



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

- Mestrado -

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS A
PARTIR DE DADOS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS POR LIDAR**

Por

Sarah Veeck

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para a obtenção
do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Março de 2018



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

- Mestrado -

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE PEQUENAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE DADOS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS
POR LIDAR**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Sarah Veeck

Orientador: Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

V417m Veeck, Sarah.

Modelagem hidrológica de pequenas bacias hidrográficas a partir de dados de elevação obtidos por lidar / Sarah Veeck. - João Pessoa, 2018.
158 f. : il.

Orientação: Adriano Rolim da Paz.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia civil e ambiental. 2. Modelagem hidrológica. 3. Drenagem urbana. 4. Sensoriamento remoto. I. Paz, Adriano Rolim da. II. Título.

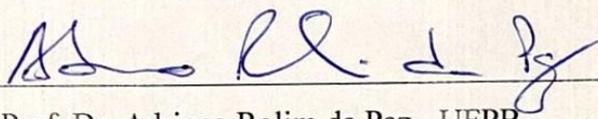
UFPB/BC

**“MODELAGEM HIDROLÓGICA DE PEQUENAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE DADOS DE ELEVAÇÃO
OBTIDOS POR LiDAR”**

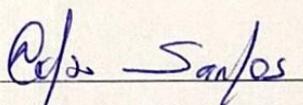
SARAH VEECK

Dissertação aprovada em 26 de março de 2018

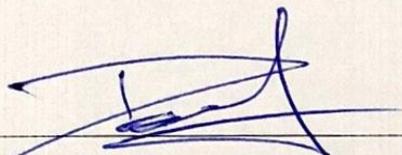
Período Letivo: 2017.2



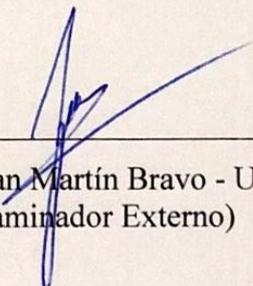
Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz - UFPB
(Orientador)



Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos - UFPB
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Piccilli - UFSM
(Examinador Externo)



Prof. Dr. Juan Martín Bravo - UFRGS
(Examinador Externo)

**João Pessoa/PB
2018**

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por todas as bênçãos recebidas.

A meus pais por terem possibilitado minha formação, além de todo o incentivo e amor que sempre me dedicaram.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz, pela atenção, confiança, dedicação e incentivo constantes, além do exemplo de excelente profissionalismo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro fornecido para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

Ao Departamento de Esgotos Pluviais de Porto Alegre (DEP), a Prefeitura de Porto Alegre e a Heinrich Hasenack pela disponibilização dos dados empregados nesta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Daniel Allasia, ao grupo Ecotecnologias e a Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, pela sincera acolhida e contribuição para o enriquecimento desta pesquisa.

Aos professores, Dr. Juan Martín Bravo – UFRGS e Dr. Celso Augusto Guimarães Santos – UFPB, por aceitarem participar como banca examinadora.

Ao grupo de pesquisa ao qual esta pesquisa está vinculada, em especial a Fagner França da Costa, Thâmara Ismael, Deborah Lima, Lairanne Costa, Dário Macedo, Julie Eugênio e Marcella Medeiros.

A Daniel Borges dos Santos por todo carinho, paciência e auxílio.

A Diego Soares Lopes pelo auxílio inicial.

Ao Instituto Federal Farroupilha pela ajuda ao ceder seu laboratório de informática para a finalização dos resultados desta pesquisa.

A todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho, muito obrigada.

RESUMO

As bacias hidrográficas refletem a ocupação de suas áreas tanto na dinâmica da qualidade ambiental quanto em sua rede de drenagem, sendo a sua caracterização e o entendimento de sua dinâmica uma peça chave para que o planejamento e gestão dos sistemas de drenagem sejam feitos de maneira eficiente. Há mais de duas décadas a simulação hidrológica obteve vantagens do aprimoramento de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), somado ao crescimento da capacidade computacional e maior disponibilidade de informações de terreno, entre elas a tecnologia LiDAR. Para simular o comportamento das bacias hidrográficas diante de eventos chuvosos são utilizados modelos de transformação chuva-vazão, dentre eles, o mais utilizado pela comunidade técnica é o método desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS), devido a sua facilidade de aplicação, reduzido número de parâmetros e relação com as características físicas da bacia hidrográfica. Entretanto, o método é conhecido por considerar a bacia de forma concentrada, não explorando de forma significativa a variabilidade de suas características físicas, e influenciando na simulação de processos hidrológicos que são naturalmente variáveis no tempo e espaço. Em razão disso, diversas pesquisas buscam incorporar essa variabilidade nos modelos hidrológicos. Na presente pesquisa, a qualidade dos dados provenientes da tecnologia LiDAR é avaliada em comparação com dados provenientes da missão SRTM, por meio da extração de redes de drenagem e delimitação de bacias hidrográficas. Além disso, é utilizada uma abordagem distribuída para o consagrado método de obtenção das vazões do Soil Conservation Service (SCS), onde o método é aplicado a nível de pixel para melhor considerar a variabilidade da bacia hidrográfica. A aplicação da abordagem distribuída do método foi realizada através de rotinas computacionais desenvolvidas em Fortran, que forneceram o tempo de deslocamento do escoamento, chuva excedente e aplicação do HUT por pixel. Ao mesmo tempo, foi determinada a condição de umidade antecedente do solo para cada evento de chuva utilizado, assim como o ajuste da taxa de abstração inicial (λ), que na abordagem concentrada indica a parcela de precipitação que não gera escoamento, sendo seu valor de 20% considerado demasiado elevado pela literatura científica do assunto. A avaliação dos modelos digitais de elevação e a abordagem distribuída foram aplicadas na sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire, localizada nos municípios de Porto Alegre e Viamão, devido à disponibilidade de dados observados de chuva-vazão, e modelos digitais de terreno e elevação. Trabalhado em cinco resoluções espaciais diferentes, o resultado da extração das redes de drenagem dos modelos digitais apresentou os melhores resultados quando comparada a rede de drenagem de referência e as obtidas pelas resoluções espaciais mais baixas, entretanto, as bacias hidrográficas provenientes dos modelos de alta resolução espacial melhor representaram a bacia determinada como referência. Na abordagem distribuída do método SCS, o volume e vazão máxima dos hidrogramas foram subestimadas, enquanto o tempo de pico dos eventos foi antecipado. Os valores ajustados da taxa de abstração inicial (λ) resultaram em valores predominantemente menores do que o proposto pelo método tradicional, além disso, a resolução espacial do modelo digital empregado exerceu pequena influência no valor de λ , embora tenha representado de forma mais satisfatória os hidrogramas quando empregada a resolução espacial mais alta.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem hidrológica distribuída, LiDAR, SRTM, SCS, Drenagem Urbana, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

The hydrographic basins reflect the occupation of their areas in both the environmental quality dynamics and their drainage network, being the characterization and understanding of their dynamics is a key part for planning and management of drainage systems in an efficient way. For more than two decades the hydrological simulation has been benefited from the enhancement of Geographic Information Systems (GIS), including the increase in computational capacity and greater availability of terrain information, including LiDAR technology. In order to simulate the behavior of watersheds in the face of rainy events, rainfall-flow transformation models are used, among them, the most used by the technical community is the method developed by the Soil Conservation Service (SCS), due to its ease of application, parameters and relation with the physical characteristics of the river basin. However, the method is known to consider the basin in a concentrated way, not exploiting significantly the variability of its physical characteristics, and influencing the simulation of hydrological processes that are naturally variable in time and space. Because of this, several studies seek to incorporate this variability into hydrological models. In the present research, the quality of the data derived from the LiDAR technology is evaluated in comparison with data from the SRTM mission, through the extraction of drainage networks and delimitation of watersheds. In addition, a distributed approach is used for the well-known Soil Conservation Service (SCS) flow-through method where the method is applied at the pixel level to better account for watershed variability. The application of the distributed approach of the method was done through computational routines developed in Fortran, which provided the travel time, runoff depth and application of HUT per pixel. At the same time, the antecedent soil moisture condition was determined for each rainfall event, as well as the initial abstraction rate (λ), which in the concentrated approach indicates the portion of precipitation that does not generate runoff, being the value of 20% considered too high by the scientific literature of the subject. The evaluation of the digital elevation models and the distributed approach were applied in the Saint Hilaire sub-basin, located in the municipalities of Porto Alegre and Viamão, due to the availability of observed rainfall-flow data, and digital terrain and elevation models. Working in five different spatial resolutions, the results of the extraction of the drainage networks of the digital models presented the best results when compared to the reference drainage network and those obtained by the lower spatial resolutions, however, the hydrographic basins from the high resolution models represent the basin determined as a reference better. In the distributed approach of the SCS method, the runoff volume and maximum flow rate of the hydrographs were underestimated, while the peak time of the events was anticipated. The adjusted values of the initial abstraction rate (λ) resulted in values that were predominantly lower than those proposed by the traditional method, in addition, the spatial resolution of the digital model exerted little influence on the value of λ , although it represented more satisfactorily the hydrographs when higher spatial resolution is used.

KEYWORDS: Distributed hydrological modeling, LiDAR, SRTM, SCS, Urban Drainage, Remote Sensing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – COMPARAÇÃO MDE SRTM 90m e 30m	20
FIGURA 2 – SEGMENTO ESPACIAL SRTM E SEUS COMPONENTES PRINCIPAIS ...	21
FIGURA 3 – AERONAVE E COMPONENTES PRINCIPAIS DO SISTEMA DE VARREDURA A LASER	23
FIGURA 4 – VISÃO GERAL DOS FLUXOS DE TRABALHO DE PROCESSAMENTO DE DADOS LiDAR A PARTIR DA NUVEM DE PONTOS ORIGINAL	24
FIGURA 5 - EXEMPLO DE (A) MDS OBTIDO POR DADOS LiDAR (B) MDT OBTIDO A PARTIR DO MDS	25
FIGURA 6 – (A) DIREÇÕES DE FLUXO PARA UM DETERMINADO PIXEL E (B) DIREÇÃO DE FLUXO ESCOLHIDA EM FUNÇÃO DA MAIOR DECLIVIDADE ENTRE O PIXEL CENTRAL E OS VIZINHOS, SEGUNDO O MÉTODO D8.....	26
FIGURA 7 – DETERMINAÇÃO DO FLUXO ACUMULADO	27
FIGURA 8 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA SEMELHANÇA ENTRE A REDE DE DRENAGEM EM ANÁLISE (LINHA TRACEJADA) E A REDE DE DRENAGEM DE REFERÊNCIA (LINHA EM NEGRITO). MÉTODO (A) DISTÂNCIA MÉDIA E MÉTODO (B) PORCENTAGEM DENTRO DO BUFFER (SOMBREADO CINZA)	30
FIGURA 9 – ESTRUTURA DE DADOS DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA DETERMINADA UTILIZANDO UM MDE	31
FIGURA 10 – RESPOSTA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA A UM EVENTO DE CHUVA DE CURTA DURAÇÃO.....	35
FIGURA 11 – HUT DE RESPOSTA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA A UM EVENTO DE CHUVA DE CURTA DURAÇÃO	36
FIGURA 12 – COMPARAÇÃO DE ESCOAMENTO ESTIMADO POR DIFERENTES MÉTODOS DE CN (COMPOSTO E DISTRIBUÍDO) E PARA DIFERENTES VALORES DE ABSTRAÇÃO INICIAL (Ia) COM VALORES OBSERVADOS DE ESCOAMENTO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DE TARAFENI.....	38
FIGURA 13 – VALORES DE ESCOAMENTO PREVISTOS EM COMPARAÇÃO COM OS VALORES DE ESCOAMENTO ORIGINAIS MEDIDOS PARA A A) PARTE SUPERIOR E B) PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DE LYKORREMA..	39
FIGURA 14 – EXEMPLO DE AJUSTE (CHEIA 1).....	40
FIGURA 15 – COMPARAÇÃO DOS HIDROGRAMAS GERADOS PELO MODELO NUMÉRICO DA ONDA CINEMÁTICA E AS FORMULAÇÕES DE TEMPO DE VIAGEM ESPACIALMENTE DISTRIBUÍDO QUE CONSIDERAM AS CONTRIBUIÇÕES A MONTANTE E NEGLIGENCIAM-NAS ($\lambda=0$) PARA DIFERENTES RESOLUÇÕES DA GRADE	40
FIGURA 16 – IMPACTO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO MDE SOBRE A PRECISÃO DO MODELO DE INUNDAÇÃO PARA AS ÁREAS DE BLACKLOT E EAST MALL	41
FIGURA 17 – LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE.....	42
FIGURA 18 – ETAPAS METODOLÓGICAS.....	47
FIGURA 19 – MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DA REGIÃO ONDE ESTÁ INSERIDA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE A) MDE	

	SRTM COM RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 30M; B) MDT LIDAR COM RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 1m.....	48
FIGURA 20	– REDE DE DRENAGEM DE REFERÊNCIA OBTIDA POR MEIO DOS ARQUIVOS DISPONIBILIZADOS PELO DEP	49
FIGURA 21	– REDE DE DRENAGEM DE REFERÊNCIA OBTIDA POR MEIO DOS ARQUIVOS DISPONIBILIZADOS PELO DIAGNÓSTICO AMBIENTAL	49
FIGURA 22	– USO E COBERTURA DO SOLO NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE.....	51
FIGURA 23	– USO DO SOLO NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE: PORCENTAGEM EM RELAÇÃO Á ÁREA TOTAL DA BACIA.....	52
FIGURA 24	– REDES LINÍGRAFA (H) E PLUVIOGRÁFICA (P) DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO DILÚVIO, GERADAS PELO PROJETO DILÚVIO	52
FIGURA 25	– PREENCHIMENTO DE FALSAS DEPRESSÕES.....	54
FIGURA 26	– EXEMPLO DE EVENTOS (A) SELECIONADOS NA TRIAGEM E (B) DESCARTADOS NA TRIAGEM	58
FIGURA 27	– ESQUEMA REPRESENTATIVO DE OBTENÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	59
FIGURA 28	– EXEMPLO DE SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO E SUPERFICIAL	60
FIGURA 29	– CAMINHO DO PIXEL COM MAIOR TEMPO DE DESLOCAMENTO ATÉ O CURSO D’AGUA MAIS PRÓXIMO	62
FIGURA 30	– SEÇÃO TRANSVERSAL ADOTADA EM TODOS OS TRECHOS DA REDE DE DRENAGEM.....	63
FIGURA 31	– DISPERSÃO DOS TEMPOS DE CONCENTRAÇÃO OBSERVADO E CALCULADO PARA O η DA VEGETAÇÃO VARIÁVEL.....	65
FIGURA 32	– DISPERSÃO DOS TEMPOS DE CONCENTRAÇÃO OBSERVADO E CALCULADO PARA O η DA VEGETAÇÃO CONSTANTE ($\eta=0,29$)	65
FIGURA 33	– COMPRIMENTO L DENTRO DO PIXEL	67
FIGURA 34	– DIVISÃO DA REDE DE DRENAGEM EM SUBTRECHOS DE CARACTERÍSTICAS HOMOGÊNEAS DE DECLIVIDADE E SEÇÃO TRANSVERSAL.....	70
FIGURA 35	– ELABORAÇÃO DO MAPA DE CN PARA A AMC II, A PARTIR DOS MAPAS DE GRUPO HIDROLÓGICO E USO DO SOLO	75
FIGURA 36	– VALORES DE CN POR PIXEL PARA OS DIFERENTES AMCS PARA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE.....	75
FIGURA 37	– ESQUEMA REPRESENTATIVO DA VARIANTE HU_{EXU} DO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO DISTRIBUÍDO	78
FIGURA 38	– ESQUEMA REPRESENTATIVO DA VARIANTE HU_{JUS} DO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO DISTRIBUÍDO	79
FIGURA 39	– HUT DO SCS DISCRETIZADO	81
FIGURA 40	– ESQUEMA ILUSTRATIVO DA PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE (P(t)).....	81
FIGURA 41	– HISTOGRAMAS ACUMULADOS DE ALTITUDE DOS MDTs LiDAR E MDE SRTM UTILIZADOS NA PESQUISA	85
FIGURA 42	– HISTOGRAMA ACUMULADO DA DIFERENÇA DE ALTITUDE ENTRE O MDS LiDAR 1m E MDT LiDAR 1m	86
FIGURA 43	– DIFERENÇA DE ALTITUDE ENTRE O MDS LiDAR 1m E MDT LiDAR 1m PARA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE	87

