para TR de 10 anos, 42,01 mm/h para TR de 25 anos e 47,08 mm/h para TR de 50 anos. No entanto, como recomendado por Miguez *et al.*, (2016), para as chuvas de projeto foi utilizada a curva de redução ponto-área, recomendado para bacias com área de drenagem superior a 25 Km². Por fim, o hietograma para alimentação do modelo foi calculado com base no total de chuva acumulado para os 165 minutos de T_c da bacia, correspondendo a 97,0 mm para o TR de 10 anos, 112,6 mm para o TR de 25 anos e 126,3 mm para o TR de 50 anos. As chuvas

acumuladas foram distribuídas de forma variável no tempo, utilizando 11 intervalos de 15 minutos, conforme método dos blocos alternados *Bureau of Reclamation*, com auxílio do programa Hidro-Flu (Magalhães *et al.*, 2005). A chuva distribuída no tempo é apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Chuvas de Projeto para TR 10, 25 e 50 anos.



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para as manchas de alagamento para a bacia do Rio Quitandinha, no centro da cidade de Petrópolis, são apresentados, a seguir, separadas pelo TR de simulação.

Os resultados apresentados para a mancha de alagamento considerando vazão de TR igual a 10 anos, observada na Figura 6, apontam que o rio extravasa da calha em alguns pontos. No início do escoamento, logo após o lago do Quitandinha, a lâmina d'água chega a 1,60 m. No início da rua Coronel Veiga, o alagamento fica em torno de 0,60 m, sendo os piores locais a curva onde se encontra o posto de combustível Ipiranga e a curva onde se encontra o posto de combustível Alps, onde o alagamento chega a 1,10 m. Antes do rio Quitandinha entrar no centro da cidade e ter sua calha mais larga, o rio chega a extravasar, alagando 1,70m nas margens. Após o rio Quitandinha entrar no centro e se encontrar com o rio Palatinato, a lâmina de água varia entre 0,60 m e 1,50m ao longo do canal, como apresentado com maior detalhe na Figura 7.

Figura 6 - Mancha de alagamento para chuva com TR de 10 anos.

