

MODELAGEM HIDROLÓGICA E ESPACIALIZAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS ÀS INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE IGREJINHA, RS

HYDROLOGICAL MODELING AND SPATIALIZATION OF SUSCEPTIBLE AREAS TO FLOODING IN THE IGREJINHA CITY, RS

Laurindo Antonio Guasselli¹, Guilherme Garcia de Oliveira², Renata Pacheco Quevedo¹, João Paulo Brubacher¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil

² Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, RS, Brasil

Correspondência para: João Paulo Brubacher (jp.brubacher@hotmail.com)

doi: 10.12957/geouerj.2016.10984

Recebido em: 12 mai. 2014 | **Aceito em:** 23 jun. 2015



RESUMO

Este estudo teve como objetivo realizar uma modelagem hidrológica aplicada a eventos extremos de precipitação para espacializar as áreas suscetíveis às inundações em Igrejinha, RS, em diferentes tempos de retorno (TRs). O trabalho compreendeu sete etapas: i) determinação das chuvas de projeto; ii) cálculo de parâmetros morfométricos; iii) aplicação de um modelo chuva-vazão nas sub-bacias; iv) aplicação de um modelo hidrológico para a propagação de vazões nos principais rios; v) simulação hidrológica de eventos extremos com TR de 10, 50 e 100 anos, através da conjugação dos dois tipos de modelos utilizados; vi) estimativa da cota atingida em seções transversais do rio Paranhana; vii) espacialização das áreas suscetíveis às inundações em cada TR. Como resultados, pode-se perceber um rápido escoamento das águas nos arroios tributários do rio Paranhana, o que favorece a ocorrência de enxurradas, enquanto que no curso principal do rio o tempo de escoamento é maior, favorecendo o desenvolvimento de uma inundação gradual. No evento com TR de 10 anos o escoamento superficial atinge 1.120 m³/s, enquanto que em uma precipitação com TR de 100 anos, obteve-se um valor de 2.090 m³/s, representando um aumento de 86,6%. Entretanto, quanto à área atingida pelas águas, a diferença entre os eventos com TRs entre 10 e 100 anos foi de apenas 9,4%. Isto acontece devido às características de vale encaixado onde se localiza o município, em que o aumento do escoamento se reflete mais na mudança do nível do rio do que da área inundada.

Palavras-chave: Modelo chuva-vazão; Simulação hidrológica; Geoprocessamento; Mapeamento; Desastres.

ABSTRACT

This paper aims to perform a hydrological modeling and flooding susceptibility spatialization applied to extreme precipitation events in Igrejinha City, RS, for different return periods (RPs). The work included seven stages: i) determination of the rainfall scenarios, ii) calculation of the morphometric parameters, iii) application of a rainfall-runoff model in the basins, iv) applying a hydrological model for the propagation of flows in the main rivers, v) hydrological simulation of extreme events with RP 10, 50 and 100 years, through the combination of the two models used, vi) estimation of reached levels in cross-sections of the river Paranhana, vii) flooding susceptibility spatialization for each RP. It was observed a rapid runoff in small streams that flow into the Paranhana River, which favors the occurrence of flash floods, while in the Paranhana River the runoff time is higher, favoring the development of a gradual flood. In the scenario with 10 years of RP the runoff achieves 1,120 m³/s, while in a rainfall with 100 years of RP, we obtained a value of 2.090 m³/s, representing an increase of 86.6%. However, regarding the area reached by the waters, the difference between scenarios with RPs between 10 and 100 years was only 9.4%. This occurred due to the characteristics of the embedded valley where the city is located, where increase of the flow rate is reflected more in changing river level than the flooded area.

Keywords: Rainfall-runoff modeling; Hydrological simulation; Geoprocessing; Mapping; Disasters.

INTRODUÇÃO

O aumento dos impactos das inundações pode ser explicado, principalmente, pela expansão da ocupação humana em áreas suscetíveis à ocorrência destes fenômenos (KOBİYAMA et al., 2006). A ocupação destas áreas ocorre pela presença de infraestrutura urbana, pela localização e mobilidade, sendo, muitas vezes, impulsionada pela especulação imobiliária. Além disso, a sociedade ocupa estas áreas em virtude de os desastres naturais possuírem uma distribuição irregular no tempo, muitas vezes sem nenhuma ocorrência durante décadas (TUCCI e BERTONI, 2003).

As inundações e enxurradas são originadas por eventos climáticos extremos e constituem-se em fenômenos de ocorrência natural e periódica em todos os ambientes fluviais (CASTRO, 1998; OLIVEIRA, 2010; MARENGO, 2010). Apesar de estes fenômenos ocorrerem naturalmente, diversos estudos (ALCÁNTARA-AYALA, 2002; KOBİYAMA et al., 2004; CRED, 2012; UNESCO, 2012) confirmam o aumento da frequência na qual estes fenômenos causam impactos negativos na sociedade e também o aumento dos prejuízos causados por estes (BRUBACHER et al., 2012).

Com o transcorrer dos anos, entretanto, os investimentos em planejamento e prevenção tornam-se insuficientes em relação à expansão urbana e uma nova inundação pode causar uma destruição superior àquela registrada anteriormente. No vale do rio Paranhana, RS, por exemplo, historicamente são registrados muitos episódios de perdas humanas e materiais em decorrência de inundações bruscas. Nessa região, as inundações frequentemente atingem milhares de moradores nos municípios de Parobé, Taquara, Igrejinha e Três Coroas, cujas áreas urbanas estão predominantemente localizadas nas planícies e terraços fluviais do vale do rio Paranhana.

O episódio ocorrido em junho de 1982, um dos mais severos, provocou algumas mortes, desabrigou centenas de famílias e resultou em sérios impactos na economia da região. Em janeiro de 2010, de acordo com a Defesa Civil do Rio Grande do Sul, as inundações atingiram mais de 57.000 pessoas

nesses quatro municípios, ocasionando perdas humanas, destruição de residências, escolas, indústrias e estradas, e pausa no fornecimento de energia (OLIVEIRA et al., 2012).

Em estudo recente, Oliveira et al. (2013) indicaram que a ocupação urbana em áreas suscetíveis às inundações segue aumentando em Igrejinha. De acordo com o estudo, entre 2005 e 2010, foram identificadas 759 novas construções nas áreas inundáveis do perímetro urbano, sendo 88% de uso residencial. Entretanto, a metodologia utilizada para a identificação da suscetibilidade às inundações envolveu algumas simplificações na modelagem hidrológica, às quais podem interferir na delimitação das áreas inundáveis.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo é realizar a modelagem hidrológica aplicada a eventos extremos de precipitação para espacializar as áreas suscetíveis às inundações no município de Igrejinha, RS, em diferentes tempos de retorno (TRs). O recorte espacial para as etapas relacionadas com a modelagem hidrológica envolve a bacia hidrográfica do rio Paranhana, enquanto que a espacialização das áreas suscetíveis às inundações foi realizada somente no município de Igrejinha.

Os resultados aqui apresentados foram obtidos a partir de um projeto de pesquisa realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em parceria com o Ministério das Cidades, e que resultou também no trabalho de BRUBACHER (2013). O projeto tinha como objetivo elaborar cartas geotécnicas de aptidão à urbanização no município de Igrejinha - RS, fornecendo subsídios para que o Plano Diretor Municipal e os projetos de parcelamento do solo incorporem diretrizes voltadas para a prevenção dos desastres naturais associados a deslizamentos de encostas, enxurradas, corridas de massas, inundações bruscas e graduais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho compreendeu a extração de parâmetros físicos da bacia do rio Paranhana, seguida de uma modelagem hidrológica envolvendo os processos de transformação da chuva em vazão e de propagação da onda de cheia, para a espacialização das inundações em Igrejinha.

O trabalho foi subdividido em quatro etapas: i) geração das chuvas de projeto com base em uma equação do tipo i-d-f (intensidade, duração, frequência) ajustada para a bacia do Paranhana; ii) extração de variáveis morfométricas e cálculo de parâmetros para a modelagem hidrológica; iii) simulação hidrológica de eventos extremos com recorrência (TR) de 10, 50 e 100 anos, através da conjugação de dois modelos hidrológicos, um modelo chuva-vazão, da Soil Conservation Service (SCS, 1975), nas sub-bacias que compõem a área de abrangência, e um modelo de propagação da onda de cheia, Muskingum-Cunge, aplicado nos principais rios; iv) espacialização das áreas suscetíveis às inundações, em Igrejinha, para cada TR, a partir da estimativa da cota atingida em diversas seções transversais do rio Paranhana com base na resposta hidrológica obtida através das simulações e nos perfis topográficos oriundos de dados altimétricos.