FIGURA 44 – INSPEÇÃO VISUAL DAS REDES DE DRENAGEM GERADAS PELAS DIFERENTES RESOLUÇÕES ESPACIAIS EMPREGADAS NA PESQUISA	88
FIGURA 45 – DETALHAMENTO DA TOPOGRAFIA DO MDT LiDAR 1m	90
FIGURA 46 – DETALHE DE TRECHOS DO RIO PRINCIPAL INSERIDOS NO BUFFER DE ACORDO COM SUA RESOLUÇÃO ESPACIAL	91
FIGURA 47 – DETALHE DE TRECHOS DO RIO PRINCIPAL INSERIDOS NO BUFFER DE 30m	92
FIGURA 48 – SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS GERADAS PARA AS DIFERENTES RESOLUÇÕES EMPREGADAS.....	94
FIGURA 49 – COMPARAÇÃO DA DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA PARA AS RESOLUÇÕES ESPACIAIS EMPREGADAS MOSTRANDO A PORCENTAGEM DA ÁREA ERRONEAMENTE INCLUÍDA OU OMITIDA	95
FIGURA 50 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO TOTAL E DURAÇÃO DOS EVENTOS.....	97
FIGURA 51 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO TOTAL E INTENSIDADE DOS EVENTOS.....	97
FIGURA 52 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO TOTAL E VAZÕES SUPERFICIAIS MÁXIMAS DOS EVENTOS	98
FIGURA 53 – VOLUME PRECIPITADO E ESCOADO PARA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE.....	99
FIGURA 54 – TEMPO DE DESLOCAMENTO EM CANAL MDT LIDAR 30m.....	100
FIGURA 55 – TEMPO DE DESLOCAMENTO EM SUPERFÍCIE MDT LIDAR 30m	101
FIGURA 56 – TEMPO DE DESLOCAMENTO TOTAL MDT LIDAR 30m	102
FIGURA 57 – HISTOGRAMA ACUMULADO DE TEMPO TOTAL (EVENTOS PA180579, PA200779, PA030879, PA050280, PA160280 e PA030380) NAS CINCO RESOLUÇÕES ESPACIAIS UTILIZADAS.....	103
FIGURA 58 – HISTOGRAMA ACUMULADO DE TEMPO TOTAL (EVENTOS PA310580, PA080780, PA310880, PA081180, PA301180, PA141280) NAS CINCO RESOLUÇÕES ESPACIAIS UTILIZADAS.....	104
FIGURA 59 – HISTOGRAMA ACUMULADO DE TEMPO TOTAL (EVENTOS PA310580, PA080780, PA310880, PA081180, PA301180, PA141280) NAS CINCO RESOLUÇÕES ESPACIAIS UTILIZADAS.....	105
FIGURA 60 – VALORES DE λ AJUSTADO POR EVENTO E AMC.....	108
FIGURA 61 – ARMAZENAMENTO (S) PARA AMC II PARA O MDT LiDAR 1m	111
FIGURA 62 – PERDAS INICIAS (I_a) PARA O λ PADRÃO ($\lambda = 0,2$) E λ AJUSTADO ($\lambda = 0,14$) PARA O MDT LiDAR 1m.....	112
FIGURA 63 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DA P_{exc} PARA λ PADRÃO E AJUSTADO. 116	
FIGURA 64 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DA P_{exc} PARA λ PADRÃO E AJUSTADO. 117	
FIGURA 65 – PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE (P_{exc}) PARA OS EVENTOS PA200779, PA260881 E PA110781 COM λ PADRÃO E AJUSTADO PARA O MDT LiDAR 1m	117
FIGURA 66 – HIDROGRAMAS RESULTANTES OBTIDOS ATRAVÉS DO HU_{EXE} E HU_{JUS} PARA O MDT LiDAR 30m (EVENTOS PA180579, PA200779, PA030879, PA050280, PA160280, PA030380, PA310580, PA080780, PA310880).....	120
FIGURA 67 – HIDROGRAMAS RESULTANTES OBTIDOS ATRAVÉS DO HU_{EXE} E HU_{JUS} PARA O MDT LiDAR 30m (EVENTOS PA081180, PA301180, PA141280, PA181280, PA110781, PA260881, PA200981, PA051281, PA030282).....	121

FIGURA 68 – COMPARAÇÃO DO HIDROGRAMA RESULTANTE COM λ PADRÃO E λ AJUSTADO PARA O MDT LiDAR 30m (EVENTOS PA180579, PA200779, PA030879, PA050280, PA160280, PA030380, PA310580, PA080780, PA310880)	123
FIGURA 69 – COMPARAÇÃO DO HIDROGRAMA RESULTANTE COM λ PADRÃO E λ AJUSTADO PARA O MDT LiDAR 30m (EVENTOS PA081180, PA301180, PA141280, PA181280, PA110781, PA260881, PA200981, PA051281, PA030282)	124
FIGURA 70 – COMPARAÇÃO DO TEMPO DE PICO ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E OS RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO SCS-CN-HUT DISTRIBUÍDO COM λ AJUSTADO, PARA CADA EVENTO E CADA RESOLUÇÃO ESPACIAL	126
FIGURA 71 – COMPARAÇÃO DA VAZÃO DE PICP ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E OS RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO SCS-CN-HUT DISTRIBUÍDO COM λ AJUSTADO, PARA CADA EVENTO E CADA RESOLUÇÃO ESPACIAL	128
FIGURA 72 – COMPARAÇÃO DO VOLUME ESCOADO ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E OS RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO SCS-CN-HUT DISTRIBUÍDO COM λ AJUSTADO, PARA CADA EVENTO E CADA RESOLUÇÃO ESPACIAL	130
FIGURA 73 – COMPARAÇÃO DOS HIDROGRAMAS RESULTANTES NAS CINCO RESOLUÇÕES ESPACIAIS EMPREGADAS (PA180579, PA200779, PA030879, PA050280, PA160280, PA030380, 310580, PA080780, PA310880)	132
FIGURA 74 – COMPARAÇÃO DOS HIDROGRAMAS RESULTANTES NAS CINCO RESOLUÇÕES ESPACIAIS EMPREGADAS (PA081180, PA301180, PA141280, PA181280, PA110781, PA260881, PA200981, PA051281, PA030282)	133
FIGURA 75 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E OS RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO SCS-CN-HUT DISTRIBUÍDO PARA O MDT LiDAR 1m COM λ PADRÃO, AJUSTADO E REAJUSTADO	135
FIGURA 76 – COMPARAÇÃO HIDROGRAMAS RESULTANTES MDT LiDAR 1m COM λ ANTIGO E REAJUSTADO	136

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – AMÍN DEFINIDA PARA CADA RESOLUÇÃO ESPACIAL EMPREGADA NA PESQUISA	54
TABELA 2 – VALORES DE BUFFER APLICADOS À REDE DE DRENAGEM TOMADA COMO REFERÊNCIA	57
TABELA 3 – VALORES DE COMPRIMENTO E DECLIVIDADE DO PIXEL MAIS DISTANTE PARA OS TRECHOS DE SUPERFÍCIE E CANAL DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE.....	63
TABELA 4 – COEFICIENTE DE MANNING (η) ADOTADOS PARA ÁREA URBANA E SOLO EXPOSTO.....	64
TABELA 5 – COEFICIENTE DE MANNING (η) PARA A VEGETAÇÃO DEFINIDO POR EVENTO	64
TABELA 6 – COEFICIENTE DE MANNING (η) PARA ESCOAMENTO EM CANAL ...	66
TABELA 7 – VALORES DE COEFICIENTES DE MANNING (η) ADOTADOS	66
TABELA 8 – DISTÂNCIAS ORTOGONAIS DE ACORDO COM O TAMANHO DO PIXEL	67
TABELA 9 – DISTÂNCIAS DIAGONAIS DE ACORDO COM O TAMANHO DO PIXEL	68
TABELA 10 – P_{24} PARA OS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO OBSERVADOS NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE.....	69
TABELA 11 – DECLIVIDADES DOS SUBTRECHOS DA REDE DE DRENAGEM.....	70
TABELA 12 – CONDIÇÃO DE UMIDADE ANTECEDENTE DO SOLO (CUA) CONSIDERADOS PELO MÉTODO SCS-CN	71
TABELA 13 – CONDIÇÃO DE UMIDADE ANTECEDENTE DOS EVENTOS SELECIONADOS	72
TABELA 14 – VALORES DE CN EM FUNÇÃO DA COBERTURA E GRUPO HIDROLÓGICO DO SOLO PARA AMC II.....	73
TABELA 15 – CORREÇÃO DOS VALORES DE CN DE ACORDO COM A UMIDADE ANTECEDENTE	74
TABELA 16 – VALORES DE CN DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HIALIRE DE ACORDO COM O GRUPO HIDROLÓGICO E AMC	74
TABELA 17 – EVENTOS SELECIONADOS PARA O REAJUSTE DO VALOR DE λ	76
TABELA 18 – RELAÇÃO ENTRE O TEMPO (t) E A VAZÃO ($q(t)$) OBTIDAS A PARTIR DA DISCRETIZAÇÃO DE UM HU	81
TABELA 19 – RELAÇÃO ENTRE O TEMPO (t) E A PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE ($P(t)$)	82
TABELA 20 – HIDROGRAMA OBTIDO PELA PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE P_1	82
TABELA 21 – EXEMPLO DE UM PROCESSO DE CONVOLUÇÃO	82
TABELA 22 – QUANTIDADE DE PIXELS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO ESPACIAL.....	83
TABELA 23 – COMPRIMENTO E DIFERENÇA RELATIVA PERCENTUAL DAS REDES DE DRENAGEM EM ANÁLISE	89
TABELA 24 – PORCENTAGEM DO RIO PRINCIPAL EM ANÁLISE INSERIDO NO BUFFER DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO ESPACIAL.....	91
TABELA 25 – PORCENTAGEM DA REDE DE DRENAGEM EM ANÁLISE INSERIDA NO BUFFER DE 30m.....	92
TABELA 26 – ÁREA E DISTÂNCIA MÉDIA ENTRE AS REDES DE DRENAGEM EM ANÁLISE E DE REFERÊNCIA.....	93

TABELA 27 – ÁREAS E PERÍMETROS DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS GERADAS PELAS DIFERENTES RESOLUÇÕES ESPACIAIS	94
TABELA 28 – DIFERENÇA RELATIVA PERCENTUAL DAS ÁREAS DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS	95
TABELA 29 – CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT-HILAIRE	96
TABELA 30 – CARACTERÍSTICAS DOS HISTOGRAMAS ACUMULADOS DE TEMPO DE DESLOCAMENTO TOTAL	107
TABELA 31 – VALORES DE λ AJUSTADOS POR EVENTO	108
TABELA 32 – ARMAZENAMENTO (S) PARA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE CONFORME AMC ADOTADO	111
TABELA 33 – PERDAS INICIAIS (Ia) PARA O λ PADRÃO ($\lambda = 0,2$)	111
TABELA 34 – PERDAS INICIAIS (Ia) PARA O λ AJUSTADO	112
TABELA 35 – PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE PARA $\lambda = 0,2$	113
TABELA 36 – PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE PARA λ AJUSTADO	114
TABELA 37 – COEFICIENTES DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA DADOS OBSERVADOS E EVENTOS COM λ PADRÃO E AJUSTADO	115
TABELA 38 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DE λ ANTIGO E REAJUSTADO PARA O MDT LIDAR 1m	134

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

AMC – Antecedent Moisture Condition

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

CN – Curva Número

DEP – Departamento de Esgotos Pluviais

DPI – Divisão de Processamento de Imagens

D8 – Deterministic Eight Neighbours

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária

HU – Hidrograma Unitário

HUS – Hidrograma Unitário Sintético

HUT – Hidrograma Unitário Triangular

IBGE – Instituto Brasileiro de Pesquisa e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INS – Sistema Inercial de Navegação

LiDAR – Light Detection and Ranging

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NRCS – Natural Resource Conservation Service

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Terreno

SCS – Soil Conservation Service

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

USDA - United States Department of Agriculture

USGS – United States Geological Survey

UTM - Universal Transversal de Mercator

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SIGLAS	xiv
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Geral	17
1.1.2. Específicos.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	19
2.1.1. Definições, tipos e aplicação	19
2.1.2. Dados SRTM	20
2.1.3. Dados LiDAR	22
2.2. PROCESSAMENTO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO	26
2.2.1. Direções de fluxo.....	26
2.2.2. Áreas acumuladas de drenagem	27
2.2.3. Rede de drenagem	28
2.2.4. Delimitação da bacia	30
2.3. MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	31
2.3.1. Tempo de concentração	31
2.3.2. Precipitação Excedente.....	33
2.3.3. Hidrograma Unitário.....	35
2.3.4. Abordagem Distribuída SCS-CN-HUT.....	37
3. ÁREA DE ESTUDO	42

3.1.	LOCALIZAÇÃO	42
3.2.	ASPECTOS HISTÓRICOS	43
3.3.	ASPECTOS POPULACIONAIS E SOCIOECONÔMICOS	44
3.4.	ASPECTOS FISIAGRÁFICOS E CLIMATOLÓGICOS	45
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1.	DADOS DISPONÍVEIS E ANÁLISE PRELIMINAR	46
4.1.1.	Modelo Digital de Elevação	46
4.1.2.	Rede de drenagem de referência.....	48
4.1.3.	Tipo de solo e grupo hidrológico.....	50
4.1.4.	Uso e cobertura do solo	50
4.1.5.	Dados observados de precipitação e vazão.....	52
4.2.	PROCESSAMENTO BÁSICO DO MDE.....	53
4.2.1.	Métodos e parâmetros.....	53
4.2.2.	Comparação entre MDEs.....	55
4.2.3.	Avaliação das sub-bacias hidrográficas e redes de drenagem.....	56
4.3.	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS CHUVA-VAZÃO.....	58
4.4.	CÁLCULO DO TEMPO DE DESLOCAMENTO	61
4.4.1.	Ajuste inicial dos Coeficientes de Manning	61
4.4.2.	Metodologia para cálculo do tempo de deslocamento distribuído	66
4.5.	DETERMINAÇÃO DA CHUVA EXCEDENTE	71
4.5.1.	Condição de umidade antecedente do solo (AMC).....	71
4.5.2.	Elaboração dos mapas de CN	72
4.5.3.	Perdas iniciais	75
4.5.4.	Precipitação excedente	77
4.6.	DETERMINAÇÃO E APLICAÇÃO DO HUT.....	77
4.6.1.	Determinação do HUT	78
4.6.2.	Aplicação do HUT	80

4.6.3.	Análise de hidrogramas calculados	83
4.7.	PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL DOS DADOS.....	83
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
5.1.	ANÁLISE DOS MODELOS DIGITAIS.....	85
5.2.	AVALIAÇÃO DAS REDES DE DRENAGEM	87
5.2.1.	Inspeção visual e características das redes de drenagem.....	87
5.2.2.	Método do <i>buffer</i>	90
5.2.3.	Área e distância média.....	93
5.3.	AVALIAÇÃO DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS	94
5.4.	MODELAGEM CHUVA – VAZÃO	96
5.4.1.	Obtenção do hidrograma das vazões observadas	96
5.4.2.	Tempo de deslocamento do escoamento superficial	99
5.4.3.	Ajuste da taxa de abstração inicial	107
5.4.4.	Precipitação excedente	110
5.4.5.	Análise dos hidrogramas resultantes	119
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	137
6.1.	CONCLUSÕES	137
6.2.	RECOMENDAÇÕES	139
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
	APÊNDICE A	150

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da segunda metade do século XX, foi registrado no Brasil um significativo crescimento da população urbana, que segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística representa 85,43% da população do país (Paulino, 2014; IBGE, 2016).