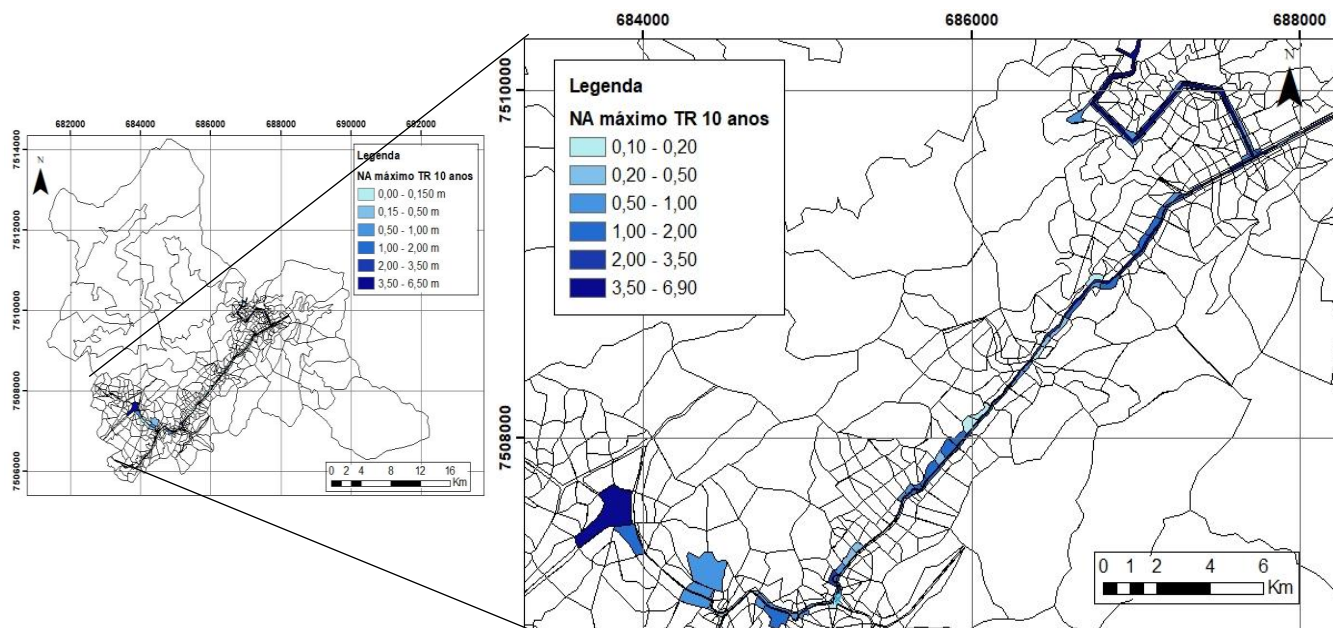
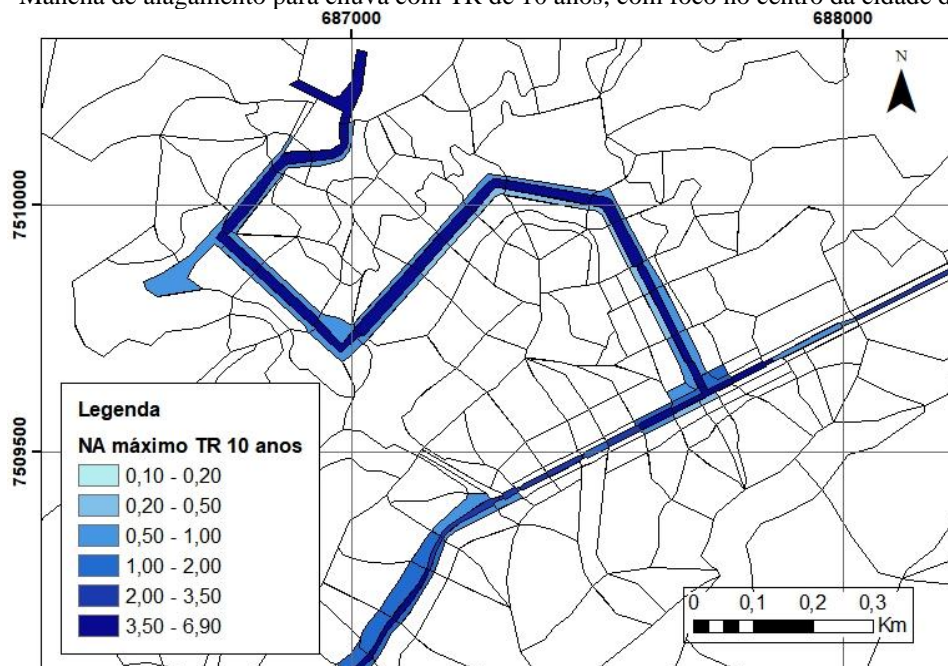


Figura 7 - Mancha de alagamento para chuva com TR de 10 anos, com foco no centro da cidade de Petrópolis.



Nos resultados encontrados para a mancha de alagamento considerando vazão de TR igual a 25 anos, observa-se que os locais de inundação variam pouco em relação ao observado para a mancha com o TR de 10 anos. Este comportamento já era esperado, visto que o rio Quitandinha é um rio montanhoso sem grandes áreas de planícies de inundação, onde possam ocorrer maiores amortecimentos.

A Figura 8 mostra que no início do escoamento, logo após o lago do Quitandinha, a lâmina d'água chega a 1,80 m. No início da rua Coronel Veiga, o alagamento fica em torno de 0,70 m, sendo os piores locais continuam sendo as curvas onde se encontra o posto de combustível Ipiranga e a outra onde se encontra o posto de combustível Alps. O alagamento nestes pontos chega a 1,15 m, próximo do valor encontrado para o TR de 10 anos. Já para o trecho antes do rio Quitandinha entrar no centro da cidade, houve um aumento da lâmina d'água de alagamento, chegando a 1,90m nas margens. Após o rio Quitandinha entrar no centro e se encontrar com o rio Palatinato, a lâmina de água varia entre 0,60 m e 1,70m ao longo do canal, como apresentado em maior escala na Figura 9.

Figura 8 - Mancha de alagamento para chuva com TR de 25 anos.