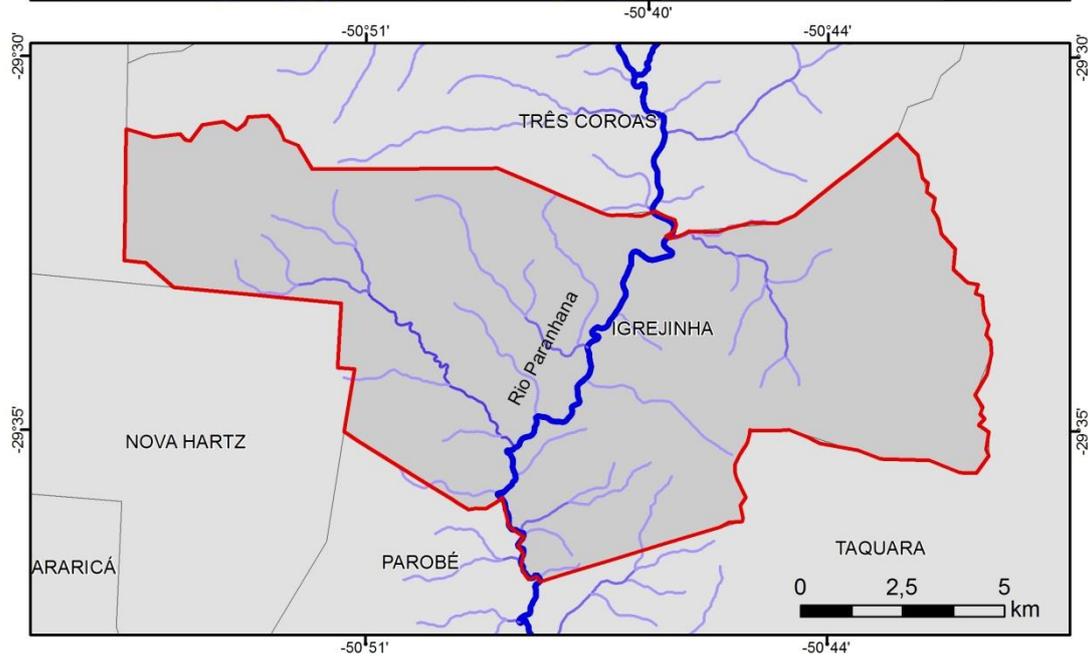
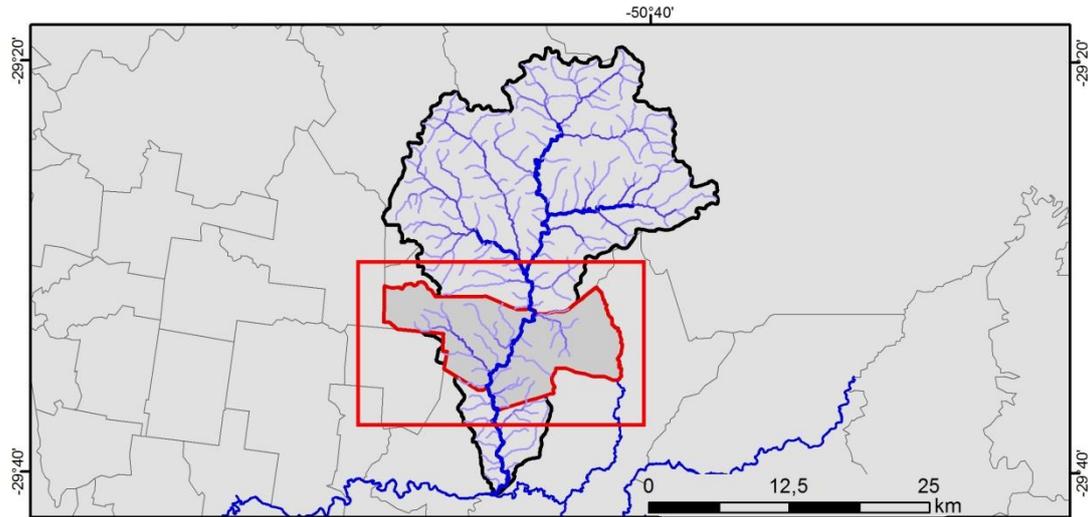
Descrição da Área de Estudo

O município de Igrejinha possui uma população de 31.663 habitantes (IBGE, 2010), com toda a sua mancha urbana e quase totalidade de sua área (105,7 km²) dentro da bacia hidrográfica do rio Paranhana (Figura 1). A bacia do rio Paranhana possui uma área de 577,22 km² (BRUBACHER et al., 2011).

A altitude do município de Igrejinha varia entre 22 e 773 metros acima do nível médio dos oceanos. Essa amplitude altimétrica evidencia uma importante característica no que se refere à drenagem das águas nas nascentes do rio Paranhana. Quando a quantidade de chuva é elevada, as águas do rio podem adquirir grande velocidade de escoamento, possibilitando a ocorrência de enxurradas.

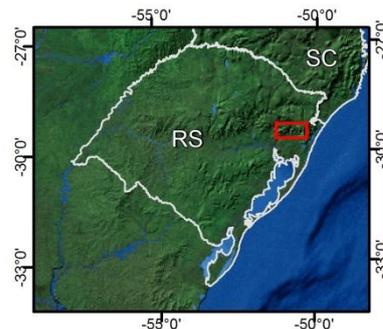
De acordo com o sistema de classificação de Köppen, o município de Igrejinha apresenta um clima subtropical úmido com verão quente (Cfa). Nas áreas mais elevadas da bacia do rio Paranhana, nas cabeceiras de drenagem na porção norte da bacia, o clima é subtropical úmido com verão temperado (Cfb). Considerando a classificação climática realizada por Rossato (2011), o município de Igrejinha se encontra inserido no clima Subtropical IVb, caracterizado por chuvas anuais bem distribuídas, com

130-150 dias de chuva por ano. A temperatura média anual varia entre 14 e 17°C. A temperatura média do mês mais frio oscila entre 8°C e 14°C e a temperatura média do mês mais quente varia entre 17 e 23°C. É uma das regiões com o conjunto de médias de temperaturas mais baixo do Rio Grande do Sul.



Legenda

-  Bacia Hidrográfica rio Paranhana
-  Igrejinha
-  Hidrografia
-  Limites Estaduais
-  Limites Municipais



Sistema de Projeção Geográfica
 DATUM SIRGAS 2000
 FUSO 22 SUL

Figura 1. Localização do Município de Igrejinha em relação a bacia hidrográfica do rio Paranhana - RS (BRUBACHER. 2013).

Com base em uma série temporal de dados de precipitação, entre 1940 e 2001, Brubacher et al. (2012) concluem que a bacia do rio Paranhana apresenta uma precipitação anual próxima de 1.650 mm por ano. Ao longo do ano, o período entre junho e outubro é o mais chuvoso, sendo o mês de setembro o de maior média de chuvas (166 mm). Esse período é marcado por chuvas frontais de longa duração, vindas do sul, típicas dos meses mais frios. Entre os meses de outubro e março chove menos, mas as chuvas são de ocorrências mais localizadas e torrenciais, acumulando uma grande quantidade de precipitação em pouco tempo.

Geração dos Hietogramas de Projeto

A primeira etapa consistiu na geração de hietogramas de projeto associados a TRs de 10, 50 e 100 anos, a partir de uma equação do tipo i-d-f, ajustada para a bacia do rio Paranhana. De acordo com Bertoni e Tucci (2007), o hietograma de projeto consiste em uma sequência de precipitações que desencadeia uma cheia de projeto.

As equações do tipo i-d-f são mundialmente utilizadas para determinação de totais pluviométricos em eventos extremos. Neste tipo de equação, a variável intensidade (i) é uma função da duração da chuva (d) e da frequência (f), esta última relacionada ao TR. Em locais onde não estão disponíveis séries pluviográficas consistentes, pode-se adotar uma equação i-d-f de um local próximo. Também pode-se determinar uma equação a partir de dados pluviométricos, utilizando o método das relações de durações, que toma como referência a relação i-d-f de um posto localizado nas proximidades do local de interesse (BERTONI e TUCCI, 2007).

Os dados de precipitação utilizados nesse trabalho foram obtidos no portal HIDROWEB, da Agência Nacional de Águas, no website <http://hidroweb.ana.gov.br/>, no período entre 1940 e 2011. A partir da metodologia apresentada em Brubacher et al. (2012) e Oliveira et al. (2012), foi realizada a interpolação espacial das chuvas diárias de todas as estações pluviométricas disponíveis em um raio de

até 100 km da bacia do rio Paranhana, totalizando 84 postos pluviométricos. O método utilizado foi o do inverso da distância ao quadrado.

Em seguida, foi extraída uma série de precipitação média diária para a área de influência do rio Paranhana, a partir da qual foi possível estimar, através do ajuste da distribuição de probabilidades de valores extremos Gumbel (GUMBEL, 1958), o valor da precipitação máxima diária referente aos TRs de 10, 50 e 100 anos. Para extrapolar os valores de precipitação máxima para menores durações de chuva foi utilizado o método das relações de durações com referência ao pluviógrafo localizado em Caxias do Sul. Com isso, ajustou-se uma equação do tipo i-d-f para a bacia do Paranhana (Equação 1).

$$i = \frac{1093,6 TR^{0,1604}}{(d + 19,802)^{0,782}} \quad (1)$$

Onde: i é a intensidade da precipitação em mm/h; TR é o tempo de retorno em anos; d é a duração do evento de precipitação em minutos.

Para a geração do hietograma de projeto, foi utilizado o método de Chicago, proposto por Keifer e Chu (1957). Neste trabalho, a duração (d) do evento de precipitação foi considerada como igual ao tempo de concentração (tc) da bacia do rio Paranhana, com discretização temporal de 5 minutos (Δt). A posição do pico (λ) foi definida como $0,5d$, isto é, ocorrendo na metade da duração da chuva. Para a estimativa do tempo de concentração (Equação 2), foi utilizado o método de Kirpich (KIRPICH, 1940), que necessita de apenas dois parâmetros de entrada, facilmente extraídos a partir de dados altimétricos, sendo desenvolvida para bacias de pequeno e médio porte.

$$tc = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (2)$$

Onde: tc é o tempo de concentração em minutos; L é o comprimento do rio principal em km; H é o desnível altimétrico em metros.

Extração de Parâmetros para Modelagem Hidrológica

A segunda etapa compreendeu a escolha da representação mais adequada para a bacia hidrográfica do rio Paranhana para a modelagem hidrológica, seguida da extração dos parâmetros de entrada dos modelos. A representação teve como referência os dados altimétricos obtidos pela missão *Shuttle*

Radar Topographic Mission (SRTM), modelo digital de elevação com resolução espacial de 90 metros, obtidos pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), disponibilizados no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA) e interpolado para uma resolução espacial de 30 metros (VALERIANO, 2005; VALERIANO, 2008).

Esta etapa, portanto, consistiu na subdivisão da bacia do rio Paranhana em sub-bacias e no fracionamento do rio principal (rio Paranhana) em segmentos de drenagem menores. O modelo hidrológico chuva-vazão aplicado às sub-bacias é do tipo concentrado, isto é, oferece resultados de vazão somente na saída das sub-bacias. A bacia do Paranhana foi dividida em 32 sub-bacias, sendo 13 de montante e 19 de contribuição lateral (Figura 2).