Caracterizado por grandes concentrações urbanas em pequenos espaços, esse crescimento produz um efeito direto sobre infraestrutura de recursos hídricos como a falta de drenagem urbana, ocupação de leito de inundação ribeirinha, impermeabilização e canalização dos rios, que acabam por trazer danos não só a população, ameaçando sua segurança, como também o meio ambiente que com ela interage (Tucci, 2002; Tucci, 2005).

A transformação das áreas urbanas em ambientes vulneráveis ao impacto de fortes chuvas é uma consequência de um entendimento deficitário do movimento da água e dos princípios físicos que regulam essa movimentação nessas áreas (Elga et al., 2015), o que torna a compreensão da dinâmica de uso e ocupação das bacias hidrográficas de fundamental importância para as ações de monitoramento e planejamento ambiental (Silveira, 2009).

Caracterizar fisicamente uma bacia hidrográfica e seu sistema de drenagem constitui uma das principais etapas na elaboração de estudos ambientais. Inicialmente, essas informações eram obtidas de forma manual, com o auxílio de mapas topográficos impressos. Entretanto, os avanços nas ferramentas de geoprocessamento e Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), somado ao aumento da capacidade computacional e disponibilidade de dados obtidos por sensoriamento remoto, possibilitaram o processamento automático de dados de digitais de elevação do terreno, normalmente sob a forma de Modelos Digitais de Elevação (MDE) (Buarque et al., 2009).

Há mais de duas décadas a simulação hidrológica obteve vantagens do aprimoramento dos SIGs (Elga et al., 2015). Somado a isso, com o crescimento da capacidade computacional, uma grande quantidade de novas técnicas de sensoriamento remoto trouxe um aumento na quantidade de informações de terreno, entre elas destaca-se a tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*), que fornece Modelos Digitais de Elevação (MDEs) de alta resolução espacial, inferior a 5m, e com visíveis vantagens em relação às tecnologias tradicionais (Tarolli et al., 2009).

A utilização de dados provenientes de tecnologia LiDAR vem se tornando cada vez mais usual, e diversas pesquisas voltadas aos recursos hídricos vem sendo desenvolvidas (Schwanghart et al., 2013; Woodrow et al., 2016). A extração de redes de drenagem, por exemplo, revela resultados que indicam que os dados LiDAR, quando comparados com

resultados provenientes de outras fontes de dados, ou entre si, apresentam uma significativa diferença (Li e Wong, 2010; Yang et al., 2014).

Os modelos hidrológicos também receberam melhorias com a evolução das técnicas computacionais e dos dados digitais. Métodos consagrados, como o método da Curva Número (CN) proposto pelo *Soil Conservation Service* (SCS), hoje conhecido como *Natural Resource Conservation Service* (NRSCS), e o método do Hidrograma Unitário (HU), estão recebendo melhorias baseados em imagens de alta resolução espacial e novas técnicas de geoprocessamento.

Os métodos consagrados citados acima consideram a bacia hidrográfica de forma concentrada, não levando em consideração a variabilidade das características físicas da mesma. Contudo, a qualidade dos modelos hidrológicos chuva-vazão utilizados pode ser significativamente melhorada, uma vez que a variação espacial das características físicas da bacia hidrográfica seja incluída em uma abordagem distribuída (Greene e Cruise, 1995).

Muitas modificações foram propostas desde a concepção original do método SCS-CN e continuam a ser apresentadas na literatura científica, com diferentes abordagens como, por exemplo, propor métodos diferentes de calibração do parâmetro CN (Ajmal e Kim, 2015; Tassi et al., 2006); adaptar a metodologia para que seja considerada a variação espacial das características físicas da bacia hidrográfica, tornando o método distribuído (Jena et al., 2012), testar e recomendar a calibração de coeficientes tidos como constantes originalmente (Woodward et al., 2003; Yuan et al., 2012; Ajmal e Kim, 2015).

Diante do exposto, a pesquisa em questão intentar analisar a influência da resolução espacial na delimitação de bacias hidrográficas e redes de drenagem, fazendo uso de dados provenientes da missão SRTM e dados LiDAR de alta resolução espacial. Além disso, é analisado o efeito da abordagem distribuída na modelagem chuva-vazão, ou seja, considerando as variações físicas da sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire, localizada na bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio em Porto Alegre (RS).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Geral

Avaliar o efeito do uso de MDEs de alta resolução espacial para a representação de redes de drenagem e modelagem chuva-vazão.

1.1.2. Específicos

- ✓ Analisar a variabilidade da caracterização da rede de drenagem e da bacia hidrográfica, a partir de modelos digitais de elevação e terreno provenientes de diferentes fontes e resoluções espaciais.
- ✓ Analisar o efeito de dados LiDAR e SRTM para a abordagem distribuída de modelagem chuva-vazão.
- ✓ Analisar o efeito da resolução espacial na abordagem distribuída da modelagem chuva-vazão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

2.1.1. Definições, tipos e aplicação

A utilização de MDEs por meio de SIGs tem se mostrado cada vez mais uma ferramenta poderosa para a análise de características topográficas, apresentando vantagens operacionais como velocidade e integração com outros bancos de dados, além da redução da intervenção manual e, conseqüentemente, da subjetividade (Valeriano et al., 2006).

As aplicações dos MDEs são diversas. Na área de recursos hídricos elas variam desde a caracterização de bacias hidrográficas, o que requer a análise de grandes áreas, até a avaliação de compactação do solo com o armazenamento de água (Chaplot et al., 2006). Já nas geociências, por exemplo, os modelos digitais são utilizados para simplificar a exposição dos eventos e prever possíveis riscos naturais, como avalanches, deslizamentos de terra, quedas de rochas e até mesmo, fluxos vulcânicos (Gerstenecker et al., 2005).

Entretanto, existem diferentes tipos de modelos digitais, como os Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Superfície (MDS) que, assim como o conhecido Modelo Digital de Elevação (MDE), são capazes de expressar características do terreno e vem sendo utilizados nas mais diversas pesquisas.

De acordo com Li et al. (2005), os modelos possuem definições semelhantes, porém, existem pequenas diferenças entre os produtos. Enquanto MDEs são representações numéricas da topografia do terreno ou seja, da elevação (Chaplot et al., 2006), MDSs são representações da elevação da superfície juntamente com qualquer objeto que exista sobre ela (Kidd & Chapman, 2013) e, MDTs são formados por matrizes de números que representam a distribuição espacial de uma série de propriedades (Collins & Moon, 1981), como dados de relevo, informações batimétricas, meteorológicas, geológicas, dados geoquímicos e geofísicos (Felgueiras, 2001).

A obtenção dos MDEs pode ser feita a partir de diferentes fontes de dados como, por exemplo, por meio de levantamento topográfico do terreno, sensoriamento remoto, cartas topográficas ou qualquer outro meio que seja capaz de medir a superfície de certa área, indicando sua elevação em relação ao nível do mar (Carvalho, 2009).

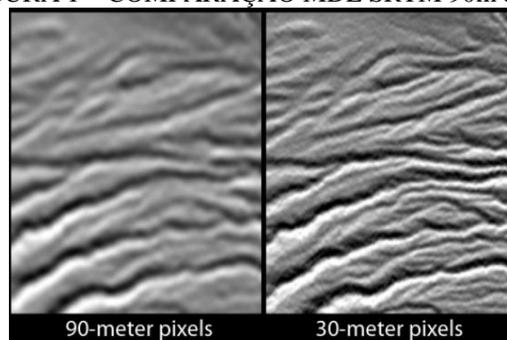
A geração do MDE pode ser realizada através de diferentes fontes de dados. Os mapas desenhados de forma manual, com o auxílio de levantamentos de campo, e sua posterior digitalização, foram os precursores dos modelos digitais. Com o passar do tempo e a crescente evolução tecnológica, sensores orbitais, como os disponibilizados a bordo das missões ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) começaram a ganhar espaço. Porém, atualmente, apesar da grande utilização de imagens provenientes de sensores orbitais, sua utilização vem disputando espaço com os sensores transportados a bordo de aviões, como o LiDAR, que provê imagens de alta resolução (Oliveira et al., 2010; Carvalho, 2009).

2.1.2. Dados SRTM

Mais conhecido como SRTM, o *Shuttle Radar Topography Mission*, é um projeto de coleta de dados topográficos que envolve quatro entidades de diferentes nacionalidades, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a *US National Imagery and Mapping Agency* (NIMA) nos Estados Unidos, o *German Aerospace Center* (DLR) na Alemanha e uma contribuição da Agência Espacial Italiana (ASI), que coopera com o DLR no processamento dos dados (Van Zyl 2001; Mukul et al., 2015).

Com duração de 11 dias, o voo espacial designado como missão SRTM produziu dados de elevação de alta qualidade, com resoluções espaciais de 1 (~30m) e 3 (~90m) arc seg (FIGURA 1), para todo o globo terrestre, entre os dias 11 e 22 de fevereiro de 2000 (Van Zyl, 2001; Rabus et al., 2003). Antes dessa missão ser realizada o único conjunto de dados digitais de elevação global disponível gratuitamente era o GTOPO30 da *US Geological Survey* (USGS), com resolução espacial de 1km (Gutiérrez e Nieto, 2006; Zandbergen, 2008).

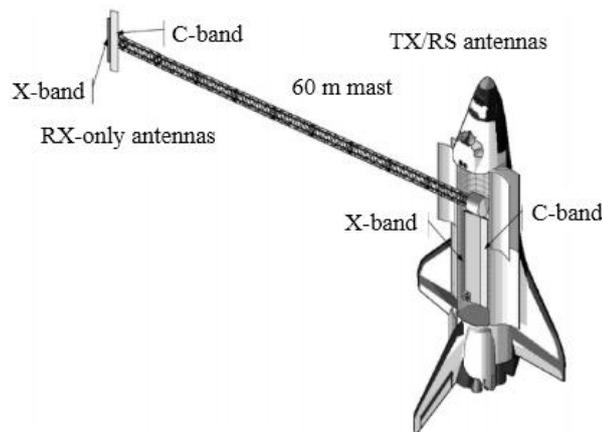
FIGURA 1 – COMPARAÇÃO MDE SRTM 90m e 30m



FONTE: NASA Jet Propulsion Laboratory. Photojournal (2017).

A rapidez na aquisição dos dados foi atribuída ao sistema de interferometria de radar (SAR) utilizado a bordo da nave espacial (FIGURA 2), o qual permitia que as imagens fossem obtidas em dois locais ligeiramente diferentes, independente da escuridão e cobertura de nuvens, fazendo uso de duas geometrias de visualização por meio de duas antenas, que normalmente estão dispostas uma acima da outra (Farr e Kobrick, 2000; Van Zyl, 2001; Rabus et al., 2003).

FIGURA 2 – SEGMENTO ESPACIAL SRTM E SEUS COMPONENTES PRINCIPAIS



FONTE: Adaptado de Rabus et al., 2003, p. 245.

Uma característica comum dos MDEs gerados pela missão SRTM é a presença de uma quantidade substancial de ruídos aleatórios, que produzem um efeito negativo em aplicações hidrológicas e geomorfológicas, particularmente em áreas com pouca inclinação na superfície (Zandbergen, 2008).

Além dos ruídos, áreas com erros extremos ou locais onde nenhum sinal do radar retornou acabam recebendo um valor vazio nos produtos originados por dados SRTM. Esses vazios são causados pela presença de corpos d'água ou areia, que dispersam pouca energia de volta ao radar ou por encostas e locais muito íngremes que acabam gerando sombras sobre o radar, ou ainda áreas com vegetação pesada que não conseguem ser significativamente penetradas pelo sinal do radar, gerando um mapa topográfico que não corresponde com a superfície do solo nessas áreas (Farr et al., 2007; Luedeling et al., 2007; Zandbergen 2008).

No entanto, apesar das dificuldades da obtenção e geração de produtos com dados SRTM, desde sua divulgação os dados tiveram um grande impacto em estudos de regiões para as quais a topografia digital e de alta resolução não estavam disponíveis. Fornecidos gratuitamente nas resoluções espaciais de 30m e 90m, os dados encontraram caminho para

muitas áreas de pesquisa que requerem dados topográficos, sendo amplamente utilizados por pesquisadores do mundo todo (Zandbergen, 2008; Mukul et al., 2015).

Em hidrologia os dados topográficos são amplamente empregados na determinação de propriedades hidrológicas de um local, incluindo a extração de redes de drenagem e áreas de captação a montante. Com a disponibilidade de MDEs provenientes dos dados SRTM, com precisão suficiente para a aplicação em modelos hidrológicos, é possível uma avaliação mais rápida e global dessas áreas (Zandbergen, 2008).

Fan et al. (2013), por exemplo, com a finalidade de definir critérios que auxiliem na escolha da área de drenagem mínima utilizaram um MDE proveniente da missão SRTM, analisando 28 bacias hidrográficas em diferentes regiões do Brasil.

Anteriormente, Schumann et al. (2008), compararam os estágios de elevação da água em um modelo de inundação utilizando dados oriundos de LiDAR, STRM e contornos topográficos, sugerindo que o SRTM é uma fonte valiosa para realizar a extração inicial de informações sobre inundações.

2.1.3. Dados LiDAR

Conceitos

Informações topográficas detalhadas são essenciais em uma grande variedade de pesquisas, objetivando mapear, explorar, modelar e aumentar a compreensão dos fenômenos naturais da superfície terrestre (Höfle e Rutzinger, 2011).

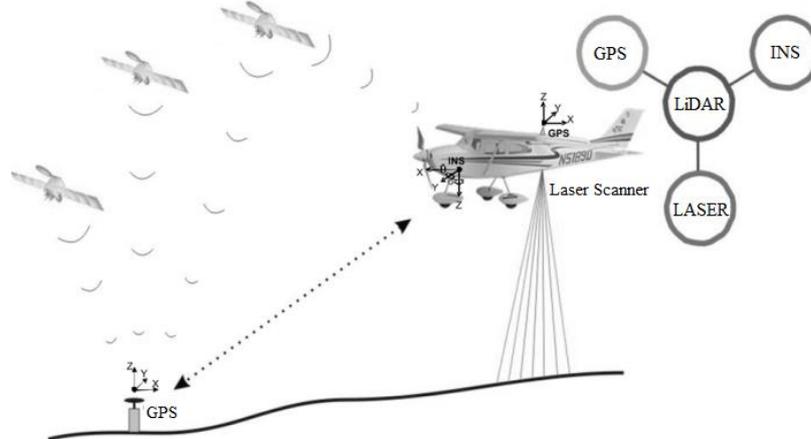
Apesar de o uso de lasers não ser uma tecnologia nova no perfilamento do terreno, tendo aparecido na literatura no ano de 1971, só recentemente os avanços nos sistemas inerciais de navegação aérea, posicionamento global, processamento e armazenamento digital de dados propiciaram o desenvolvimento de Sistemas de Varredura a Laser, ou Sistemas de Perfilamento a Laser (ALS), para mapeamento do terreno (Barber e Shortridge, 2005; Höfle e Rutzinger, 2011).