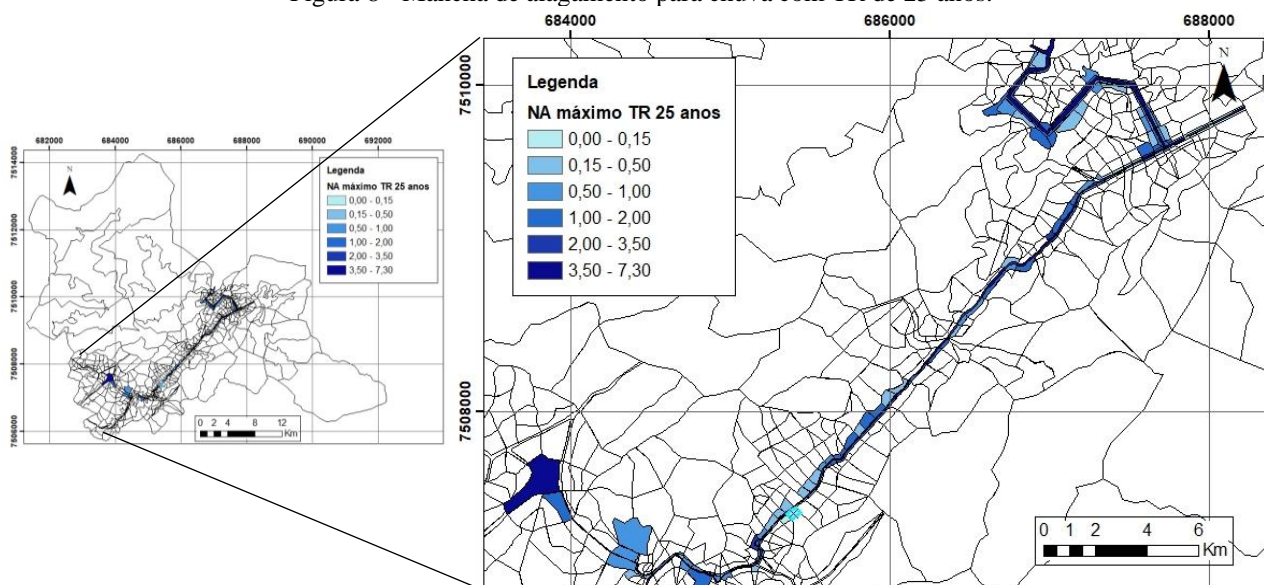
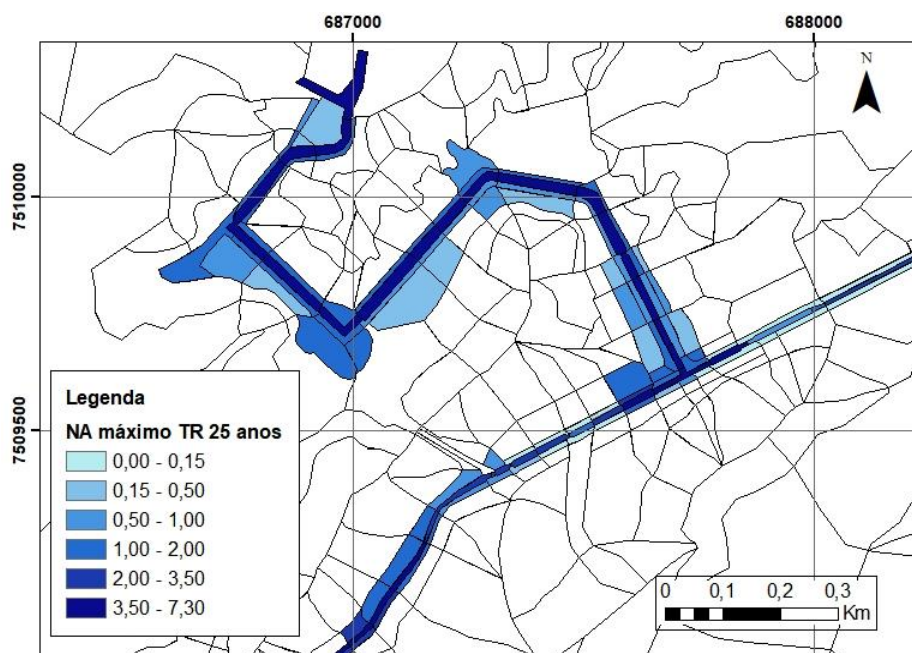


Figura 9 - Mancha de alagamento para chuva com TR de 25 anos, com foco no centro da cidade de Petrópolis.