Já nos segmentos (trechos) de drenagem, um modelo de propagação da onda de cheia foi utilizado, buscando estimar a vazão e a cota de pico, de entrada e de saída, no trecho. Ao todo, foram delimitados 19 segmentos de drenagem, tendo como referência a base vetorial da rede de drenagem da bacia do rio Paranhana (HASENACK e WEBER, 2010), na escala 1:50.000, referente à cartografia da Divisão de Serviços Geográficos do Exército (DSG), conforme observado no esquema da Figura 3.

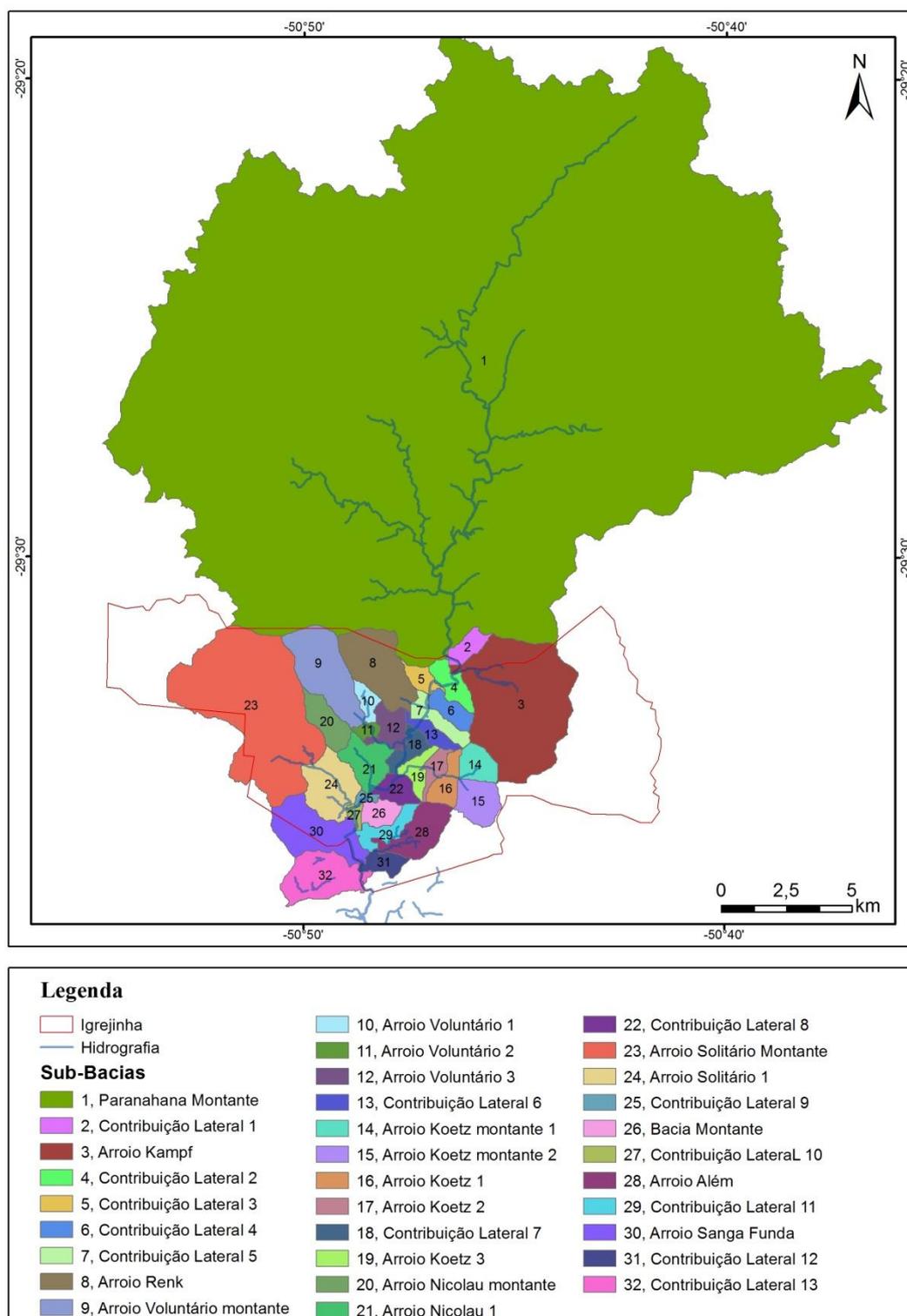


Figura 2. Subdivisão da bacia do rio Paranhana com ênfase nas inundações no município de Igrejinha - RS (BRUBACHER, 2013).

Uma vez delimitadas as sub-bacias e os segmentos de drenagem, foram estimados os parâmetros físicos destas feições. No módulo de sub-bacias, o modelo chuva-vazão utilizado foi o SCS. Este modelo

necessita dos seguintes parâmetros para a simulação: área de drenagem (A); comprimento do rio principal (L); desnível altimétrico (H); tempo de concentração (t_c); *Curve Number* (CN).

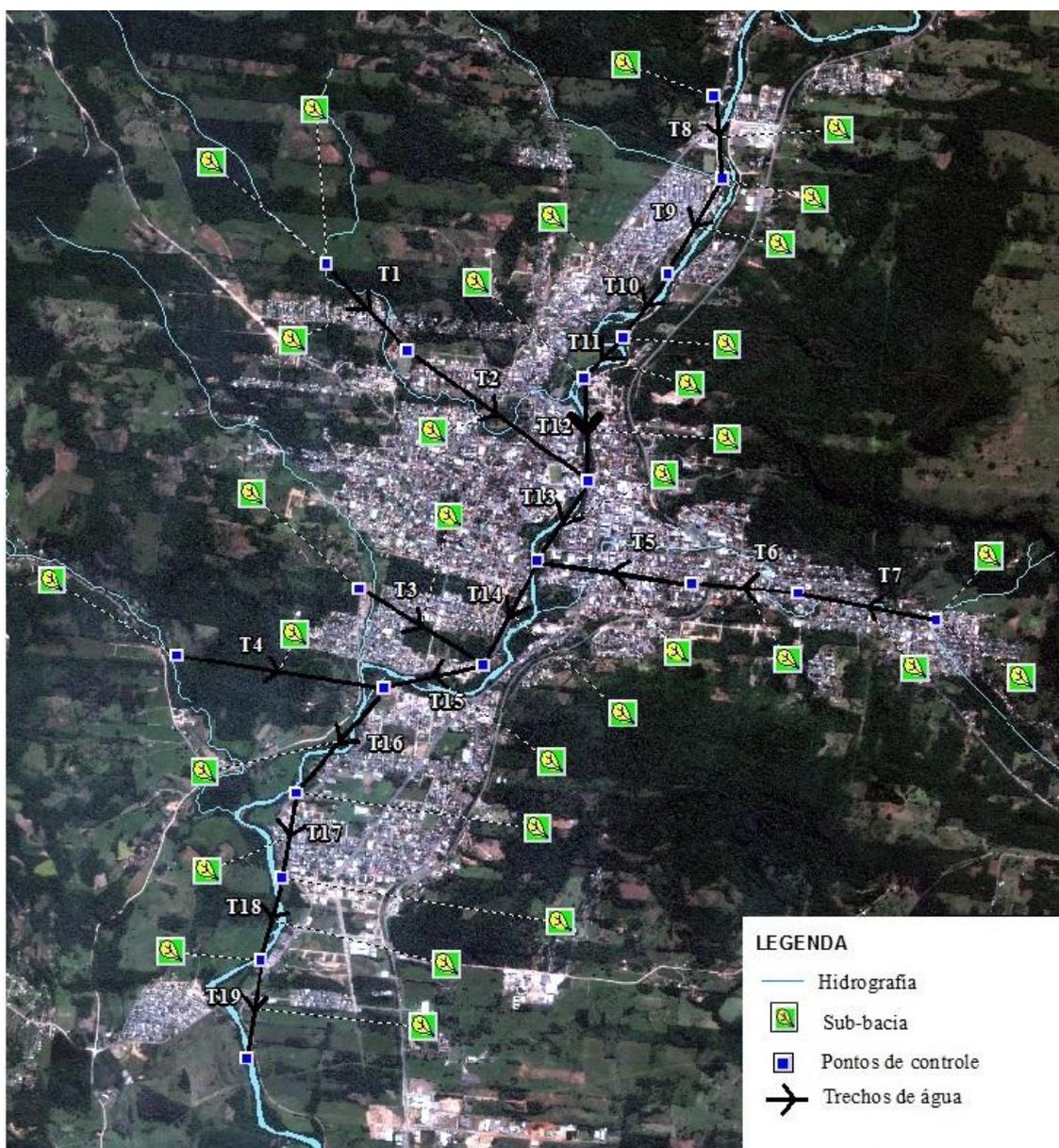


Figura 3. Representação esquemática da drenagem da bacia do Paranhana para a modelagem hidrológica.

Os quatro primeiros parâmetros foram obtidos a partir de informações morfométricas extraídas a partir dos dados SRTM-TOPODATA. O último parâmetro, o CN, foi obtido através do cruzamento entre o uso e ocupação do solo, gerado através da imagem orbital Landsat 5 (TM), e o tipo de solo, obtido a partir das cartas de solo, na escala 1:250.000, folhas SH-22-V-D e SH-22-X-C, elaboradas pelo IBGE. O cálculo do CN resulta em um coeficiente que varia de 1 a 100, desde coberturas

altamente permeáveis até coberturas totalmente impermeáveis, e foi tabelado por SCS (1975). Além da publicação original, tabelas traduzidas com valores de CN para áreas urbanas ou áreas agrícolas podem ser encontradas em Tucci (1998; 2007). Este índice é fundamental no modelo, pois define o armazenamento de água no solo (TUCCI, 1998), influenciando diretamente nas perdas iniciais por infiltração, o que resulta na precipitação efetiva que gera o escoamento superficial.