A tecnologia de sensoriamento remoto *Ligth Detection and Ranging* (LiDAR) é baseada nos mesmos princípios utilizados em sistemas de RADAR, com a diferença de que no lugar de ondas de rádio o sistema LiDAR utiliza pulsos a laser para determinar a distância dos instrumentos de medição até o alvo (Giongo et al., 2010; Höfle e Rutzinger, 2011).

O princípio de funcionamento do sistema LiDAR consiste na emissão de pulsos laser de elevada frequência de repetição por uma plataforma aérea ou terrestre. O tempo de retorno desses pulsos é então medido pelo sensor, realizando uma estimativa das distâncias obtidas. Além disso, o sistema não necessita da luz solar para o seu funcionamento, dispondo de sua própria fonte de iluminação, o que evita prejuízos nos dados causados por sombras de nuvens ou outros objetos próximos (Giongo et al., 2010).

Os equipamentos e programas que formam o LiDAR (FIGURA 3) são divididos em componentes a bordo da aeronave e componentes localizados no terreno, utilizados em tempo real de execução do levantamento ou para análise pós processamento (Brandalize, 2002). O sistema necessita, basicamente, de um sensor laser, responsável por registrar o tempo entre o sinal emitido e retornado, um Sistema Inercial de Navegação (INS), um receptor GPS em uma plataforma aerotransportada, um computador de bordo, unidades de armazenamento dos dados e uma rede de GPS em terra que trabalhe de forma conjunta ao instalado na aeronave (Brandalize, 2002; Giongo et al., 2010).

FIGURA 3 – AERONAVE E COMPONENTES PRINCIPAIS DO SISTEMA DE VARREDURA A LASER



FONTE: Giongo et al. (2010).

Uma das vantagens do LiDAR é sua capacidade de penetrar a vegetação, registrando as elevações através de pequenas lacunas no dossel, e possibilitando a geração de produtos mais confiáveis mesmo em áreas densamente arborizadas (Höfle e Rutzinger, 2011).

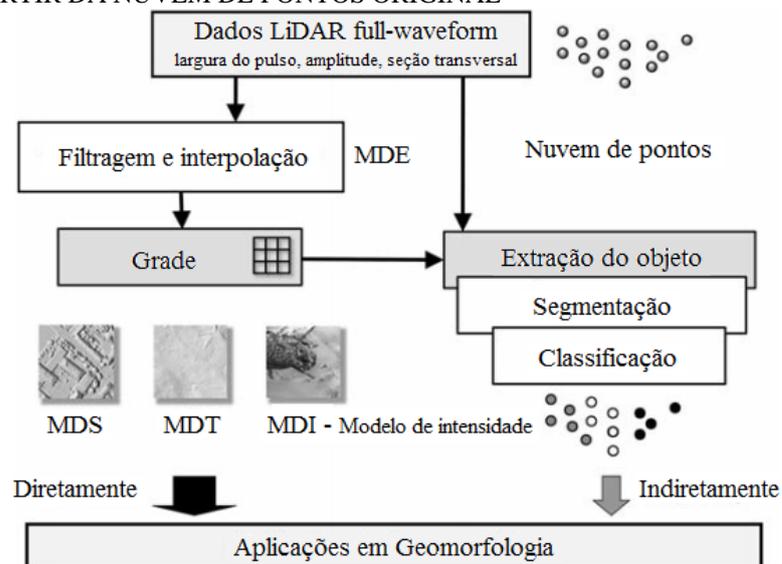
No entanto, assim como os outros métodos de obtenção de informações topográficas, o LiDAR não está isento de erros. Existe um grande número de fatores que afetam a qualidade e a precisão dos dados obtidos, como o material da superfície imageada, a altitude de voo do sensor e plataforma, o ângulo de observação e a transformação das coordenadas (Zhi e Zhon, 2008).

Barber e Shortdrige (2005) por exemplo, ressaltam que os dados LiDAR podem apresentar alguns problemas na representação de direções de fluxo e identificação de sub-bacias. Tais autores atribuem isso, dentre outros motivos, à dificuldade do pulso laser emitido pela aeronave retornar em áreas densamente vegetadas, resultando em uma quantidade muito baixa de pontos para a interpolação e pela presença de rodovias elevadas que podem interferir na direção de fluxo dos modelos gerados, por confundir tais rodovias com possíveis redes de drenagem.

Produtos gerados (MDT e MDS)

A varredura a laser produz uma nuvem de pontos em três dimensões com diferentes valores de intensidade, que incluem todos os alvos que o laser atingiu, como edifícios, postes telefônicos, linhas de energia, vegetação e até pássaros (Liu et al., 2005; Zhi e Zhong, 2008). Esses pontos podem ser agrupados em dois diferentes tipos de uso (FIGURA 4), o uso direto de dados e informações derivadas de LiDAR, como MDEs, e a aplicação indireta de dados refinados, como parâmetros de rugosidade da cobertura terrestres, que servem de entrada para estudos geomorfológicos (Höfle e Rutzinger, 2011).

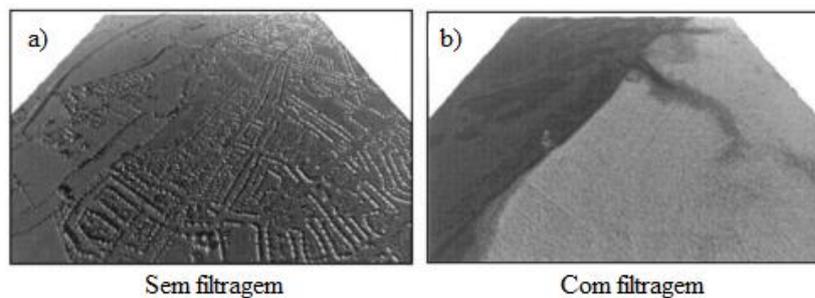
FIGURA 4 – VISÃO GERAL DOS FLUXOS DE TRABALHO DE PROCESSAMENTO DE DADOS LiDAR A PARTIR DA NUVEM DE PONTOS ORIGINAL



FONTE: Adaptado de Höfle e Rutzinger (2011).

A nuvem de pontos é processada como um modelo de elevação da superfície (MDS) (FIGURA 5A), que a descreve juntamente com tudo o que há sobre ela, podendo ser convertido para uma imagem raster (Liu et al., 2005; Zhi e Zhong, 2008). Para que a superfície possa ser representada de forma bruta, ou seja, sem edificações, vegetação ou quaisquer outros itens sobre ela, o MDS passa por um processo de filtragem, originando um modelo digital de terreno (MDT) (FIGURA 5B), onde apenas a descrição da topografia do terreno aparece (Lohmann et al., 2000).

FIGURA 5 - EXEMPLO DE (A) MDS OBTIDO POR DADOS LiDAR (B) MDT OBTIDO A PARTIR DO MDS



FONTE: Adaptado de Priestnall et al. (2000).

Aplicações

Devido ao seu grande potencial de uso, os dados provenientes de levantamento LiDAR abrangem uma grande variedade de campos de aplicação, como o aprimoramento de MDTs, a classificação da cobertura do solo, mapeamento geomorfológico e a entrada para modelos e simulação de processos, assim como um incremento à modelagem hidrológica, para a avaliação de risco de inundações e representação de redes de drenagem, além de planejamento urbano e costeiro (Murphy et al., 2008; Giongo et al., 2010; Höfle e Rutzinger, 2011).

A grande vantagem desse tipo de dado é sua alta resolução espacial, motivo pelo qual muitas pesquisas vêm fazendo uso dos modelos gerados pela tecnologia LiDAR ao longo dos anos. Yang et al. (2014) por exemplo, avaliaram a representação de redes de drenagem em diferentes resoluções espaciais geradas a partir de dados LiDAR; similar a Murphy et al. (2008), que investigaram a diferença das redes de drenagem obtidas por meio de MDEs convencionais e provenientes de LiDAR.

Já Li et al. (2013) propuseram um método que incorpora nos MDEs as estruturas de drenagem como tubulações e pontes, analisando sua influência na modelagem de bacias hidrográficas. E mais recentemente Maderal et al. (2016) informam que o Instituto Nacional

Geográfico da Espanha (IGN-ES) lançou um novo sistema de produção para a extração automática de redes hidrográficas com o objetivo de obter uma rede hidrográfica precisa e atualizada, a partir de dados LiDAR.

2.2. PROCESSAMENTO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

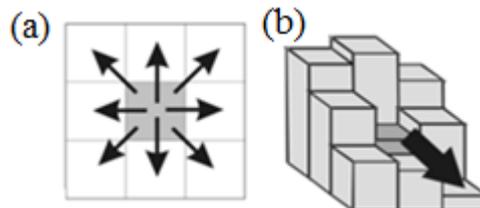
2.2.1. Direções de fluxo

As relações hidrológicas entre diferentes pontos de uma bacia hidrográfica são conhecidas como direções de fluxo, sendo que, para sua existência é necessário que exista uma topologia contínua, a fim de formar uma drenagem funcional (Rennó et al., 2008).

As direções de fluxo podem ser expressas utilizando diferentes abordagens, que se enquadram em dois grandes grupos: os modelos de fluxo simples, que definem uma única direção possível para o fluxo, e os modelos de fluxo múltiplo, que permitem a divisão do escoamento para mais de uma célula vizinha (Buarque et al., 2009; Cano, 2005).

Conhecido como *Deterministic Eight Neighbours* (D8), o método mais usual pertence ao grupo de algoritmos de fluxo simples. Por meio deste método, as direções de fluxo acompanham a grade do MDE, onde são atribuídas oito possíveis direções para o escoamento (FIGURA 6A). Dessa forma, o fluxo irá seguir para a célula adjacente ou diagonal que apresentar a maior declividade, calculada como a diferença de elevação entre o pixel vizinho e o pixel em avaliação, dividido pela distância entre eles (FIGURA 6B) (O’Callaghan & Mark, 1984; Jenson e Domingue, 1988; Rennó et al., 2008; Buarque et al., 2009).

FIGURA 6 – (A) DIREÇÕES DE FLUXO PARA UM DETERMINADO PIXEL E (B) DIREÇÃO DE FLUXO ESCOLHIDA EM FUNÇÃO DA MAIOR DECLIVIDADE ENTRE O PIXEL CENTRAL E OS VIZINHOS, SEGUNDO O MÉTODO D8



FONTE: Adaptado de Paz e Collischonn (2008).

A obtenção das direções de fluxo é um passo de grande importância no processamento de MDEs, uma vez que, se forem mal especificadas, a área de drenagem acumulada de um certo ponto da drenagem estará incorreta, acarretando em erros futuros no balanço hídrico e fluxo

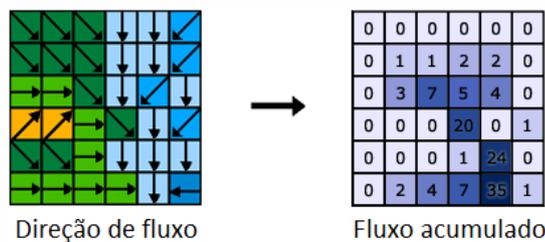
estimado do rio (Davies & Bell, 2009). Os erros nas direções de fluxo utilizadas como informação para simulação hidrológica podem ainda afetar a estimativa da distribuição espacial da umidade no solo, promover variações do cálculo da geração e velocidade do fluxo, além de influenciar na simulação do transporte de sedimentos e poluentes (Sousa e Paz, 2017).

Alguns dos erros apresentados pelas direções de fluxo podem ser desconsiderados e acabam por não influenciar significativamente em estudos de modelagem hidrológica. Porém, algumas direções incorretas podem acabar forçando o modelo a representar inadequadamente os caminhos de fluxo e as localizações das junções das redes de drenagem, afetando a modelagem de extensão de inundação (Sousa e Paz, 2017).

2.2.2. Áreas acumuladas de drenagem

A partir das direções de fluxo (FIGURA 7) pode-se determinar a área acumulada de drenagem, que é um plano de informações onde cada célula possui como valor o somatório das áreas superficiais de todos os pixels que contribuem para o escoamento do pixel analisado (Jenson e Domingue, 1988).

FIGURA 7 – DETERMINAÇÃO DO FLUXO ACUMULADO



FONTE: ESRI (2017).

A imagem raster obtida para as áreas acumuladas de drenagem indica qual a área de contribuição de cada pixel, mas não necessariamente deve haver um curso d'água no local. Para que se tenha certeza do local onde existe um curso d'água, é necessária a utilização de outras fontes de dados, como informações coletadas em campo (PAZ E COLLISCHONN, 2008).

2.2.3. Rede de drenagem

Obtenção a partir do MDE

A rede de drenagem pode ser considerada a principal forma de caracterizar uma bacia hidrográfica. Somado a isso, a disposição e a geometria da rede são a base para a elaboração de modelos hidrológicos (Garcia e Camarasa, 1999).

Inicialmente, a identificação e delimitação das redes de drenagem era feita de forma manual, através de mapas ou fotografias aéreas, e posteriormente digitalizadas, o que demandava muito tempo e esforço, além da possibilidade de introduzir erros (Garcia e Camarasa, 1999).

Como dito anteriormente, o mapa de rede de drenagens pode ser obtido através da imagem de áreas acumuladas de drenagem. Entretanto, não necessariamente há um curso d'água em todos os pixels indicados na imagem. Para tanto, é necessário realizar uma reclassificação da imagem, estabelecendo um valor de área de drenagem mínima (Amin), ou seja, estabelecer um valor mínimo de área de contribuição necessário para que ocorra a formação de um curso d'água (Paz e Collischonn, 2008; Fan et al., 2013).

Existem diferentes abordagens para se obter o valor da Amin, em um deles o valor é arbitrado, sendo escolhido aquele que apresentou uma ramificação da drenagem mais próxima ao seu propósito. Em outra abordagem, o valor é escolhido visando a reprodução, mais fidedigna possível, da rede de drenagem da bacia em estudo (Fan et al., 2013).

Valores de Amin mais baixos são responsáveis por gerar redes de drenagem mais ramificadas, enquanto que valores de drenagem mais altos representam apenas os rios principais. Segundo Fernandez (2011), valores baixos de Amin podem contribuir para ressaltar erros na drenagem, como a formação de linhas paralelas artificiais nas áreas mais planas do modelo, embora a causa em si desse erro esteja associada ao algoritmo de determinação das direções de fluxo (Paz e Collischonn, 2008).

Outro fator que acaba por influenciar a rede de drenagem é a resolução espacial do MDE. Diversos autores vêm realizando pesquisas na área, a fim de indicar qual seria o melhor produto e resolução espacial a serem utilizados na extração de redes de drenagem. Yang et al. (2014) comparam a rede de drenagem extraída de dados LiDAR, em diferentes resoluções espaciais, com uma rede de drenagem de referência do *National Agriculture Center*, para três bacias hidrográficas localizadas nos Estados Unidos. Como resultado tais autores concluem que dados com resoluções mais altas produzem redes de drenagem mais detalhadas e com maior

comprimento, decrescendo conforme o tamanho da célula aumenta. Entretanto, em relação à comparação da sinuosidade, os melhores resultados foram obtidos para um tamanho de célula de 10m. Dessa forma, apesar de resoluções menores resultarem em melhores representações da rede de drenagem, elas não necessariamente resultaram em simulações hidrológicas melhores, sendo então sugerida a utilização de uma resolução intermediária de 10m, que é capaz de representar satisfatoriamente a realidade.

Li e Wong (2010) realizaram testes com parte da rede de drenagem do rio Kansas em diferentes resoluções espaciais e proveniente de diferentes fontes de dados, buscando compreender qual fonte de dados e resolução melhor se enquadraria com a rede de referência. Os autores utilizaram dados da missão SRTM, LiDAR e *National Elevation Dataset* (NED) em diferentes resoluções, concluindo que os dados LiDAR apresentam ótimos resultados quando comparados com dados de baixa resolução. Entretanto, utilizar dados de resoluções mais baixas não significa que há um mau desempenho, apenas descrevem uma paisagem mais suave, deixando de fora certas características do local.