Nos resultados encontrados para a mancha de alagamento considerando vazão de TR igual a 50 anos, observa-se que o comportamento das células se manteve similar ao observado para os TRs 10 e 25 anos, em termos de abrangência espacial, com variação apenas do NA.

A Figura 10 mostra que no início do escoamento, logo após o lago do Quitandinha, a lâmina d'água chega a 1,95 m. No início da rua Coronel Veiga, o alagamento variou em 0,50m a 1,0 m. As curvas onde se encontra o posto de combustível Ipiranga e a curva do posto de combustível Alps, continuam sendo os piores pontos e a lâmina d'água para esses pontos não teve diferença do encontrado para o TR de 25 anos, chegando a 1,15 m. Já para o trecho antes do rio Quitandinha entrar no centro da cidade, a lâmina d'água de alagamento variou entre 0,80 a 2,00m nas margens. Após o rio Quitandinha entrar no centro e se encontrar com o rio Palatinato, a lâmina de água varia entre 0,80 m e 2,00m ao longo do canal, como apresentado em maior escala na Figura 11.

Figura 10 - Mancha de alagamento para chuva com TR de 50 anos.

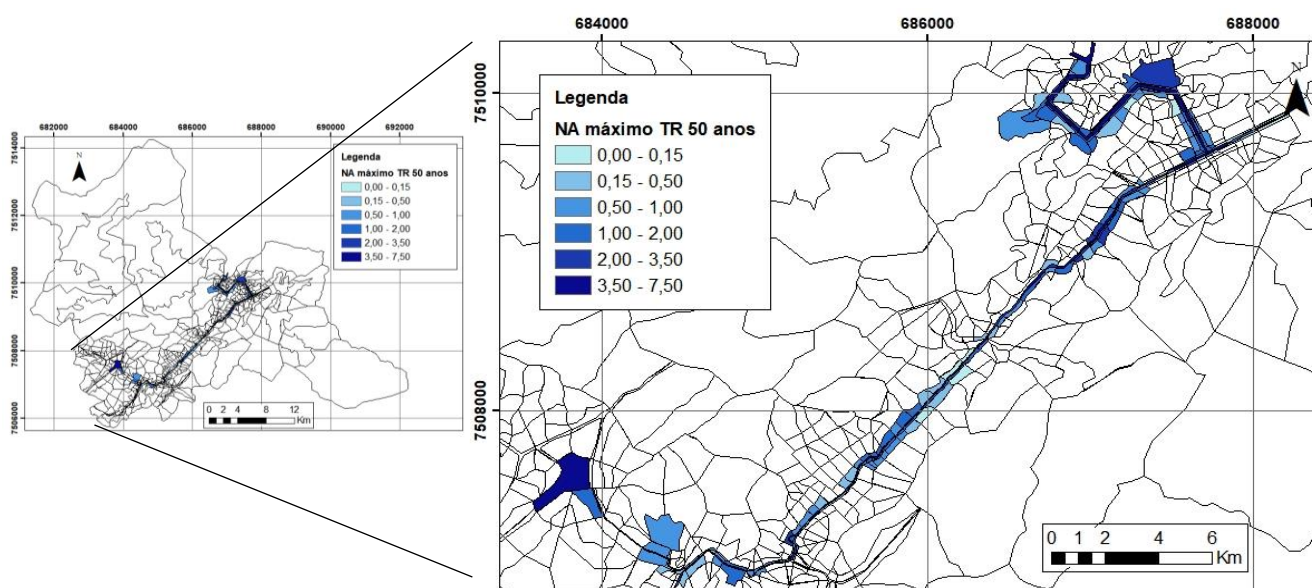
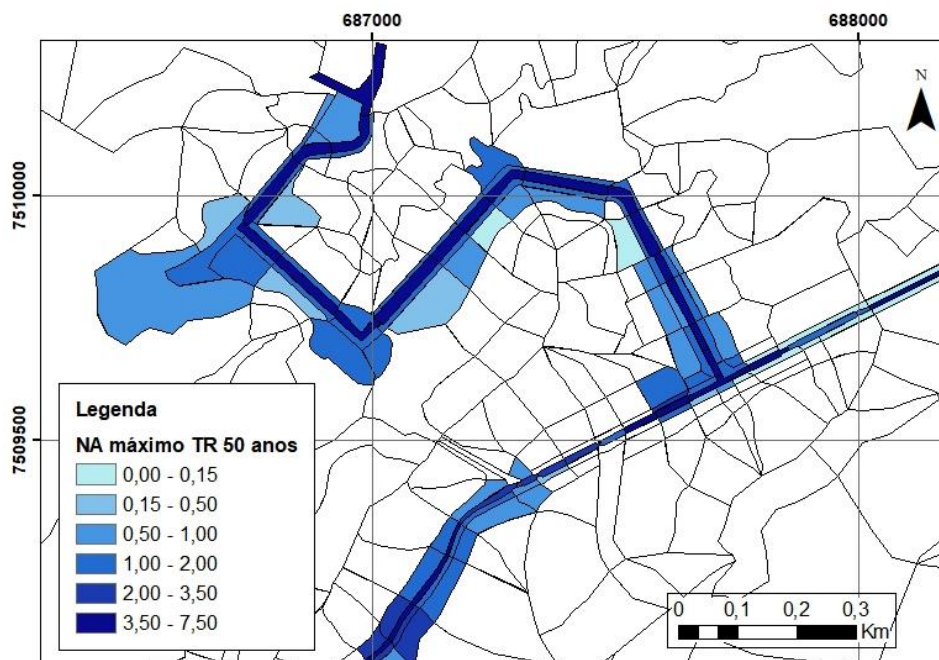