A partir do módulo dos segmentos de drenagem foram estimados os seguintes parâmetros, correspondente ao modelo Muskingum-Cunge: extensão do canal/rio (EXT); cota do canal à montante (CtM); cota do canal à jusante (CtJ); profundidade do canal (Z); largura média do canal (B); coeficiente de rugosidade de Manning (n); altura da planície de inundação (Z1); largura média da planície de inundação (B1); coeficiente de rugosidade da planície de inundação (n1). As variáveis EXT e B foram obtidas a partir da vetorização sobre uma imagem orbital de alta resolução espacial, do satélite QuickBird, de 13 de abril de 2009, fornecidas pela Prefeitura Municipal de Igrejinha. Os valores de CtM, CtJ, Z1 e B1 foram calculados a partir dos dados altimétricos SRTM e das curvas de nível com equidistância de 1 metro, disponibilizada pela Prefeitura Municipal de Igrejinha, somente na área urbana de Igrejinha. O coeficiente de rugosidade foi definido de acordo com os estudos de Porto (1998) e Cirilo et al. (2001). Para a calha dos rios foi adotado um coeficiente de rugosidade igual a 0,045 (rios e córregos com meandros, bancos e poços) e para as planícies de inundação o valor foi de 0,07 (margens espaiadas, com pouca vegetação, em condição regular).

Simulação Hidrológica

A terceira etapa consistiu na simulação hidrológica de três eventos extremos aplicados à bacia hidrográfica do rio Paranhana. O modelo do tipo chuva-vazão utilizado foi o SCS, apresentado pelo *Soil Conservation Service* (SCS, 1975). Trata-se de um modelo hidrológico concentrado, específico para a transformação da precipitação em vazão nas sub-bacias da área de estudo, gerando, na foz de cada uma delas, um hidrograma de saída. De acordo com Tucci (1998), este método é muito utilizado para a simulação de hidrogramas de cheias de projeto de obras hidráulicas e para a determinação das áreas inundáveis em decorrência de fortes chuvas. São exemplos de trabalhos que utilizaram o método

SCS: Moraes et al. (2012), que tinha como objetivo a verificação da interferência do uso da terra nas inundações urbanas; Moruzzi et al. (2009), que utilizou o método SCS para avaliação de escoamento superficial em área de expansão urbana e Damé et al. (2010), que comparou hidrogramas de projeto resultantes dos hietogramas estimados pelas relações Intensidade-Duração-Frequência (IDF).

O modelo SCS realiza a transformação da chuva em vazão na saída das sub-bacias, com base em uma equação empírica que calcula as perdas por evapotranspiração e por infiltração, utilizando um parâmetro (CN) definido pelo cruzamento entre o uso e cobertura do solo e os tipos de solo (Equações 3 e 4). A propagação superficial do volume gerado pela separação do escoamento é realizada através de um hidrograma unitário sintético triangular. As Equações 5 e 6 determinam a vazão máxima e o tempo de pico.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} \quad (3)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

$$q = \frac{2,08 \cdot A}{\frac{D}{2} + t_p} \quad (5)$$

$$t_p = \frac{2,6 L^{0,8} \cdot \left(\frac{S}{25,4} + 1\right)^{0,7}}{1900 \cdot y^{0,5}} \quad (6)$$

Onde: Q é o volume superficial acumulado em mm; P é a precipitação total acumulada em mm; I_a são as perdas iniciais, estimado em $0,2S$; S é o armazenamento do solo; q é a vazão máxima em m^3/s ; A é a área de drenagem em km^2 ; D é o intervalo de tempo em horas; t_p é o tempo de pico em horas; L é o comprimento hidráulico em m; y é a declividade em porcentagem.

Para a propagação da vazão nos trechos de rio foi utilizado o modelo Muskingum-Cunge. O modelo Muskingum, desenvolvido por McCarthy (1938), é um modelo de escoamento em rios do tipo armazenamento. Estes modelos utilizam a equação da continuidade concentrada (Equação 7) e uma relação entre o armazenamento (S) e a vazão de saída e entrada do trecho, para simular o escoamento no rio (TUCCI, 1998).

$$\frac{dS_t}{dt} = I_t - Q_t + Q_t \quad (7)$$

Onde: I_t é o hidrograma de entrada; Q_t é o hidrograma de saída; Q_l é a contribuição lateral de todo o segmento de rio.

O modelo Muskingum-Cunge é uma adaptação do modelo Muskingum com a estimativa de parâmetros proposta por Cunge (1969), transformando-o em um modelo de difusão. A modificação do hidrograma, em função do deslocamento à jusante, se deve à variação das seções do rio (morfologia) e dos efeitos das forças dinâmicas envolvidas (TUCCI, 1998). A solução numérica do modelo Muskingum produz um amortecimento numérico artificial devido a sua discretização.

A simulação hidrológica, para TRs de 10, 50 e 100 anos, foi realizada no software IPHS1 (TUCCI et al., 1989). Este software foi desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul e pela Universidade Federal de Pelotas. Consiste em um sistema computacional que utiliza a Metodologia de Modelagem Orientada a Objetos aplicada a Sistemas de Recursos Hídricos, apresentada por Viegas Filho (2000).

Nesse sistema, foi inserida a representação das sub-bacias e dos segmentos de rio e os parâmetros de entrada dos dois modelos hidrológicos utilizados (SCS e Muskingum-Cunge). No IPHS1, os dois modelos são executados em conjunto. Os hidrogramas de saída das sub-bacias, calculados pelo método SCS, tornam-se a entrada dos trechos de rio e a propagação entre os trechos de rio é modelada pelo método Muskingum-Cunge. Deste modo, em cada trecho de rio também é gerado um hidrograma de saída, incluindo informações sobre a velocidade de propagação da onda de cheia.

Espacialização das Áreas Suscetíveis às Inundações

Através da modelagem hidrológica foram obtidos os valores de vazão (Q) e de velocidade de escoamento (v), em função do tempo (t). A partir destas informações, é possível calcular a área da seção transversal "molhada" (A_s) a partir da Equação 8.

$$A_s = \frac{Q_t}{v_t} \quad (8)$$

Sabendo-se a área molhada da seção transversal, a cota atingida (C) pode ser obtida através do perfil das seções transversais. Para cada trecho de rio foi gerado um perfil transversal com base nas informações altimétricas da Prefeitura de Igrejinha (equidistância vertical das curvas de 1 metro) e da missão SRTM (apenas em locais sem dados de alta resolução espacial).

Em seguida, foi realizado o mapeamento das áreas inundáveis nos três cenários simulados (TRs de 10, 50 e 100 anos). A espacialização foi realizada no software ArcGIS 9.3, através de ferramentas de edição vetorial.

Uma vez conhecida a cota atingida em cada um dos 19 trechos de rio modelados, fez-se uma interpolação espacial entre os pontos com cotas conhecidas. Assim, foi possível delimitar de modo contínuo as áreas de inundação nos eventos extremos de precipitação, com TRs de 10, 50 e 100 anos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Características da Precipitação de Projeto

Conforme a descrição realizada no item referente aos materiais e métodos, foram gerados três hietogramas de projeto para precipitações extremas com recorrência de 10, 50 e 100 anos, considerando uma duração de seis horas (tempo de concentração da bacia). A Figura 4 apresenta um gráfico com os três hietogramas sobrepostos.

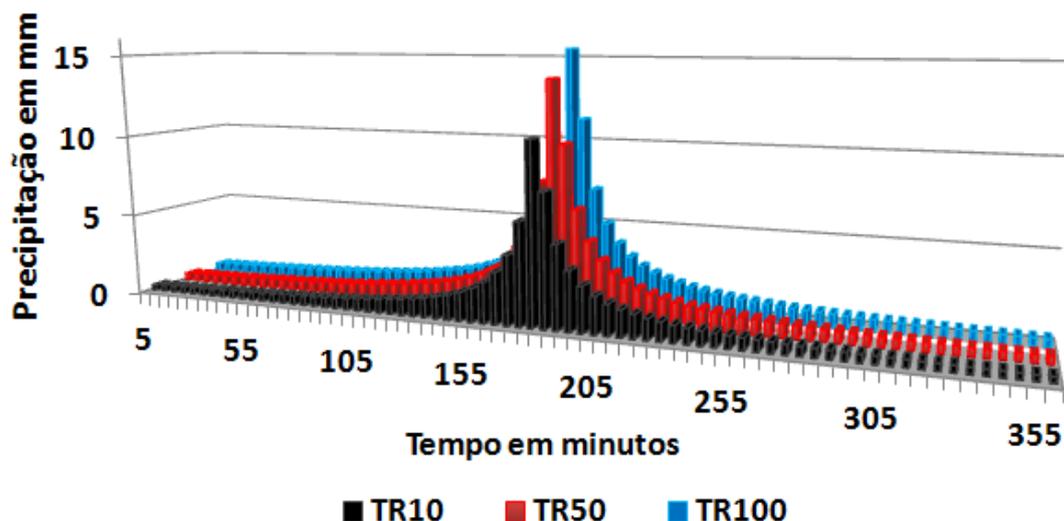


Figura 4. Hietogramas de projeto para a bacia do rio Paranhana, TRs de 10, 50 e 100 anos.

No primeiro evento simulado, referente às cheias que ocorrem mais frequentemente (a cada dez anos), a lâmina total precipitada foi de 91,2 mm em apenas seis horas de duração, o que indica uma intensidade média de 15,2 mm/h durante o evento. Este valor foi obtido com base na equação i-d-f calibrada para a região de estudo (Equação 1).

A discretização temporal (Δt) adotada nos hietogramas de projeto foi de cinco minutos, assim a cada intervalo de tempo tem-se um bloco de chuva (Figura 4). O bloco com maior lâmina precipitada ocorreu no meio do evento (posição do pico: 0,5d), com 10,7 mm precipitados em apenas cinco minutos, perfazendo uma intensidade de 128,4 mm/h neste intervalo de tempo.

No segundo evento, com TR de 50 anos, a lâmina total precipitada foi de 118,1 mm em seis horas de duração, indicando uma intensidade média de 19,7 mm/h durante o evento. O bloco com maior lâmina precipitada ocorreu no meio do evento, com 13,9 mm precipitados em apenas cinco minutos, ou seja, com intensidade de 166,8 mm/h.