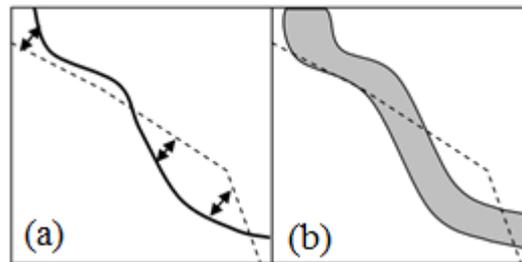
A qualidade das redes de drenagem extraídas de MDEs é fortemente influenciada pela qualidade do modelo digital, características físicas da bacia, escala e algoritmos utilizados (Sousa e Paz, 2017). No entanto, é pouca a literatura referente às métricas de avaliação dos resultados da extração de redes de drenagem provenientes de MDEs (Sousa e Paz, 2017).

Avaliação da qualidade

Para determinar a qualidade da rede de drenagem extraída, são utilizadas algumas das métricas utilizadas por Sousa e Paz (2017), que variam desde a comparação visual até técnicas mais elaboradas, como o método do *buffer* e da distância média.

O método da comparação visual é o mais simples de todos, e o único não quantitativo, onde se observa o quão bem a rede obtida no processamento segue a rede de referência (Davies e Bell, 2009), sendo capaz de identificar onde um método comportou-se melhor ou pior que o outro (Tatsch et al., 2009). A distância média (FIGURA 8A) é a distância entre todos os pontos da drenagem de referência e da obtida via processamento, sendo que valores maiores indicam um afastamento das redes de drenagem, enquanto que valores menores, tendendo a zero, indicam uma maior proximidade das redes (Davies e Bell, 2009; Tatsch et al., 2009). Já a porcentagem dentro do *buffer* (FIGURA 8B) estima a porcentagem da rede de drenagem inserida dentro de um *buffer* gerado ao redor da rede de drenagem de referência (Davies e Bell, 2009; Buarque et al., 2009; Sousa e Paz, 2017).

FIGURA 8 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA SEMELHANÇA ENTRE A REDE DE DRENAGEM EM ANÁLISE (LINHA TRACEJADA) E A REDE DE DRENAGEM DE REFERÊNCIA (LINHA EM NEGRITO). MÉTODO (A) DISTÂNCIA MÉDIA E MÉTODO (B) PORCENTAGEM DENTRO DO BUFFER (SOMBREADO CINZA)



FONTE: Davies e Bell (2009).

2.2.4. Delimitação da bacia

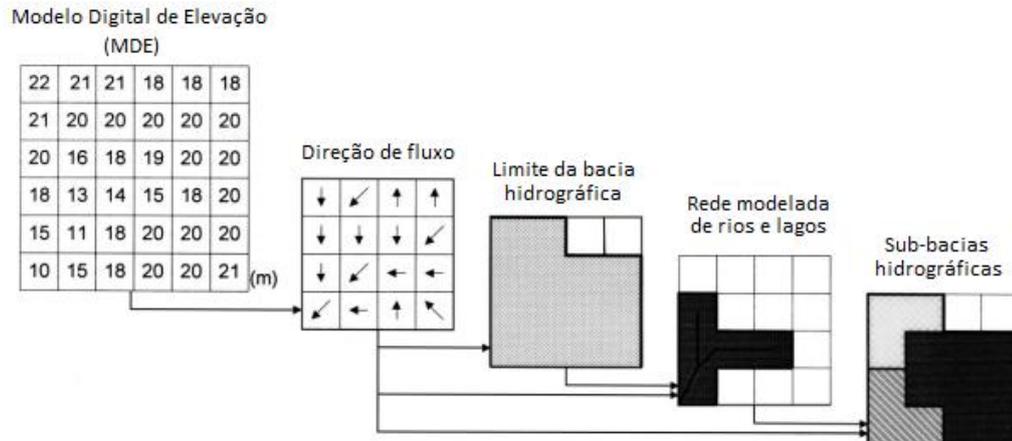
A delimitação de bacias hidrográficas pode ser feita através de diferentes métodos. Um desses métodos faz uso de linhas de contorno presentes em mapas topográficos, porém, por tratar-se de um método manual, acaba sendo dispendioso e demorado. A disponibilidade dos mapas topográficos digitais proporcionou outro método de delimitação, contudo, assim como o método manual e por ser um processo subjetivo, o digital também pode ser lento e dispendioso, pois envolve não só as características hidrológicas do local de estudo, como também os requisitos do delineador (Bose et al., 2012).

Entretanto, a gestão dos recursos hídricos requer informações detalhadas das bacias hidrográficas, a nível de sub-bacias e até mesmo micro bacias. Desse modo, é necessário que as informações sobre as bacias sejam armazenadas de tal forma que possam ser facilmente acessadas para quaisquer estudos que utilizem sua área de abrangência (Bose et al., 2012).

Com o surgimento dos SIGs, a delimitação de bacias hidrográficas obteve um forte aliado. Uma vez que a definição de seus limites está intimamente ligada ao relevo da bacia, passou-se a utilizar MDEs que forneceram assim um método consistente de delimitação (Bose et al., 2012; Dias et al., 2004).

Dessa forma, a delimitação de bacias com o uso de MDEs constitui uma sequência de passos (FIGURA 9) que envolve o preenchimento de depressões espúrias, obtenção da direção de fluxo, áreas acumuladas de drenagem, rede de drenagem e, por fim, do contorno da bacia (Dias et al., 2004).

FIGURA 9 – ESTRUTURA DE DADOS DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA DETERMINADA UTILIZANDO UM MDE



FONTE: Adaptado de Turcotte et al. (2001).

2.3. MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

2.3.1. Tempo de concentração

Amplamente utilizado na estimativa de vazões máximas em projetos hidrológicos de pequenas e grandes bacias hidrográficas, o tempo de concentração (T_c) não possui uma definição única, mas sim uma variedade de definições adotadas pela literatura (McCuen, 2009; Grimaldi et al., 2012; Fang et al., 2007).

Admitindo a hipótese de que a bacia hidrográfica responde de forma linear ao escoamento superficial direto, o T_c passa a ser entendido como o tempo necessário para que toda a bacia contribua no local de saída (Silveira, 2005), podendo ser definido como o tempo necessário para que uma partícula de água se desloque do ponto hidráulicamente mais distante da bacia até o exutório (McCuen et al., 1984).

Em função da importância do tempo de escoamento da água, a maioria dos modelos hidrológicos requer uma característica da bacia hidrográfica que seja capaz de refletir esse tempo, dessa forma vários parâmetros de tempo foram desenvolvidos e embora o tempo de escoamento seja uma característica da bacia hidrográfica, os parâmetros do tempo são desenvolvidos com base em outras características das bacias e até mesmo da intensidade da chuva (McCuen, 1998).

Na prática, muitas são as equações empíricas que fazem uma relação entre os aspectos físicos e o T_c da bacia e, portanto, devem ser utilizadas para condições semelhantes às utilizadas para sua determinação. Além disso, a escolha da equação deve partir de uma análise cuidadosa, visando evitar o equívoco de utilizar equações originalmente propostas para bacias urbanas em rurais e vice-versa (Porto, 1995).

Silveira (2005) propõe-se a avaliar o desempenho de 23 equações de T_c , analisando os erros gerados por cada uma quando se utilizam dados de arquivos teste de uma bacia rural e outra urbana.

Entretanto, a forma mais usual utilizada para calcular o T_c envolve a separação do caminho de fluxo principal em diversos trechos (tempos de viagens) que possuem características próprias como comprimento, declividade e rugosidade, que são empregadas na equação de Manning (McCuen, 2009).

Um dos métodos de obtenção do T_c aplicados principalmente quando não há dados hidrológicos disponíveis é o método desenvolvido pelo SCS. O mais usual dos métodos é conhecido como método das velocidades, e assume que o T_c é a soma dos segmentos dos tempos de viagem ao longo do caminho hidráulicamente mais distante (EQUAÇÃO 1) (NRCS, 2010).

$$T_c = T_{t1} + T_{t2} + T_{t3} + \dots T_{tn} \quad (1)$$

A determinação do tempo de concentração em redes de drenagem utiliza a equação de Manning (EQUAÇÃO 2):

$$V = \frac{Rh^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (2)$$

Sendo: V é a velocidade do escoamento (m/s); S é a declividade (m/m); n é o coeficiente de rugosidade de Manning e Rh é o raio hidráulico (m) (EQUAÇÃO 3).

$$Rh = \frac{A}{P} \quad (3)$$

Sendo: A é a área da seção transversal (m^2) e P é o perímetro molhado da seção transversal (m).

Após determinada a velocidade do escoamento, o tempo de concentração é obtido através da EQUAÇÃO 4:

$$T_c = \frac{L}{V} \quad (4)$$

Sendo: T_c : tempo de concentração (s); L é o comprimento do trecho (m).

Para superfícies não é necessário calcular a velocidade de escoamento, desse modo a EQUAÇÃO 5 pode ser utilizada:

$$T_c = \frac{5,74(n.L)^{0,8}}{(P_{24})^{0,5}.S^{0,4}} \quad (5)$$

Sendo: P24 é a precipitação com 24h de duração (mm), segundo a IDF da área de estudo e para o tempo de retorno de projeto.

No entanto, apesar da ampla utilização do método das velocidades, ele apresenta uma série de problemas, como sua frequente aplicação assumindo que o fluxo superficial laminar é apenas uma pequena porção do caminho de fluxo principal (McCuen, 2009).

Além disso, o método ignora o armazenamento em bacias e canais, o que pode subestimar o real tempo de concentração, e não deixa claro se fornece uma reflexão realista do tempo de escoamento de toda a bacia hidrográfica (McCuen, 2009).

2.3.2. Precipitação Excedente

O exame cuidadoso da precipitação excedente ou, escoamento superficial direto, que engloba a determinação do tempo de retorno, das vazões de pico, volume e forma dos hidrogramas, constitui um componente de fundamental importância em projetos ambientais e estruturais ligados a hidrologia. Os erros cometidos nessa fase de estudo são responsáveis por introduzir inconsistência nos projetos, que podem subdimensionar ou superdimensionar obras (Ajmal e Kim, 2015; King e Balogh, 2008; Porto, 1995).

Fração da precipitação total que escoar pela superfície do solo e pelos múltiplos cursos d'água, a precipitação excedente é o maior contribuinte para as vazões de cheia em pequenas bacias (Porto, 1995; Tucci et al., 2003).

O método mais simples e mais utilizado para a determinação da precipitação excedente, principalmente quando não se dispõem de dados hidrológicos, é o método CN desenvolvido pelo SCS (Ajmal e Kim, 2015; Porto, 1995; Soulis et al., 2009; Sartori et al., 2005), sendo a chuva excedente determinada pela EQUAÇÃO 6:

$$P_{exc} = \frac{(P - \lambda S)^2}{(P - \lambda S + S)} \quad (6)$$

Sendo: P_{exc} é a precipitação excedente (mm); S é o armazenamento (mm), P é a precipitação (mm) e λ é a taxa de abstração inicial.

Caso a precipitação seja menor que as abstrações iniciais (EQUAÇÃO 7), a chuva excedente assume um valor nulo (Tucci et al., 2003).

$$P_{exc} = 0 \quad se \ P < \lambda S \quad (7)$$

O termo λS é referente às abstrações iniciais (EQUAÇÃO 8), que podem ser divididas em cinco categorias (Ponce e Hawkins, 1996):

$$I_a = \lambda \cdot S \quad (8)$$

- 1) Interceptação em ambiente rural por vegetação, folhagens, caules e detritos e, em ambiente urbano por características culturais da paisagem.
- 2) Armazenamento em lagoas, poças d'água e demais locais temporários.
- 3) Infiltração para reabastecimento do lençol freático.
- 4) Evaporação de corpos hídricos.
- 5) Evapotranspiração da vegetação.

Com a intenção de simplificar a estimativa da abstração inicial, após realizar uma análise em bacias hidrográficas com menos de 10 acres, o modelo SCS propôs uma relação linear entre a abstração e o armazenamento, sendo adotado um valor padrão da taxa de abstração inicial (λ) de 20% (Ponce e Hawkins, 1996).

Entretanto, a escolha do valor λ depende principalmente das condições climáticas e necessita de um refinamento para bacias hidrográficas regionais (Ponce e Hawkins, 1996; Ajmal e Kim, 2015). Levando em consideração esse detalhe, muitos estudos vem mostrando que o valor $\lambda = 0,2$ é muito alto, e pesquisas vem reavaliando e sugerindo valores entre 0,01 e 0,05, indicados como mais realísticos (Ajmal e Kim, 2015).

Yuan et al. (2014) estudaram o comportamento da abstração para 11 bacias hidrográficas localizadas no Arizona, variando o parâmetro de 0,01 a 0,53, sendo que o maior número de bacias se ajustou melhor aos valores entre 0,01 e 0,1; já Woodward et al. (2003) testaram 307 bacias hidrográficas dos Estados Unidos através de dois métodos diferentes, confirmando que o valor mais indicado para o parâmetro é 0,05.

O armazenamento (S), presente nas equações da abstração inicial e precipitação excedente, tem seu valor estimado baseado nos valores de CN, sendo relacionado através da EQUAÇÃO 9:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (9)$$

Os valores de CN foram determinados após a análise de uma determinada quantidade de pequenas bacias hidrográficas, com diferentes tipos de solo e coberturas vegetais, localizadas no sudoeste dos Estados Unidos, estabelecendo assim uma relação entre o tipo e umidade do

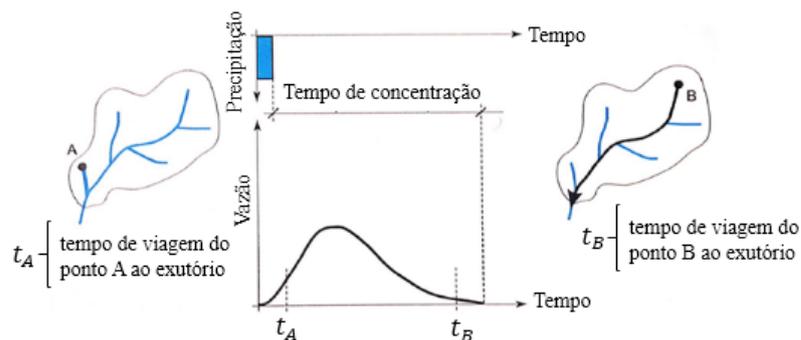
solo e a ocupação da bacia (Canholi, 2005; Durán-Barroso et al., 2016). Variando em uma escala de 0, para coberturas muito permeáveis, a 100 para coberturas completamente impermeáveis, os valores de CN foram tabulados para diferentes combinações, visando a facilidade de utilização do método (Tucci et al., 2003; Ajmal e Kim, 2015; Durán-Barroso et al., 2016).

A determinação desse parâmetro é analisada por diversos pesquisadores, visando adequar o método para a realidade de seus locais de estudo. Tassi et al. (2006) estimaram em seu estudo valores médios para o CN de sub-bacias urbanas do Arroio Dilúvio em Porto Alegre, incluindo a sub-bacia Saint Hilaire, local escolhido para o presente estudo. Schneider e McCuen (2005) informam que alguns fatores como o tamanho da amostra, o coeficiente de abstração inicial e a quantidade de dados são capazes de afetar a precisão das estimativas do CN em simulações.

2.3.3. Hidrograma Unitário

O comportamento padrão do hidrograma de uma bacia (FIGURA 10) depende tanto das características físicas da bacia, quanto da duração e intensidade da chuva em questão (Collischonn e Dornelles, 2013).

FIGURA 10 – RESPOSTA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA A UM EVENTO DE CHUVA DE CURTA DURAÇÃO



FONTE: Adaptado de Collischonn e Dornelles, (2013).