Figura 11 - Mancha de alagamento para chuva com TR de 50 anos, com foco no centro da cidade de Petrópolis.



CONCLUSÕES

Este trabalho procurou reproduzir por meio de um modelo matemático Quasi-2D os alagamentos recorrentes na bacia do rio Quitandinha, em Petrópolis/RJ para vazões correspondentes a chuvas de TR 10, 25 e 50 anos. A partir dos resultados obtidos foi possível determinar qual será a mancha de alagamento de acordo com a chuva ocorrida, o que pode ser útil para o sistema de alerta da Prefeitura. A partir da base de modelagem construída será possível simular diferentes soluções de engenharia para o problema recorrente de enchentes da cidade, estimando os impactos ao longo da bacia para otimização da solução.

REFERÊNCIAS

- CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2016). *Atlas Pluviométrico do Brasil – Equações de intensidade-duração-frequência*. Ministério de Minas e Energia, Brasil. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17557/1/idf_petropolis_rj_suscet.pdf> Acesso em 15 março 2021.
- CIRIA. (2013). *Water Sensitive Urban Design in the UK – Ideas for built environment practitioners*. Publication C723, London.
- GUERRA, A. J. T.; GONÇALVES, L. F. H.; LOPES, P. B. M. (2007). “Evolução Histórico-Geográfica da Ocupação Desordenada e Movimentos de Massa no Município De Petrópolis, nas Últimas Décadas”. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, vol. 8, nº 1, p. 9.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). *Dados do município Petrópolis, Rio de Janeiro, Brasil*. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/petropolis/panorama>> Acesso 10 março 2021.
- INEA, Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro. (2021). *Alerta de Cheias - Dados da Região:*

Piabanha. Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://alertadecheias.inea.rj.gov.br/alertadecheias/piabanha.html#close>>. Acesso em 4 fevereiro 2021.

LOU, R. F. (2010). *Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/110-msc-pt-2010/1539rodrigo-furtado-lou>> Acesso em 05 março 2021.

MAGALHÃES, L.P.C.; MAGALHÃES, P.C.; MASCARENHAS, F.C.; MIGUEZ, M.G.; COLONESE, B.L.; BASTOS, E.T. (2005). *Sistema HIDRO-FLU para apoio a projetos de drenagem*. In Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, 2005.

MIGUEZ, M. G. (2001). *Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas*. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. (2016). *Drenagem Urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade*. Elsevier Editora Ltda, 1ª ed. Rio de Janeiro.

MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; DE SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; GUSMAROLI, G. (2017a). “Urban Flood Simulation Using MODCEL – An Alternative Quasi-2D Conceptual Model”. *Water*, vol 9, no. 6, pp 445.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P. (2017b). “A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design”. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 44 (5), pp. 925-946.

SANTOS, K. S.; ANTUNES, F. S.; FERNANDES, M. C. (2019). *Os Rios, a Cidade e o Mapa como objeto de análise da Dinâmica da Paisagem*. Mercator (Fortaleza), Fortaleza, vol 18. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1984-22012019000100217&lng=en&nrm=iso> Acesso em 30 novembro 2020.