No último evento, com TR de 100 anos, a lâmina total precipitada foi de 132 mm, perfazendo uma intensidade média de 22 mm/h durante o evento. O bloco com maior lâmina precipitada ocorreu no meio do evento, com 15,5 mm precipitados em apenas cinco minutos, o que indica uma intensidade de

185,9 mm/h neste intervalo de tempo. Nos 30 minutos de maior intensidade da precipitação obteve-se uma lâmina total acumulada de 53,9 mm.

Parâmetros físicos das sub-bacias

Com base na divisão da bacia do rio Paranhana em 32 sub-bacias (Figura 2), foram extraídas as seguintes informações: área (A), desnível altimétrico (H), Curva Número (CN) e comprimento do rio principal (L). Essas informações podem ser observadas na Tabela 1. Entre os dados apresentados, fica evidente a grande área de contribuição de montante (428 km²), referente à sub-bacia 1 (Paranhana Montante). Entre as outras sub-bacias, destacam-se o Arroio Kampf, com 18,06 km² e o arroio Solitário montante, com 22,96 km². Em relação ao desnível altimétrico, a sub-bacia do arroio Solitário montante apresenta 630 m, o que é um forte indicativo da ocorrência de enxurradas. O CN variou entre 76,4 (Sub-bacia 30) e 88,6 (Sub-bacia 25).

A tabela 2 apresenta os parâmetros dos 19 trechos de rios utilizados (conforme Figura 3), com as informações referentes a extensão dos trechos de rios (EXT), Cotas de montante (CtM), Cotas de jusante (CtJ), Profundidade do canal (Z), Largura Média do canal (B) e Largura Média da planície de inundação (B1).

Os trechos de rio T1 a T7 representam os principais cursos de água que deságuam no curso principal do rio Paranhana, alterando diretamente os gráficos de vazão nos pontos posteriores. Esses trechos se destacam pelo alto desnível altimétrico (calculado pela diferença entre as cotas de montante e jusante), o que faz com que a vazão aumente em curto período de tempo.

Sub-bacias	A (km ²)	H (m)	CN	L (m)
1, Paranhana Montante	428,54	835	79,8	32779
2, Contribuição Lateral 1	1,24	190	79,3	1918
3, Arroio Kampf	18,06	273	79,3	7048
4, Contribuição Lateral 2	1,65	198	82,3	1908
5, Contribuição Lateral 3	1,01	119	80,1	1858
6, Contribuição Lateral 4	1,40	136	79,4	1485
7, Contribuição Lateral 5	1,62	287	80,7	2445
8, Arroio Renk	5,88	219	79,8	4151
9, Arroio Voluntário montante	6,29	438	80,1	4789
10, Arroio Voluntário 1	0,93	56	81,6	1404
11, Arroio Voluntário 2	0,51	48	79,4	892
12, Arroio Voluntário 3	1,78	61	81,7	2058
13, Contribuição Lateral 6	1,12	247	79,4	3291
14, Arroio Koetz montante 1	1,76	222	81,3	1602
15, Arroio Koetz montante 2	2,49	213	80,7	2046
16, Arroio Koetz 1	1,65	86	77,8	696
17, Arroio Koetz 2	0,99	75	81,7	972
18, Contribuição Lateral 7	1,30	7	85,7	2453
19, Arroio Koetz 3	1,22	105	84,6	1877
20, Arroio Nicolau montante	2,24	166	80,8	2439
21, Arroio Nicolau 1	2,73	8	84,3	2130
22, Contribuição Lateral 8	1,49	132	82,9	2021
23, Arroio Solitário Montante	22,96	630	79,3	6727
24, Arroio Solitário 1	4,24	22	79,2	1334
25, Contribuição Lateral 9	0,33	3	88,6	714
26, Bacia Montante	1,30	27	84,4	1749
27, Contribuição Lateral 10	0,41	1	87,4	268
28, Arroio Além	3,34	193	78,4	3184
29, Contribuição Lateral 11	1,64	104	79,6	3443
30, Arroio Sanga Funda	5,52	76	76,4	3956
31, Contribuição Lateral 12	1,20	27	79,1	1814
32, Contribuição Lateral 13	4,71	43	78,1	3460

Tabela 1. Parâmetros das sub-bacias do Paranhana.

Trecho de rio	EXT (m)	CtM (m)	Ctj (m)	Z (m)	B (m)	B1 (m)
1	1129	80	47	3	11,4	731
2	1400	47	39	3	4,2	1712
3	2104	63	33	3	1,4	914
4	2912	45	31	3	1,7	903
5	1192	41	35	3	1,2	995
6	1052	56	41	3	1,5	441
7	764	73	56	3	1,8	312
8	1055	47	45	4	40,7	572
9	1355	45	43	4	51,9	1078
10	1449	43	40	4	39,1	885
11	556	40	39	4	35,4	1237
12	1448	39	38	4	31,9	1084
13	1509	38	35	4	33,4	1780
14	1418	35	32	4	36,4	1505
15	1311	32	31	4	33,6	1938
16	724	31	30	4	34,9	1505
17	1885	30	29	4	43,6	2494
18	840	29	27	4	60,7	2038
19	752	27	26	4	47	2065

Tabela 2. Parâmetros dos trechos de rio.

Hidrogramas

Na divisão dos trechos utilizados para a elaboração dos hidrogramas de projeto, foram gerados 19 trechos de rio, numa sequência de 1 a 19, conforme a Figura 3. A sequência de trechos de 1 a 4 está localizada nas sub-bacias que abastecem o curso principal do rio Paranhana na sua margem direita. Os trechos 1 e 2 referem-se ao Arroio Renk, o Trecho 3 ao Arroio Voluntário e o Trecho 4 ao Arroio Solitário. A sequência de trechos 5, 6 e 7 refere-se ao Arroio Koetz, localizado à margem esquerda do rio Paranhana. Os trechos de 8 a 19 estão todos localizados no curso principal do rio Paranhana e foram definidos de acordo com o aporte das sub-bacias de montante e sub-bacias laterais.

Na porção a montante do rio Paranhana, no limite norte do município de Igrejinha, o pico do escoamento superficial no evento com TR de 100 anos é muito superior ao gerado pela precipitação de mesma duração, com frequência de 10 anos (Figura 5). No evento de maior frequência, o escoamento

superficial não chega a atingir $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que para uma precipitação com TR de 100 anos, os valores superam $2.100 \text{ m}^3/\text{s}$.

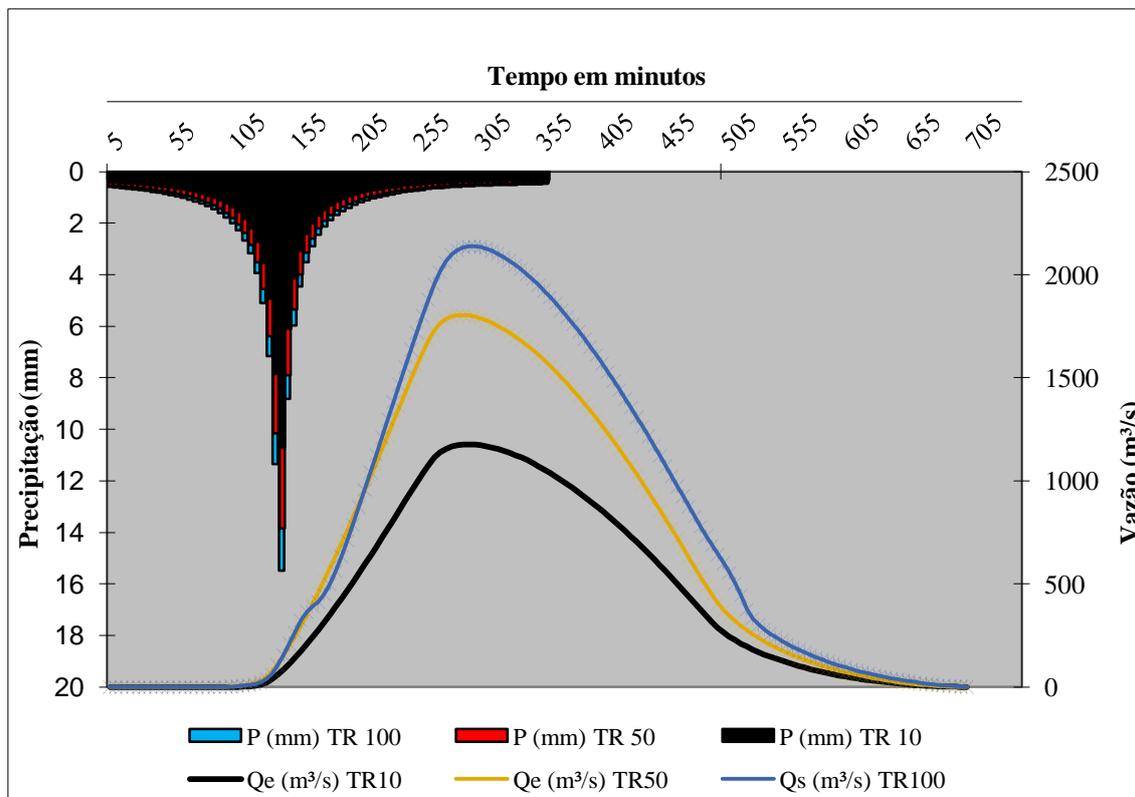


Figura 5. Hidrogramas do rio Paranhana, porção norte de Igrejinha, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos.

Além disto, como pode ser observado na Figura 5, o pico do escoamento superficial e, conseqüentemente, das cheias no Paranhana neste local, ocorre cerca de cinco horas após o início da chuva, isto é, apenas duas horas após o pico da precipitação. Isto implica em dificuldades adicionais no que se refere à remoção da população residente em áreas suscetíveis, pois o tempo de antecedência para qualquer ação é bastante restrito. Porém, por outro lado, em poucas horas (aproximadamente seis horas após o término das chuvas) ocorre o fim do escoamento superficial, indicando que o escoamento apresenta também uma rápida recessão.