Uma maneira prática de se prever o hidrograma de uma bacia é através do hidrograma unitário (HU). Esse método admite que o HU é a resposta da bacia a uma precipitação efetiva unitária (1 mm ou 1 cm) porém, o método assume que a precipitação possui intensidade constante e é uniformemente distribuída ao longo da bacia, o que não é totalmente correto (Collischonn e Dornelles, 2013; Tucci et al., 2003).

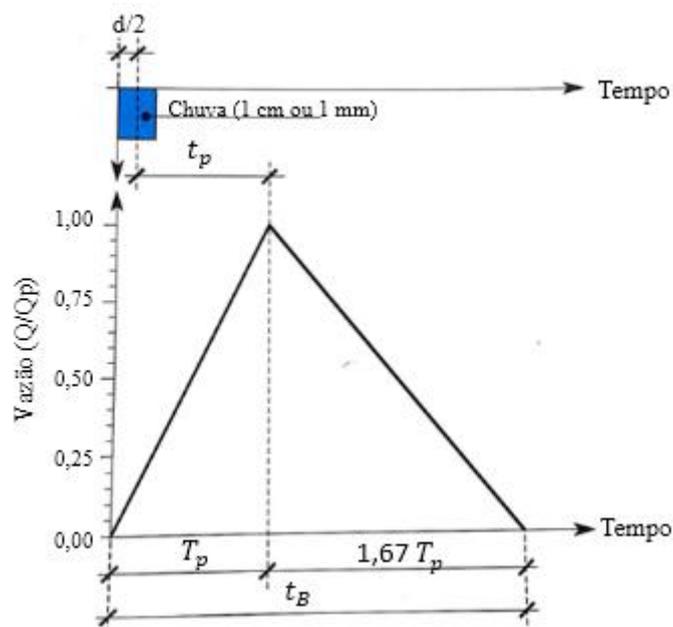
A determinação do HU pode ser feita a partir de dados de chuva e vazão simultâneos ou, como ocorre mais frequentemente, quando não se dispõem de dados, pode-se empregar o hidrograma unitário sintético (HUS) (Collischonn e Dornelles, 2013).

Os HUS foram baseados em bacias experimentais que apresentavam dados de chuva e vazão, sendo que, após serem observados os hidrogramas de várias bacias, foi determinada uma relação entre os parâmetros da forma dos hidrogramas e das características das bacias, geralmente representando-os em forma de triângulo (Collischonn e Dornelles, 2013; Porto, 1995).

Existem três tipos de HUS: os que relacionam as características das bacias hidrográficas com as características dos hidrogramas (tempo de pico, tempo de base, por exemplo); os baseados em modelos de armazenamento da bacia e os baseados em hidrogramas unitários adimensionais como o do SCS (Chow et al., 1994)

O HUS proposto pelo SCS (FIGURA 11) é conhecido por sua forma triangular e é denominado hidrograma unitário sintético triangular (HUT). Resultado da análise de uma série de bacias hidrográficas nos Estados Unidos, o hidrograma é definido por seu tempo de base, tempo de pico e vazão de pico (Porto, 1995).

FIGURA 11 – HUT DE RESPOSTA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA A UM EVENTO DE CHUVA DE CURTA DURAÇÃO



FONTE: Adaptado de Collischonn e Dornelles, (2013).

As EQUAÇÕES de 10 a 13 descritas a seguir são utilizadas para o cálculo do HUT e estão de acordo com o exposto por Chow et al. (1994) e Collischonn e Dornelles (2013):

O tempo de pico (EQUAÇÃO 10) do hidrograma é considerado como sendo 60% do tempo de concentração total da bacia.

$$t_p = 0,6 \cdot t_c \quad (10)$$

Sendo: t_p é o tempo de pico do hidrograma (h); e t_c é o tempo de concentração da bacia (h).

O tempo de ocorrência do pico (EQUAÇÃO 11), ou tempo de subida do hidrograma, é obtido por meio do tempo de pico e da metade do tempo de duração da chuva:

$$T_p = t_c + \frac{d}{2} \quad (11)$$

Sendo: T_p é o tempo de subida do hidrograma (h) e d é a duração da precipitação (h).

O tempo de base do hidrograma é aproximado fazendo uso do tempo de subida, e expresso pela EQUAÇÃO 12:

$$t_b = T_p + 1,67 \cdot T_p \quad (12)$$

Sendo: t_b é o tempo de base do hidrograma (h).

E por fim, a vazão de pico do hidrograma (EQUAÇÃO 13), que leva em consideração a área da bacia e o tempo de subida do hidrograma:

$$q_p = \frac{0,208 \cdot A}{T_p} \quad (13)$$

Sendo: q_p é a vazão de pico do hidrograma (m^3/s) e A é a área da bacia (km^2) e T_p é o tempo de subida do hidrograma (h).

2.3.4. Abordagem Distribuída SCS-CN-HUT

Os processos hidrológicos como a precipitação, infiltração e escoamento são naturalmente variáveis no tempo e espaço. Entretanto, os modelos de simulação hidrológica atualmente empregados não possuem a capacidade de explicar completamente essas variações, devido a restrições computacionais e dos próprios dados (Paudel et al., 2009).

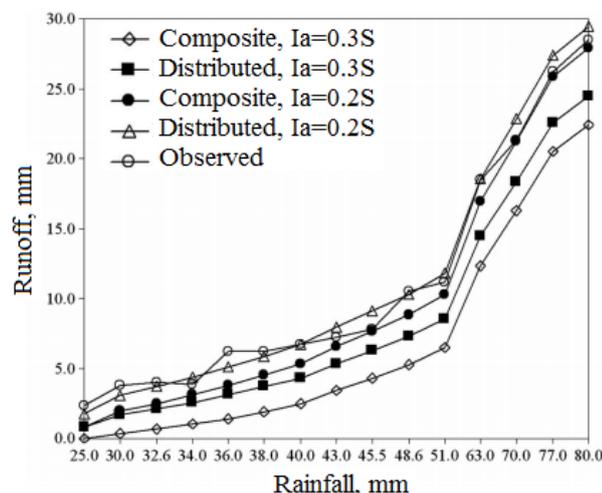
Apesar de dos avanços para minimizar tais restrições, as variações espaciais das propriedades físicas da área de estudo, normalmente bacias hidrográficas, que são diretamente responsáveis pela infiltração e escoamento superficial, são difíceis de serem incorporadas. Dessa forma, as ferramentas SIG utilizadas em modelagens hidrológicas ficaram em atraso, inibindo a aceitação dos modelos que explicam essas variações (Paudel et al., 2009).

A maioria dos modelos utilizados atualmente na modelagem do escoamento das bacias hidrográficas as aborda de forma concentrada, desconsiderando a variabilidade espacial da bacia (Greene e Cruise, 1995). Contudo, a qualidade dos modelos utilizados pode ser significativamente melhorada uma vez que a variação espacial das características das bacias hidrográficas seja incluída (Greene e Cruise, 1995). Diversas são as pesquisas que visam entender o comportamento da abordagem distribuída nos métodos padrões.

Jena et al. (2012) determinaram valores de CN para células individuais ou conjuntos de células na bacia hidrográfica Tarafeni, localizada a oeste de Bengal, Índia. Os autores empregaram quatro diferentes métodos de combinação do CN com a abstração inicial (Ia), sendo dois deles compostos e dois distribuídos, variando o Ia em 0,2 e 0,3. O método composto faz uso do método tradicional desenvolvido pelo SCS, onde o CN é a média ponderada de seus valores para toda a bacia. Já no método distribuído, os valores de CN são determinados para cada célula ou conjunto de células, sendo posteriormente calculado seu escoamento.

Nos resultados dos autores (FIGURA 12), ambos os métodos apresentaram valores menores de escoamento superficial quando comparados com o escoamento superficial observado, e o método distribuído obteve valores de escoamento maiores do que no método composto. Além disso, foi constatado que a abstração inicial 0,3 produziu escoamentos maiores quando utilizada no método distribuído e que, quanto menor o evento de chuva, maior o escoamento. Como conclusão da pesquisa os autores informam que para a área de estudo em questão, o método distribuído com abstração inicial 0,2 foi o que obteve os melhores resultados.

FIGURA 12 – COMPARAÇÃO DE ESCOAMENTO ESTIMADO POR DIFERENTES MÉTODOS DE CN (COMPOSTO E DISTRIBUÍDO) E PARA DIFERENTES VALORES DE ABSTRAÇÃO INICIAL (Ia) COM VALORES OBSERVADOS DE ESCOAMENTO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DE TARAFENI



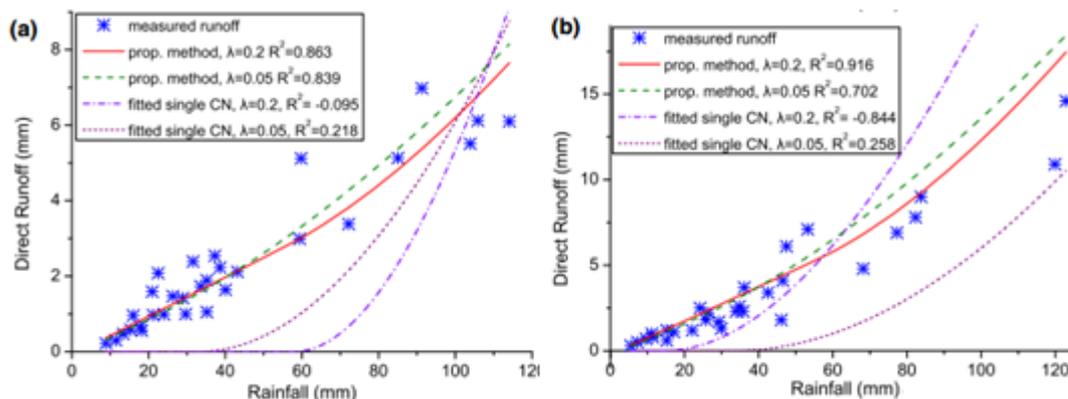
FONTE: Adaptado de Jena et al., (2012).

Seguindo a linha de pesquisa dos valores de CN, Soulis e Valiantzas (2013) analisam a influência de dados de precipitação-vazão na determinação do CN em uma bacia hidrográfica natural, indicando que não é possível atribuir um único valor de CN para toda a bacia.

Tais autores propuseram um método para determinar os valores dos parâmetros do método tradicional do SCS-CN a partir de dados de precipitação de bacias hidrográficas heterogêneas, utilizando para a pesquisa a bacia hidrográfica de Lykorrema, localizada em Attica, Grécia. Além disso, foram utilizados dados de sensoriamento remoto e técnicas de SIG, a fim de fornecer informações sobre as características da bacia hidrográfica, e foram testadas as taxas de abstração inicial padrão do método SCS-CN ($\lambda=0,20$) e uma taxa proposta pela literatura ($\lambda=0,05$).

Analisando os resultados para a parte superior da bacia (FIGURA 13A) e para a bacia total (FIGURA 13B), os autores concluíram que o método proposto fornece melhores previsões de escoamento em comparação com o método do SCS-CN que utiliza apenas um valor de CN, fornecendo previsões adequadas do escoamento da bacia hidrográfica e podendo ser utilizado com diferentes taxas de abstração inicial (λ).

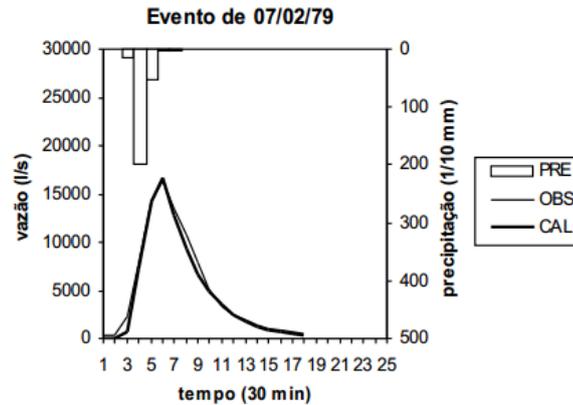
FIGURA 13 – VALORES DE ESCOAMENTO PREVISTOS EM COMPARAÇÃO COM OS VALORES DE ESCOAMENTO ORIGINAIS MEDIDOS PARA A A) PARTE SUPERIOR E B) PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DE LYKORREMA



FONTE: Adaptado de Soulis e Valiantzas (2013).

No Brasil, Silveira e Desbordes (1999) desenvolveram um modelo hidrológico de poucos parâmetros para o estudo do comportamento das cheias da Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio, concluindo que o modelo ajustou-se bem para 67 dos 111 eventos observados na bacia (FIGURA 14). Os eventos que se apresentaram ruins ou regulares mostraram problemas na consistência dos dados ou apresentavam características além da capacidade do modelo, como cheias muito longas.

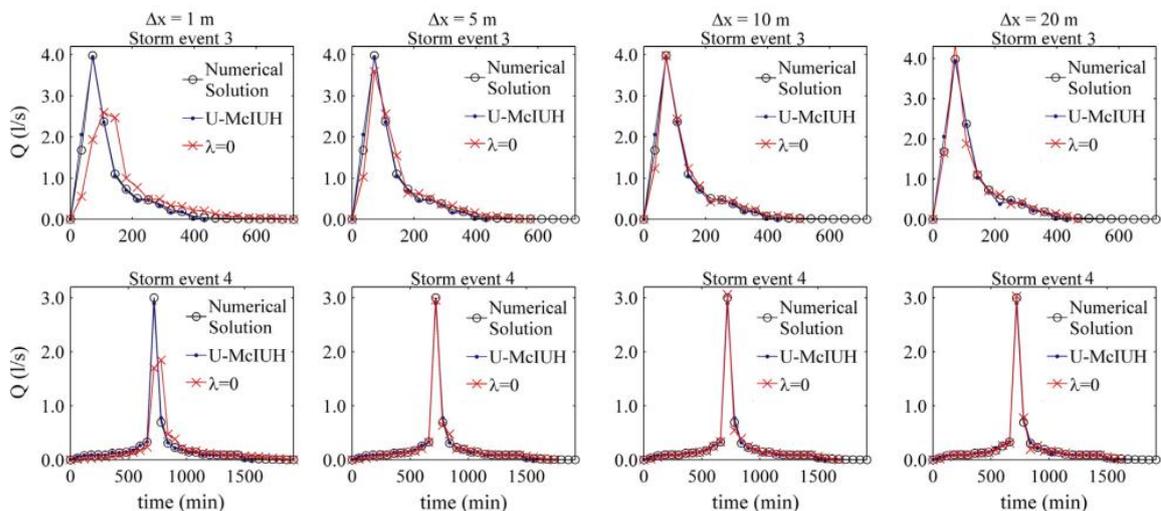
FIGURA 14 – EXEMPLO DE AJUSTE (CHEIA 1)



FONTE: Silveira e Desbordes (1999).

Zuazo et al. (2014) em sua pesquisa investigam o uso de um modelo de tempo de viagem espacialmente distribuído em colinas, buscando compreender as limitações do método, como por exemplo, o efeito de se negligenciar as contribuições do fluxo à montante para a célula onde o tempo de viagem é computado. Após estudar os resultados obtidos (FIGURA 15) com as diferentes associações, considerando as contribuições a montante e não considerando, os referidos autores concluem que os hidrogramas obtidos através do método distribuído com considerações a montante melhor representam os hidrogramas obtidos a partir de soluções analíticas e numéricas, uma vez que desconsiderando as contribuições a montante, tempos de viagem mais lentos e vazões de pico mais baixas são obtidas.

FIGURA 15 – COMPARAÇÃO DOS HIDROGRAMAS GERADOS PELO MODELO NUMÉRICO DA ONDA CINEMÁTICA E AS FORMULAÇÕES DE TEMPO DE VIAGEM ESPACIALMENTE DISTRIBUÍDO QUE CONSIDERAM AS CONTRIBUIÇÕES A MONTANTE E NEGLIGENCIAM-NAS ($\lambda=0$) PARA DIFERENTES RESOLUÇÕES DA GRADE



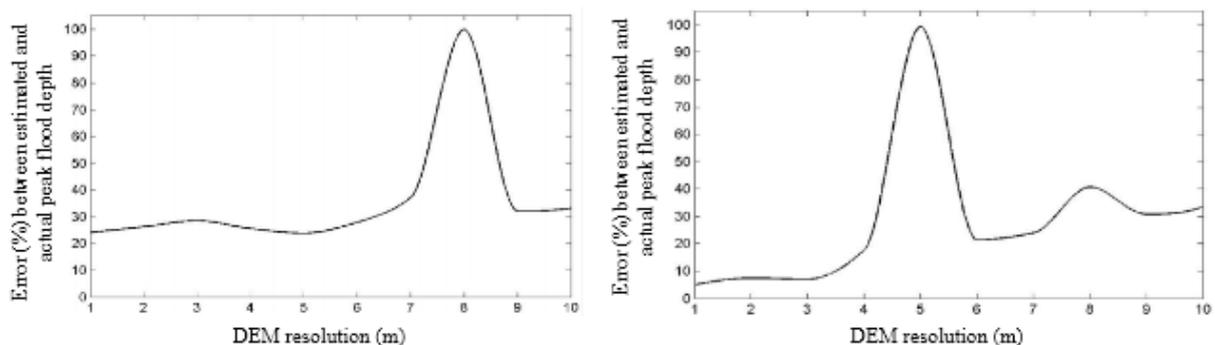
FONTE: Zuazo et al. (2014).

Mais recentemente Abedin e Stephen (2015) relacionam a resolução espacial de MDEs e a resolução temporal de hietogramas na precisão da modelagem de inundações urbanas. A abordagem é elaborada para determinar a resolução espacial ideal para o modelo, utilizando para isso MDEs provenientes de levantamento LiDAR de duas áreas de estudo (Blacklot e East Mall) localizadas na University of Nevada – Las Vegas, além de um evento de chuva com seus respectivos picos de escoamento.

Utilizando MDEs de resoluções espaciais que variam de 1m a 10m, e uma resolução temporal da precipitação de 15 minutos, os picos de escoamento estimados para as diferentes resoluções espaciais foram comparados com os picos dos dados observados, indicando que a precisão do modelo não melhora com o aumento da resolução espacial.

Por meio da FIGURA 16 é possível observar que na área Blacklot o MDE com resolução espacial de 5m é o que produz o menor erro, enquanto que o MDE de 8m é o que produz o maior erro. Já na área de East Mall ocorre o contrário, o maior erro é registrado no MDE de 5m, enquanto o menor erro é atribuído ao MDE de resolução espacial de 1m.

FIGURA 16 – IMPACTO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO MDE SOBRE A PRECISÃO DO MODELO DE INUNDAÇÃO PARA AS ÁREAS DE BLACKLOT E EAST MALL



FONTE: Adaptado de Abedin e Stephen (2015).

Segundo os autores, o comportamento não esperado da resolução espacial na determinação do pico de escoamento é devido às diferenças nas áreas das bacias hidrográficas delineadas através dos diferentes MDEs, sendo essa diferença atribuída ao algoritmo de interpolação dos dados de elevação utilizado pelo GIS.

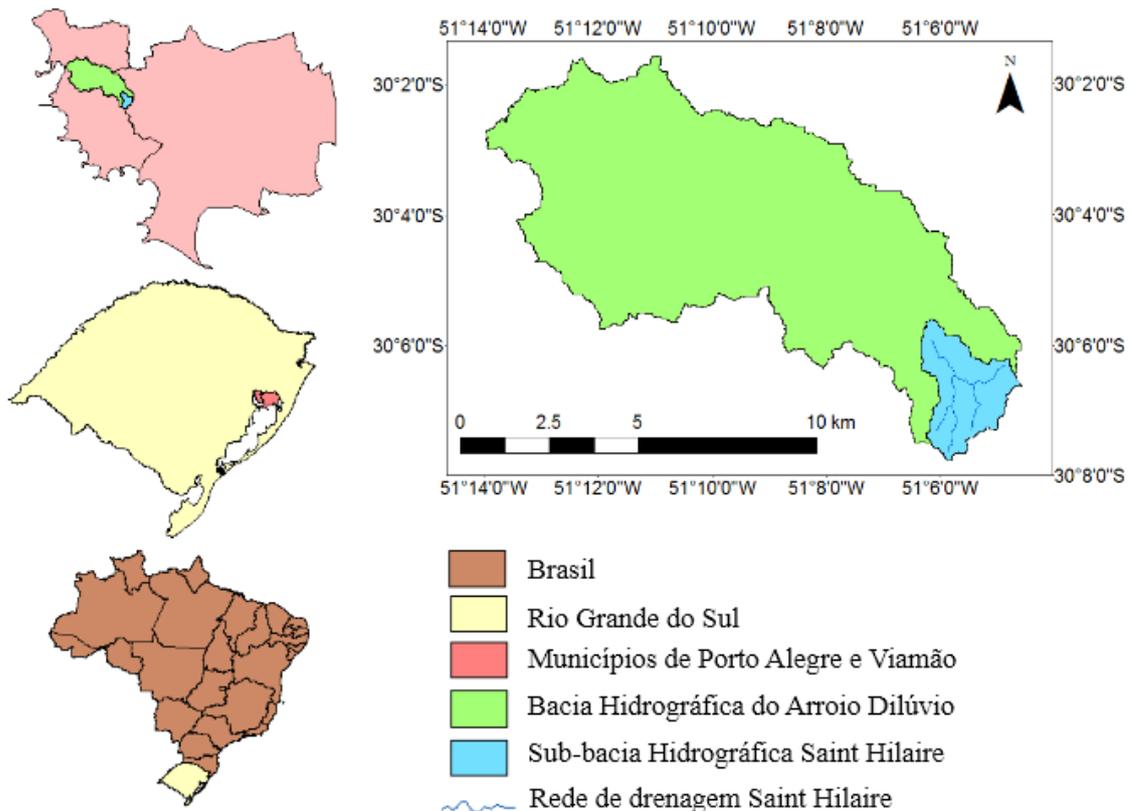
3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. LOCALIZAÇÃO

Com área de drenagem de aproximadamente 83 km², a Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio abrange 36 bairros do município de Porto Alegre, representando 80% de sua área, além da parte localizada no município de Viamão, que abriga as principais nascentes da bacia e representa 20% de sua área total (Programa de Revitalização do Arroio Dilúvio, 2011).

Como parte integrante de suas sub-bacias hidrográficas, a Sub-Bacia Hidrográfica Saint Hilaire (FIGURA 17) ocupa uma área de aproximadamente 6 km² na divisa entre as cidades de Porto Alegre e Viamão, estando inserida quase que totalmente no Parque Natural Municipal Saint Hilaire (Prefeitura de Porto Alegre, 2018a).

FIGURA 17 – LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE



FONTE: A autora (2018).

3.2. ASPECTOS HISTÓRICOS

Arroio Dilúvio

Inicialmente conhecido como Riacho, o Arroio Dilúvio era um rio de pequeno porte, com um curso d'água de cerca de 20 km e nascentes localizadas onde hoje está o Parque Natural Municipal Saint'Hilaire. Suas águas entravam na cidade de Porto Alegre pelos bairros Azenha, Partenon e Santana, desembocando no lago Guaíba (Burin, 2008).

A crescente urbanização da Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio no século XX trouxe consigo a problemática da convivência da população com águas do seu território. Essa problemática fez com que os poderes municipais se preocupassem com a questão higienista do local e prevenção dos prejuízos causados pelos constantes alagamento do Riacho, que por conta de seus transbordamentos constantes lhe rendeu o apelido de Arroio Dilúvio (Decó, 1959; Burin, 2008; Mog, 2014).

Os estudos e projetos com a intenção de solucionar a problemática começaram no ano de 1914, entretanto apenas por volta do ano de 1939 os estudos no Riacho tiveram início, sendo apresentadas duas propostas de canalização (Decó, 1959; Burin, 2008). A primeira defendia que o curso do rio deveria ser mantido, apenas canalizando-o e aumentando sua seção de vazão, enquanto a segunda propunha a retificação do traçado, tentando obter assim uma menor extensão do trecho, com maior declividade e capacidade de vazão (Decó, 1959).

O projeto escolhido então foi o que previa a retificação do Riacho, sendo iniciado no ano de 1939, e finalizado somente na década de 80 (Burin, 2008).

Parque Municipal Natural Saint'Hilaire

Pertencendo inicialmente à Companhia Hidráulica Porto Alegrense, desde 1898 o local era um centro de captação de água para fins de distribuição à população, tendo sido construído, em 1940, a Barragem da Lomba do Sabão, com a intenção de estabelecer um reservatório para melhor atender a captação (Prefeitura de Porto Alegre, 2018a).

Devido à importância hídrica do local e visando a proteção da qualidade ambiental da bacia hidrográfica e suas águas, em 1944 a Prefeitura de Porto Alegre adquiriu a área. Durante o período de 1944 a 1946, antes da criação do parque, a área recebeu cerca de 450 mil árvores de eucalipto, sendo transformada no Jardim Botânico Municipal Saint'Hilaire em 1947 (Prefeitura de Porto Alegre, 2018a).

A partir de 1997 o jardim botânico passou a ser denominado Parque Saint'Hilaire e foi dividido em uma área de preservação permanente e outra de recreação. Já no ano de 2003, o jardim foi enquadrado no Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza, passando a chamar-se Parque Natural Municipal Saint'Hilaire (Prefeitura de Porto Alegre, 2018a).

O parque é conhecido por abrigar mais de 50 nascentes, entre elas as mais distantes do Arroio Dilúvio, e caracteriza-se por conter diferentes variedades de Eucalipto e Pinus, além de uma área de banhado formada após a construção da Barragem da Lomba do Sabão (Prefeitura de Porto Alegre, 2018a).

3.3. ASPECTOS POPULACIONAIS E SOCIOECONÔMICOS

Capital do Estado do Rio Grande do Sul, a cidade de Porto Alegre, com aproximadamente 1.409.351 habitantes (IBGE, 2018), está localizada às margens do Rio Guaíba, principal ponto de contribuição da Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio e importante fonte de captação de água (Mog et al., 2014; Programa de Revitalização da Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio, 2011).

A principal fonte de renda do município tem como sua principal atividade o setor de serviços, que com 85,91% de participação engloba áreas como comércio, saúde e educação, seguido pelos setores da indústria com 14,05% e agricultura com apenas 0,04% no ano de 2013 (Ferreira e Menezes, 2017; IBGE, 2018).

Já o município de Viamão, que se encontra inserido na região metropolitana de Porto Alegre e abriga as principais nascentes da Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio, conta com apenas 239.384 habitantes (IBGE, 2018), caracterizando uma ocupação da bacia com assentamentos mais espaçados, de baixa renda e qualidade de habitação (Mog et al., 2014), e com a mesma fonte de renda do município de Porto Alegre (IBGE, 2018).

Conhecido como Lomba do Pinheiro, o bairro pertencente a região leste do município de Porto Alegre e divisa com o município de Viamão, integra a área urbana da sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire.

Com uma ocupação heterogênea, de núcleos densamente povoados e áreas verde, o bairro que, inicialmente, era dividido em grandes extensões de terra cultivadas e de criação de animais, recebeu a maior parte de seus habitantes a partir das décadas de 1960 e 1970, passando por um processo de expansão industrial e crescimento populacional rápido (Rosa, 2013; Prefeitura de Porto Alegre, 2018b).

Em razão do êxodo rural e do crescimento desordenado das ocupações irregulares, o bairro que em 1970 contava com cerca de 17 mil habitantes elevou sua população para cerca de 40 mil em 1986, incorporando rapidamente a urbanização e declinando as chácaras produtoras de alimento (Rosa, 2013; Prefeitura de Porto Alegre, 2018b).

3.4. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS E CLIMATOLÓGICOS

Localizada na região metropolitana de Porto Alegre, a Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio apresenta uma topografia heterogênea, com seu ponto mais alto a cerca de 300 m de altitude (GERMANO, 1997).

A bacia apresenta um solo e subsolo pobre em variedades, com predominância de rochas graníticas róseas com manchas de granito cinza e porfiroide, sendo seu solo composto por matizes argilo-arenosas e areno argilosas (Irmão Juvêncio, 1958).

Além disso, a vegetação arbustiva antes da ocupação humana na bacia era densa, embora tenha recuado para dar lugar a pequenas lavouras, que quando alcançavam o esgotamento da terra davam lugar a vassourais e macegais, sendo substituídos aos poucos por uma cobertura ciliar rala. O reflorestamento era pouco, quase nulo, contando apenas com alguns eucaliptos esparsos e poucos pomares, nada que lembrasse a abundante flora das encostas porto-alegrenses (Irmão Juvêncio, 1958).

Com clima subtropical úmido, em meados de 1958, a região apresentava uma média anual de 19,5°C, com uma grande amplitude térmica anual que permanece até os dias de hoje, com temperaturas médias superiores a 22°C no mês mais quente, e entre 3°C e 18°C nos meses mais frios, além de uma boa distribuição anual das chuvas e ausência de períodos de estiagem (Irmão Juvêncio, 1958; Germano, 1997; Fujimoto, 2001).

Devido a sua topografia, a precipitação na bacia apresenta uma certa irregularidade na sua distribuição espacial e temporal. Fujimoto (2001) em sua análise dos dados coletados no 8º Distrito de Meteorologia de Porto Alegre para os anos de 1970 a 1999, indica como média anual do período analisado uma pluviosidade de 1.392,8 mm, sendo os anos de 1972, 1987 e 1984 os anos com os maiores índices pluviométricos, com 1.984,6 mm, 1.731,2 mm e 1.677,8 mm, respectivamente, e o anos de 1971, 1978 e 1988 com os menores índices, com 1.122,7 mm, 1.073,2 mm e 1.052 mm, respectivamente.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho está dividido em quatro etapas principais que são apresentadas resumidamente nos itens a seguir e no fluxograma da FIGURA 18, e detalhadas nas próximas seções.

- Etapa A: obtenção dos dados.
- Etapa B: processamento básico dos MDTs e MDE visando a obtenção das redes de drenagem e delimitação das sub-bacias hidrográficas.
- Etapa C: aplicação da abordagem distribuída do método SCS-CN-HUT através das rotinas computacionais *Hidropixel*, compostas pelas rotinas para o cálculo do tempo de deslocamento do escoamento, chuva excedente e aplicação do HUT, tendo sido desenvolvidas em linguagem Fortran pelo grupo de pesquisa ao qual este trabalho está vinculado.
- Etapa D: análise e interpretação dos resultados.