Na porção central de Igrejinha, mais a jusante no rio Paranhana, o pico do escoamento superficial no evento com TR de 100 anos ocorre cerca de 20 minutos após o término da precipitação, com valores que atingem $2.090 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 6). Neste evento, a ascensão do hidrograma é bem mais rápida do que nos eventos de menor magnitude. No evento de maior frequência (TR de 10 anos), o escoamento

superficial atinge $1.120 \text{ m}^3/\text{s}$, com pico de cheia ocorrendo mais de uma hora após o término da precipitação.

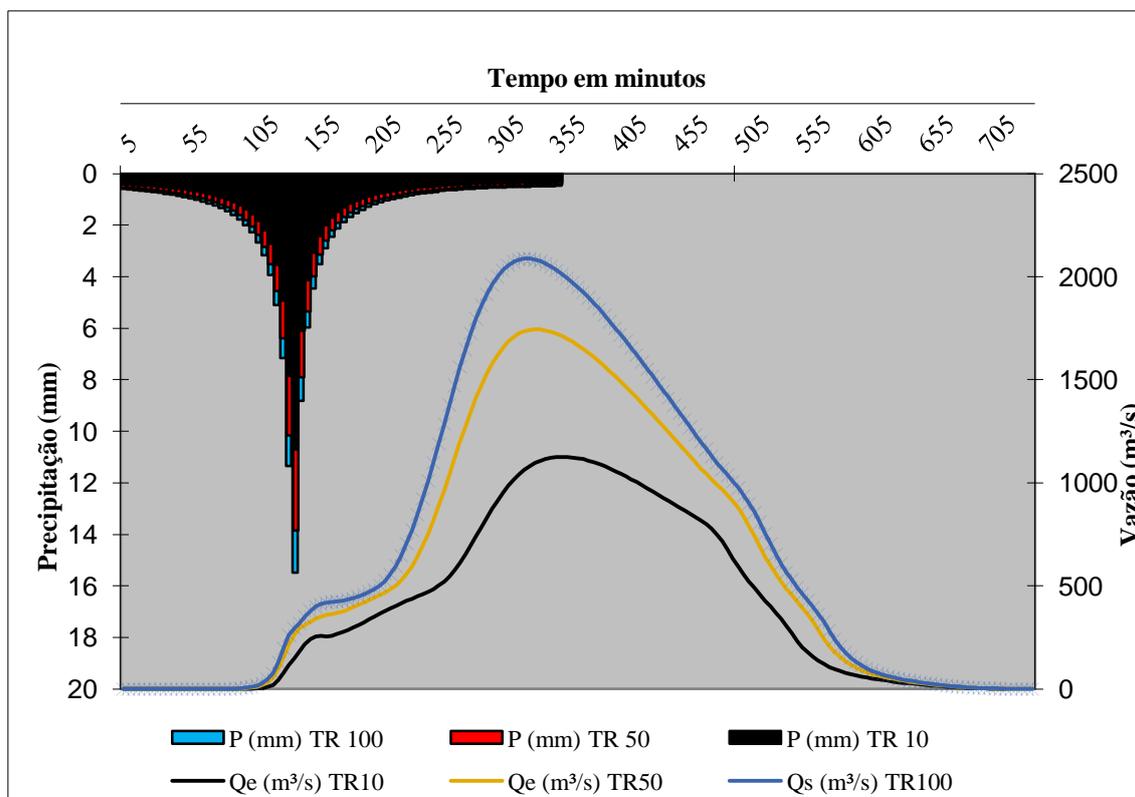


Figura 6. Hidrogramas do rio Paranhana, porção central de Igrejinha, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos.

Na foz do arroio Koetz, um dos principais afluentes do rio Paranhana, o pico do escoamento superficial nos três eventos extremos de precipitação simulados acontece quase simultaneamente ao pico das chuvas. Isto ocorre por se tratar de uma sub-bacia de baixo tempo de concentração, com pequena área e grande desnível altimétrico do rio principal. Assim, nesta localidade, ações de remoção da população possivelmente atingida por algum evento são ainda mais difíceis, pois o tempo de resposta é muito curto.

O pico do escoamento superficial atinge, considerando os TRs de 10, 50 e 100 anos, $80 \text{ m}^3/\text{s}$, $123 \text{ m}^3/\text{s}$ e $149 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. O fim do escoamento superficial ocorre pouco mais de uma hora após o término da precipitação. A Figura 7 ilustra os três hidrogramas deste ponto.

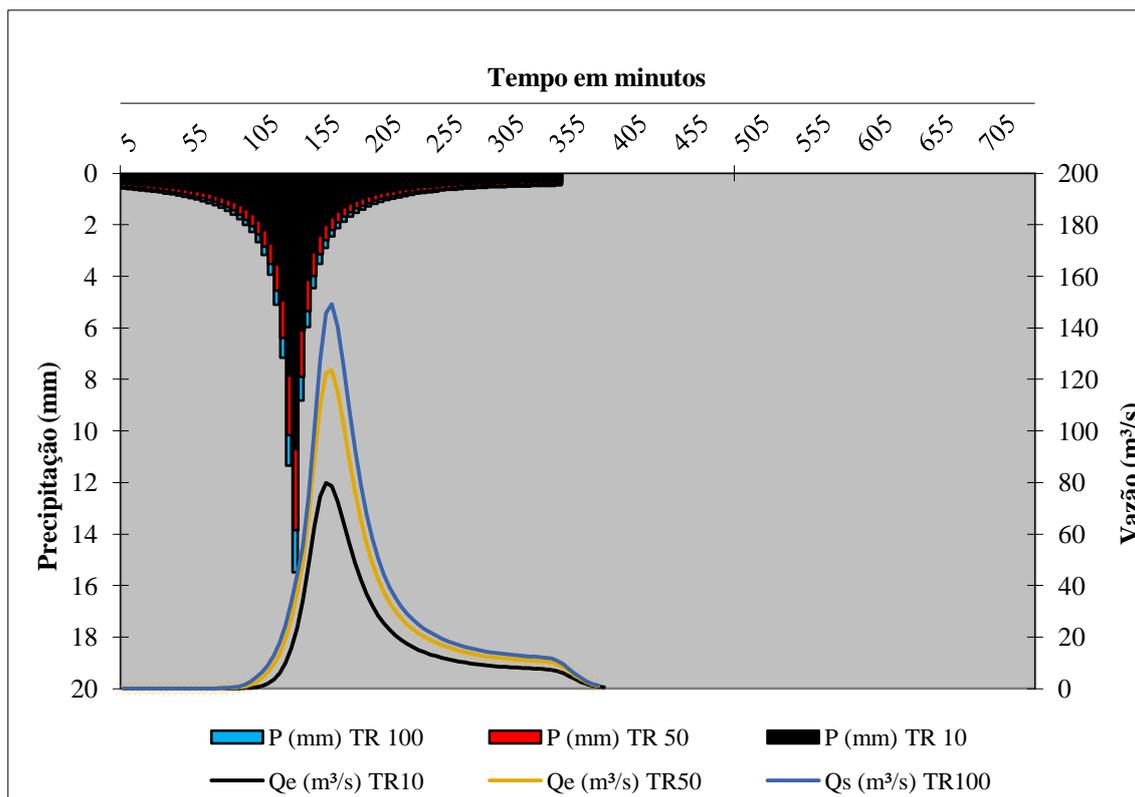


Figura 7. Hidrogramas da foz do arroio Koetz, na porção central de Igrejinha, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos.

Já na foz do arroio Solitário, outro importante afluente do rio Paranhana, o pico do escoamento superficial nos três eventos extremos de precipitação simulados acontece pouco mais de 30 minutos após o pico da precipitação, indicando também uma rápida resposta hidrológica (Figura 8). O pico do escoamento superficial, considerando os TRs de 10, 50 e 100 anos, foi de 186 m³/s, 289 m³/s e 347 m³/s, respectivamente. O fim do escoamento superficial ocorre duas horas após o término da precipitação.

Por fim, no limite sul do município de Igrejinha, porção mais a jusante do rio Paranhana, o pico do escoamento superficial no evento com TR de 10 anos apresenta um atraso significativo, aproximadamente cinco horas após o término da precipitação, com valor de 990 m³/s. Além disto, a ascensão do hidrograma se dá de modo mais lento e gradual (Figura 9).

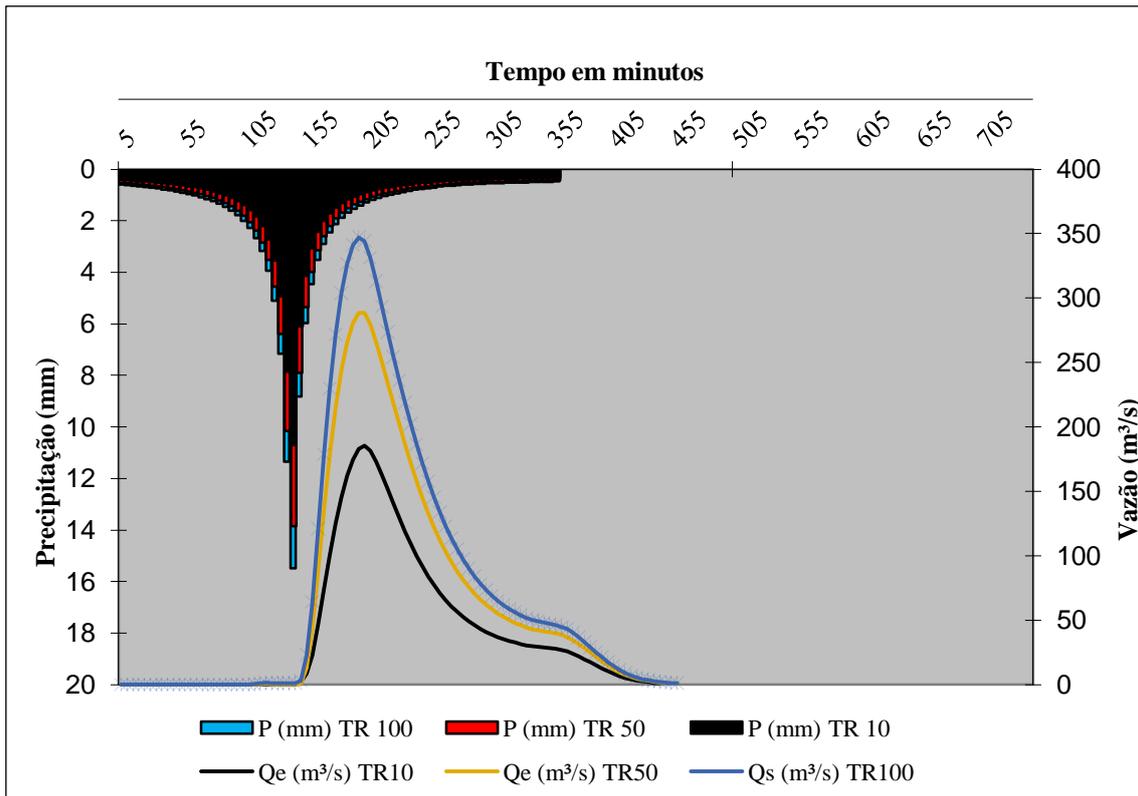


Figura 8. Hidrogramas da foz do arroio Solitário, na porção sul do município de Igrejinha, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos.

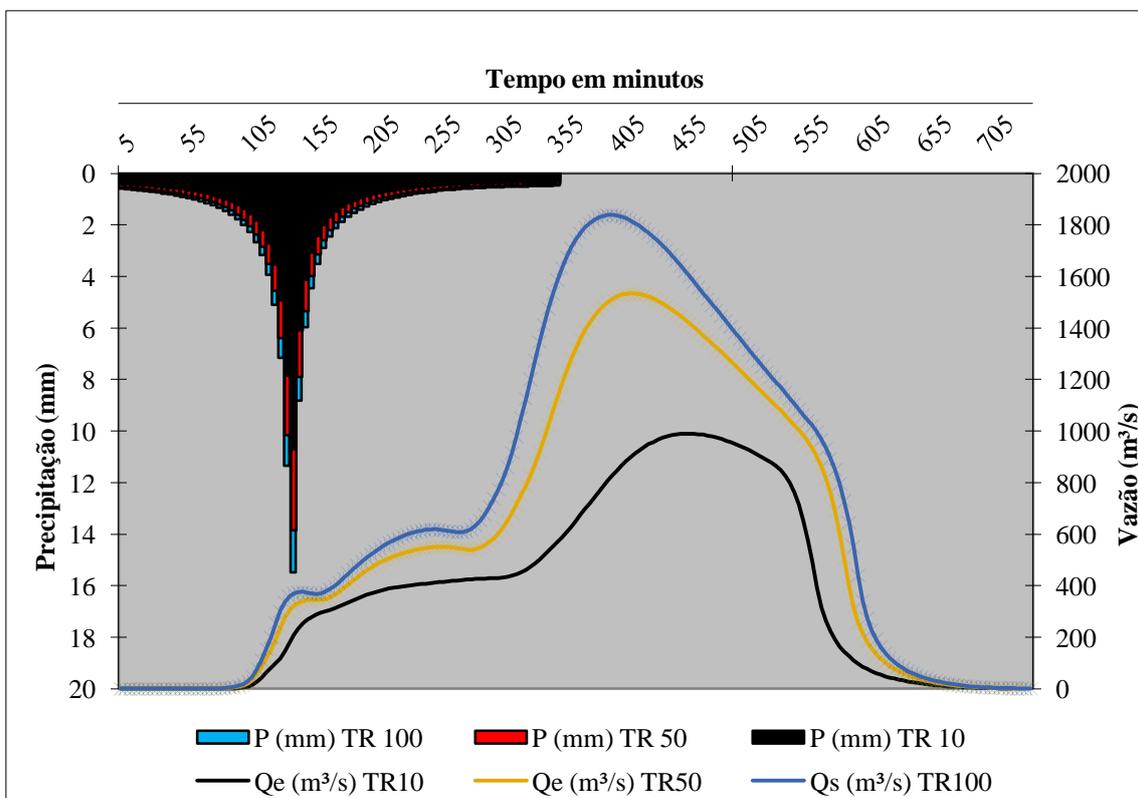


Figura 9. Hidrogramas do rio Paranhana, no limite do município de Igrejinha ao sul, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos.

No evento de precipitação com recorrência de 50 anos, o pico do escoamento superficial ocorre quatro horas após o término da precipitação, com valor de $1.530 \text{ m}^3/\text{s}$. Já no evento com TR de 100 anos, a ascensão do hidrograma ocorre do modo mais rápido, com pico apenas três horas após o término da precipitação e escoamento superficial de $1.840 \text{ m}^3/\text{s}$ no ápice da cheia (Figura 9).

Os hidrogramas sugerem as diferenças da dinâmica de escoamento entre os trechos relativos aos afluentes do rio Paranhana e os trechos relativos ao curso principal. O curto período de tempo entre o pico das chuvas e o pico de vazão nos trechos de contribuição do Paranhana, conforme exemplificado por meio dos hidrogramas dos arroios Koetz e Solitário (Figuras 7 e 8), demonstram a grande possibilidade de ocorrência de enxurradas. Nos outros hidrogramas, referentes ao rio Paranhana (Figuras 5, 6 e 9), o tempo de escoamento é superior, assim como o tempo entre o pico da precipitação e o pico de vazão, propiciando uma elevação mais gradual do nível das águas.

Espacialização das Áreas Suscetíveis às Inundações

Neste item são apresentados os principais resultados obtidos quanto à modelagem hidrológica e ao mapeamento das áreas suscetíveis às inundações, considerando os hietogramas e hidrogramas de projeto apresentados anteriormente, com TRs de 10, 50 e 100 anos.

A Figura 10 apresenta as áreas suscetíveis às inundações do rio Paranhana e seus principais afluentes, com recorrência entre 10 e 100 anos. As áreas atingidas somente em eventos com recorrência entre 50 e 100 anos foram definidas como de baixa suscetibilidade. As áreas de média suscetibilidade são aquelas atingidas pelas inundações com TR entre 10 e 50 anos. Já as áreas inundadas com recorrência inferior a 10 anos foram definidas como de alta suscetibilidade.

A primeira consideração refere-se ao fato de haver pouca diferença entre as manchas de inundação referentes aos TRs de 10 e de 100 anos. Isso se deve às características morfométricas do vale do rio Paranhana, que apresenta vales bastante encaixados, o que faz com que uma precipitação com

recorrência de 10 anos já provoque uma cheia com magnitude suficiente para que as águas atinjam os limites da planície de inundação. Assim, mesmo aumentando a vazão de pico em um cenário de chuva mais crítica (TR de 100 anos), a área inundada não se eleva consideravelmente.

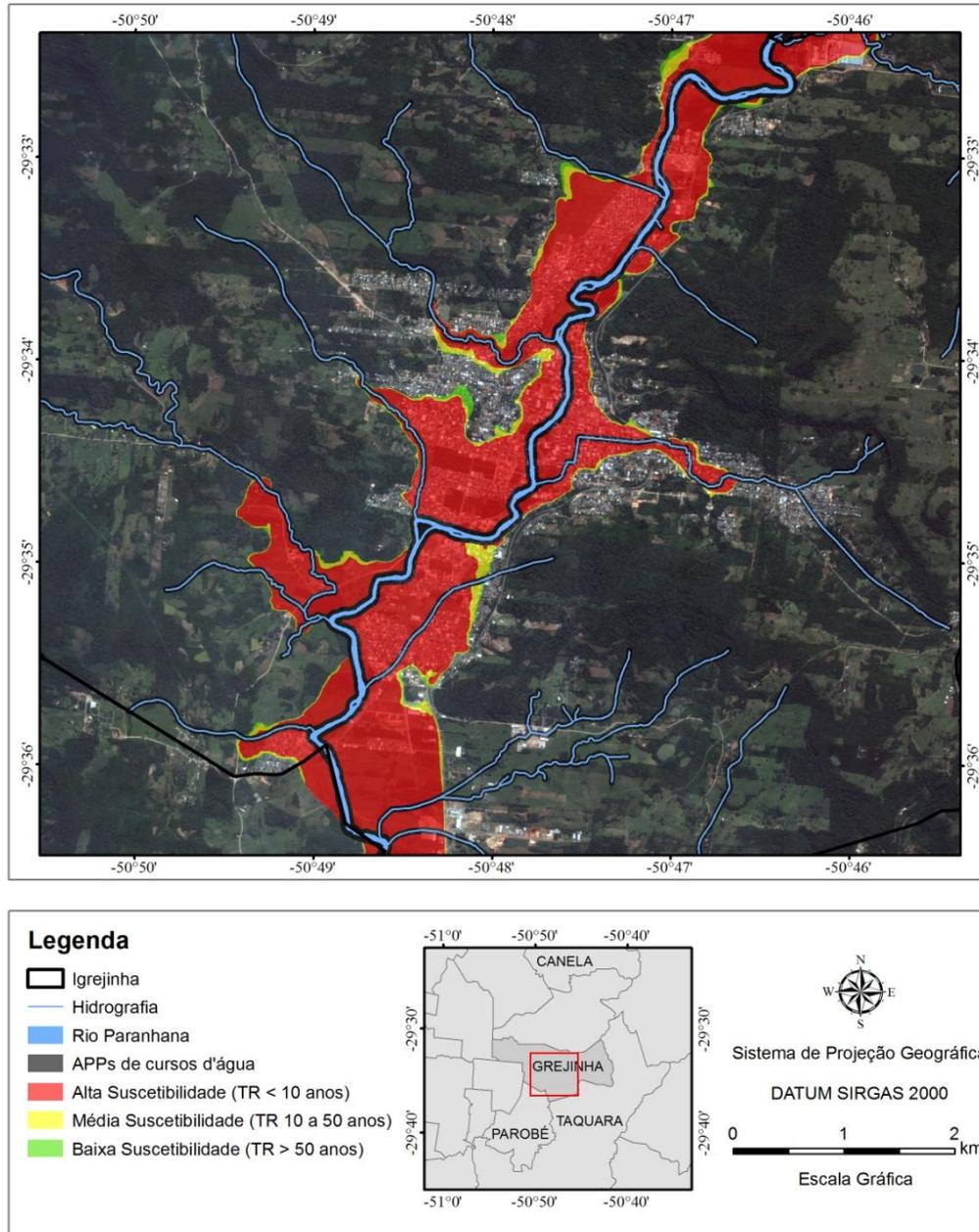


Figura 10. Espacialização das áreas suscetíveis às inundações em Igrejinha, RS, no vale do rio Paranhana (BRUBACHER, 2013).

Essa constatação pode ser comprovada com o cálculo de área atingidas pelas águas. Para um evento de precipitação com TR de 10 anos, a área do município de Igrejinha atingida pelas cheias é de 1.010 hectares. No caso mais extremo simulado, com TR de 100 anos, esta área cresce para 1.105 hectares,

um aumento de 9,4% na mancha de inundação na área municipal. No evento intermediário, com TR de 50 anos, a área inundada é de 1.072 hectares.

Embora a área inundada não apresente grande variação, o nível do rio Paranhana apresenta, em média, uma diferença de 0,9 metros entre os eventos com TRs entre 10 e 100 anos. A cota média da lâmina d'água sobre a cidade de Igrejinha em um evento com TR de 10 anos é de 0,7 metros, enquanto que em um cenário mais extremo (TR de 100 anos) é de 1,6 metros.

Esses valores são superiores aos encontrados por Oliveira et al. (2012). No respectivo trabalho, os autores obtiveram uma mancha de inundação de 598 ha, considerando uma chuva de projeto com TR de 50 anos. No entanto, a metodologia utilizada na ocasião simulou um evento de precipitação com duração de 24 horas, com o pico da chuva ocorrendo no intervalo de tempo referente a 12 horas. Além disso, no estudo anterior, não estavam disponíveis dados altimétricos de alta resolução espacial, o que comprometeu a delimitação das áreas inundáveis na área central de Igrejinha. Deste modo, pode-se afirmar que no presente estudo obteve-se uma mancha de inundação com maior refinamento dos limites atingidos em virtude do detalhamento altimétrico e da maior subdivisão das sub-bacias e trechos de rio, o que promoveu uma melhora da representação espacial das características morfométricas relacionadas à hidrologia. Isso foi comprovado em atividades de campo, nas quais foi possível validar algumas áreas limítrofes com base em relatos de moradores e em contato com autoridades competentes, como a Defesa Civil.

CONCLUSÕES

A definição da mancha de inundação, a partir da modelagem hidrológica, permitiu identificar que grande parte da área urbana da cidade de Igrejinha se encontra em uma área suscetível a inundações e com alto perigo de recorrência. Dessa forma, a espacialização dessas áreas suscetíveis torna-se uma ferramenta importante para uma atuação mais eficiente da Defesa Civil.

A partir da análise dos hidrogramas e do comportamento da lâmina de água nos segmentos de drenagem, foi possível perceber o rápido escoamento das águas nos trechos de contribuição ao rio Paranhana, favorecendo a ocorrência de enxurradas. Já no curso principal do rio, o tempo de escoamento superficial é maior, o que acompanhado do elevado volume de água, é um dos responsáveis pela grande mancha de inundação.

A pequena diferença das áreas de inundação entre os TR 10, 50 e 100 anos está associada às características geomorfológicas do vale do rio Paranhana. Destaca-se que, por se tratar de um vale encaixado, mesmo em um evento com tempo de recorrência relativamente pequeno, grande parte da área urbana de Igrejinha já é atingida pelas inundações.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Ministério das Cidades pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa. Ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) e ao Centro de Estudos e Pesquisas em desastres (CEPED) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela infraestrutura indispensável à realização do projeto.

REFERÊNCIAS

ALCÁNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazard, vulnerability and prevention of natural disasters developing countries. *Geomorphology*, v. 47, p. 107-124, 2002.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ANRH, 2007. Cap. 5, p. 177-242.

BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. **Suscetibilidade de enchentes a partir da análise das variáveis morfométricas na bacia hidrográfica do rio dos Sinos/RS**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1863-1870. 1 DVD. ISBN: 978-85-17-00057-7.

BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. **Identificação e análise de eventos extremos de precipitação na bacia hidrográfica do rio dos Sinos/RS**. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE DESASTRES NATURAIS, 1., 2012, Rio Claro. Anais... 2012. p. 1-10, CD-ROM.

- BRUBACHER, J.P. **Análise da suscetibilidade a inundações, na área urbana do município de Igrejinha/RS.** 2013. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- CASTRO, A.L.C. **Glossário de defesa civil, estudos de riscos e medicina de desastres.** 2 ed. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, 1998. 283 p.
- CRED - CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS. **The international disaster database (EM-DAT).** 2012. Disponível em: <<http://www.emdat.br/database>>. Acesso em: 24 fevereiro 2012.
- CIRILO, J.A.; COSTA, W.D. PONTES, M.; MAIA, A.Z. **Barragem subterrânea: Um programa pioneiro em Pernambuco.** In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 4., Campina Grande, 1998. Campina Grande: ABRH, 1998. CD-ROM.
- CUNGE, J. A. 1969. **“On the subject of flood propagation computation method” (Muskingum method).** Journal of Hydraulic Research, v. 7, no. 2, p. 205-230.
- DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; TERRA, V. S. S.; ROSSKOFF, J. L. C. **Hidrograma de projeto em função da metodologia utilizada na obtenção da precipitação.** R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.14, n.1, p.46-54. 2010.
- GUMBEL, E. J. 1958. *Statistics of Extremes.* Columbia University Press, New York, 375p.
- HASENACK, H.; WEBER, E. (Org.). **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000.** Porto Alegre: UFRGS-IB-Centro de Ecologia, 2010. DVD-ROM (Série Geoprocessamento, 3).
- IBGE. **Banco Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sinopse do Censo Demográfico de 2010.** Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?lang=&codmun=431010&search=rio-grande-do-sul|igrejinha|infograficos:-dados-gerais-do-municipio>>. Acesso em: 20 Maio 2013.
- KEIFER, C. J.; CHU, H. H. **Synthetic Storm Pattern for Drainage Design.** Journal of the Hydraulics Division, 83, H Y 5, 1957. p. 1332-1/1332-25.
- KOBIYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos.** Curitiba: Ed. Organic Trading, 2006. 124p. Disponível em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/Livro%20>> Acesso em: 30 maio 2013.
- KOBIYAMA, M.; CHECCHIA, T.; SILVA, R. V.; SCHRÖDER, P.H.; GRANDO, A.; REGINATTO, G.M.P. 2004. **Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1. Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 834-846, CD-ROM.
- KIRPICH, Z.P. 1940. **Time of concentration in small agricultural watersheds.** Civil Engineering, v. 10, n. 6, p.362-, 1940.
- MARENCO, J.A. **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil.** Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável – FBDS. 2010. Disponível em: <<http://www.fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-504.pdf>>. Acesso em: 23 fevereiro 2012.
- MCCARTHY, G. T. 1938. **“The unit hydrograph and flood routing.”** Proc. Conf. of North Atlantic Division, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- MORAES, I. C.; CONCEIÇÃO, F. T.; CUNHA, C. M. L.; MORUZZI, R. B. **Interferência do uso da terra nas inundações da área urbana do Córrego da Servidão, Rio Claro (SP).** Revista Brasileira de Geomorfologia, v.13, n.2, (Abr-Jun) p.187-200.2012.
- MORUZZI, R. B.; CUNHA, C. M. L. da; BRAGA, R. **A questão do escoamento superficial em áreas degradadas por processos erosivos lineares: a importância de uma estratégia de análise.** Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 2, p. 073-088. 2009.

OLIVEIRA, G.G.. **Modelos para previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do rio Caí, RS.** 2010. 148f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, G.G.; VALENTE, P.T.; GUASSELLI, L.A. **Espacialização das áreas de inundação nos municípios de Igrejinha e Três Coroas, bacia hidrográfica do rio Paranhana/RS.** In: Simpósio Nacional de Geomorfologia. In: SINAGEO, 9, 2012, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: UFRJ, 2012. Artigos, CD-ROM.

OLIVEIRA, G. G. ; QUEVEDO, R. P. ; GUASSELLI, L. A. ; MENEZES, P. H. N. . **Expansão urbana nas áreas inundáveis do rio Paranhana no município de Igrejinha/RS.** In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO- SBSR, 16, 2013, Foz do Iguaçu. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 920-927.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica.** 1.ed. São Carlos: EESC/USP, 1998. 540 p.

ROSSATO, M. S. **Os Climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, Tendências e Tipologia.** 2011. 253f. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SCS, 1975. **Urban Hydrology for Small Watersheds.** 1975 Washington. U.S.Dept. Agr.(Technical Release.n.55).

TUCCI, C.E.M; BRAGA, B.; SILVEIRA, A.,1989. **Avaliação do Impacto da urbanização nas cheias urbanas.** RBE Caderno de Recursos Hídricos V7 N.1.

TUCCI, C. E. **Modelos Hidrológicos.** Porto Alegre: ABRH. Ed. da Universidade – UFRGS. 1998. 669p.

TUCCI, C.E.M.; BERTONI, J.C. (Org.) **Inundações urbanas na América do Sul.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. 150 p.

UNESCO. 2012. **World Water Development Report (WWDR4),** 2012. Disponível em: <<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr4-2012/>>. Acesso em 03 Setembro 2013.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA.** In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia, GO. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005. p. 1-8.

VALERIANO, M. M. (a) **Dados topográficos.** In: Teresa G. Florenzano. (Org.). Geomorfologia - conceitos e tecnologias atuais. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2008. v.1, p.72-104.

VALERIANO, M. M. (b) **TOPODATA: Guia de utilização de dados geomorfométricos locais.** São José dos Campos: INPE, 2008. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/data/TDkrig.pdf>>. Acesso em 09 novembro 2010.

VIEGAS FILHO, J.S., 2000. **O Paradigma da Modelagem Orientada a Objetos Aplicada a Sistemas de Apoio à Decisão em Sistemas de Recursos Hídricos.** Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidad Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2 vol. 559 p.