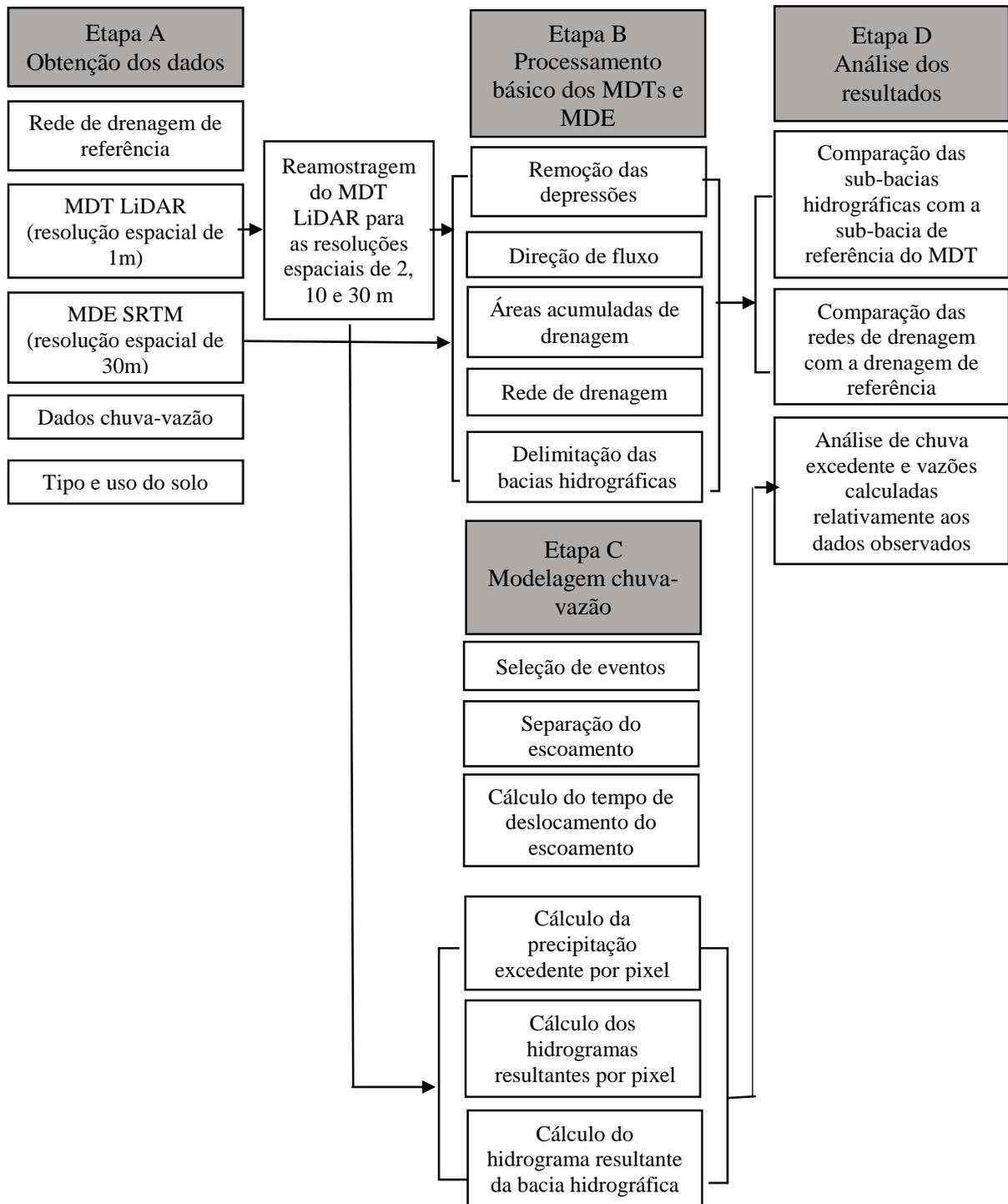
4.1. DADOS DISPONÍVEIS E ANÁLISE PRELIMINAR

Por serem provenientes de diferentes fontes, os dados utilizados na pesquisa necessitaram passar por uma análise preliminar e refinamento, para identificação de inconsistências e seleção de dados, onde foram selecionados os dados que mais se adequavam ao propósito da pesquisa.

4.1.1. Modelo Digital de Elevação

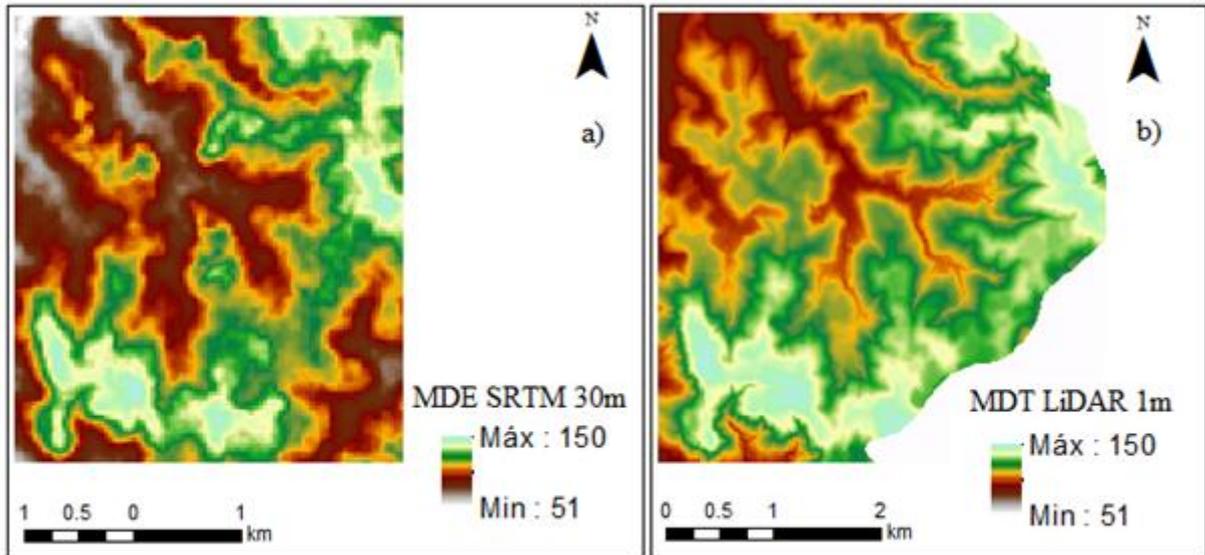
Na pesquisa foram utilizados dois MDEs advindos de fontes diferentes. O MDE proveniente da missão SRTM foi obtido gratuitamente através da plataforma <<http://earthexplorer.usgs.gov/>> com resolução espacial de 30m (FIGURA 19A), sistema de referência GSC_WGSS_1984, sendo reprojetoado para WGS_1984_UTM_Zona_22S. Já os modelos digitais oriundos do LiDAR são provenientes de um perfilamento a LASER realizado na cidade de Porto Alegre (RS) em agosto de 2010 pelo Consórcio Guaíba, e disponibilizados pelo Departamento de Esgotos Pluviais de Porto Alegre (DEP) em formato *geotiff* com resolução espacial de 1m (FIGURA 19B) (Zanardi et al., 2014) e sistema de projeção TM_PoA, sendo reprojetoados para WGS_1984_UTM_Zona_22S.

FIGURA 18 – ETAPAS METODOLÓGICAS



FONTE: A autora (2018).

FIGURA 19 – MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DA REGIÃO ONDE ESTÁ INSERIDA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE A) MDE SRTM COM RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 30M; B) MDT LIDAR COM RESOLUÇÃO ESPACIAL DE 1m



FONTE: A autora (2018).

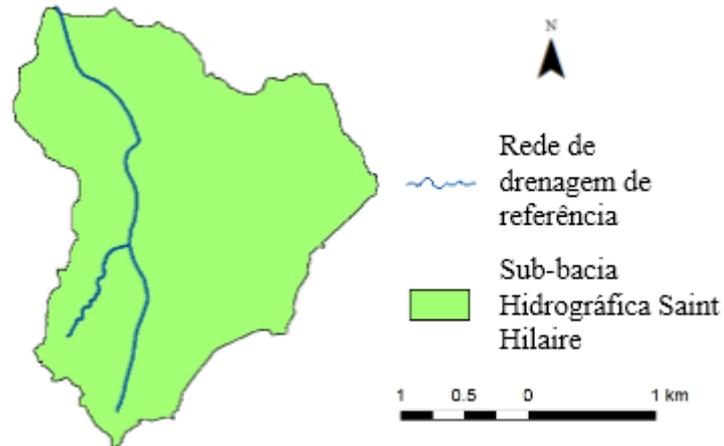
Levando em consideração a exposição de alguns autores (Murphy et al., 2008; Yang et al., 2014), que sugerem que o tamanho da célula de um MDE tem um impacto maior na modelagem hidrológica do que o método pelo qual o modelo digital foi produzido, optou-se por reamostrar o dado LiDAR para as resoluções de 2, 10 e 30m, com o objetivo de agregar as informações do dado original em resoluções mais altas, e avaliar o efeito da variação da resolução espacial. Para isso foi utilizado o método de interpolação bilinear, que realiza a média ponderada dos pixels originais que se localizam ao redor do novo pixel reamostrado.

4.1.2. Rede de drenagem de referência

A drenagem de referência utilizada na etapa de análise dos resultados é proveniente de duas fontes de dados distintas.

Para a análise e comparação dos resultados referentes às redes de drenagem geradas através das diferentes resoluções espaciais empregadas, optou-se por utilizar uma rede de drenagem presente no Plano Diretor de Drenagem Urbana (3ª Etapa), Atualização e Complementação Cadastral no município de Porto Alegre, referente ao Lote 02. O arquivo foi disponibilizado em formato DWG pelo DEP e passou por um processo de tratamento, onde foi reprojetoado para o sistema de projeção WGS_1984_UTM_Zona_22S (FIGURA 20).

FIGURA 20 – REDE DE DRENAGEM DE REFERÊNCIA OBTIDA POR MEIO DOS ARQUIVOS DISPONIBILIZADOS PELO DEP

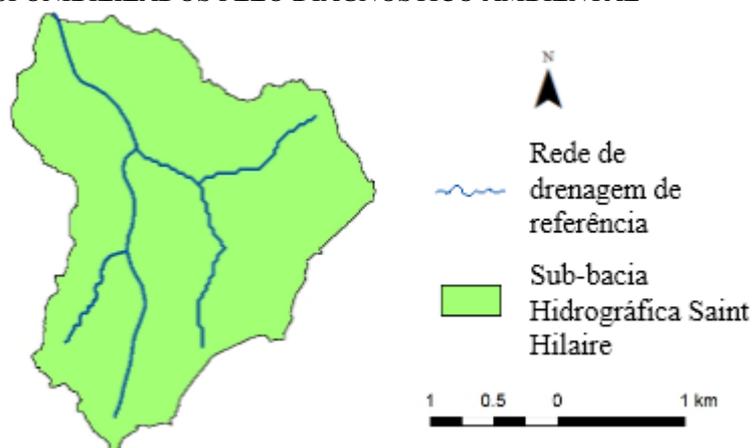


FONTE: A autora (2018).

Para a obtenção dos resultados da abordagem distribuída do método SCS-CN-HUT foi realizada uma simulação inicial com a rede de drenagem da FIGURA 20 e outra simulação com a incorporação à rede de drenagem anterior de mais dois afluentes, obtidos junto ao Diagnóstico Ambiental do Município de Porto Alegre (Hasenack et al., 2008) (FIGURA 21), que passaram por um processo de tratamento similar ao da rede de drenagem proveniente do Plano Diretor, sendo reprojitados de UTM_SAD_69 para WGS_1984_UTM_Zona_22S.

Devido a melhor distribuição dos afluentes na parte menos urbanizada da sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire, os resultados encontrados para os eventos testados, que não são apresentados no presente texto, deixaram clara a maior coerência e melhor eficiência do método distribuído quando empregada a rede de drenagem mais ramificada (FIGURA 21), sendo, portanto, utilizada para os demais eventos.

FIGURA 21 – REDE DE DRENAGEM DE REFERÊNCIA OBTIDA POR MEIO DOS ARQUIVOS DISPONIBILIZADOS PELO DIAGNÓSTICO AMBIENTAL



FONTE: A autora (2018).

4.1.3. Tipo de solo e grupo hidrológico

A definição do tipo de solo da região onde a sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire está inserida é de fundamental importância para a classificação do grupo hidrológico do solo. Essa classificação segue a proposta de Sartori et al. (2005), que relaciona os tipos de solos brasileiro e os tipos de solos adotados pela classificação hidrológica do modelo SCS-CN.

A classificação dos tipos de solo presentes na sub-bacia foi realizada com o auxílio de duas fontes de dados. A primeira, utilizando o mapa de solos da Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA), desenvolvido com base no novo sistema brasileiro de classificação de solos publicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e disponibilizado pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI). E a segunda proveniente do Diagnóstico Ambiental do Município de Porto Alegre, proposta por Hasenack et al. (2008).

Segundo a classificação da EMBRAPA, a região da sub-bacia encontra-se em um local com argissolos vermelho-amarelo, o que de acordo com os grupos hidrológicos propostos por Sartori et al. (2005), define a região como pertencente ao grupo B, composto por argissolos vermelho e argissolos vermelho-amarelo, de grande profundidade e com moderada taxa de infiltração e resistência a erosão, além de textura argilosa ou arenosa ao longo de seu perfil.

A outra fonte acessada, referente a Hasenack et al., (2008), classificaram o solo do local em argissolos vermelhos ou argissolos vermelho-amarelos com cambissolos háplicos, o que enquadra a região tanto no grupo hidrológico B quanto no grupo hidrológico C, sendo esse composto por solos profundos ou pouco profundos, com baixa taxa de infiltração e resistência a erosão, além de mudança textural abrupta.

Analisando as duas classificações propostas, optou-se pela utilização do grupo hidrológico B, devido a predominância desse nas duas fontes de dados utilizadas.

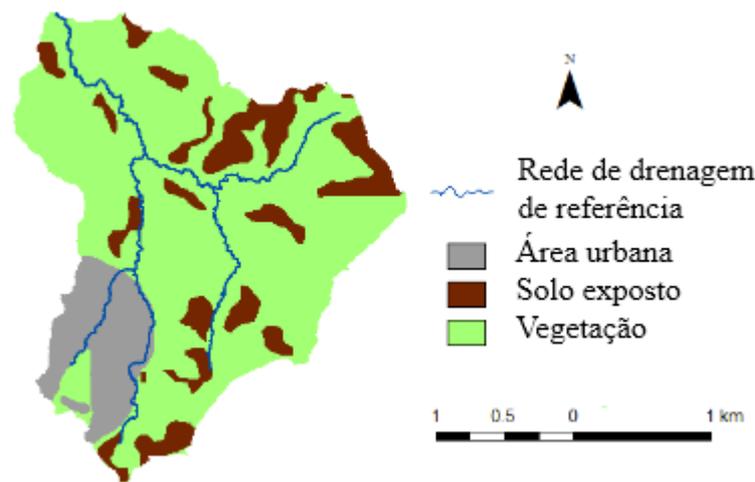
4.1.4. Uso e cobertura do solo

A situação do uso e cobertura do solo na sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire foi obtida com base no trabalho de Costa (2017), que elaborou o mapa de uso do solo para toda a extensão da Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio por meio de imagens com resolução espacial de 30m, provenientes do satélite/sensor Landsat-5/TM (bandas espectrais 3, 4 e 5) e disponibilizadas gratuitamente no site Global Land Cover Facility, com passagem em 23 de agosto de 1987, data mais próxima ao período em que foram coletados os dados de precipitação e vazão utilizados na pesquisa.

Costa (2017) empregou a técnica de Máxima Verossimilhança (MAXVER), onde cada pixel recebeu o atributo de apenas uma das quatro classes determinadas: corpos hídricos, vegetação, área urbana e solo exposto. O autor analisou visualmente e atestou a coerência de seus resultados para a Sub-Bacia Hidrográfica Cascata I, integrante da Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio, com o exposto por Alves (2004), que realizou a classificação do uso do solo para toda a Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio com imagens do satélite/sensor Landsat-5/TM do ano de 1987.

Entretanto, analisando visualmente o mapa de uso do solo da bacia gerado por Alves (2004) e Costa (2017), apesar da coerência entre os dois resultados, na área onde a sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire está localizada percebem-se manchas urbanas e de solo exposto não condizentes com a época do estudo, necessitando assim realizar um ajuste no mapa gerado por Costa (2017), onde foi suprimida a classe corpos hídricos e melhorada a delimitação das demais. Dessa forma a caracterização da sub-bacia Saint-Hilaire atendeu melhor a realidade da época na qual os dados foram coletados (FIGURA 22).

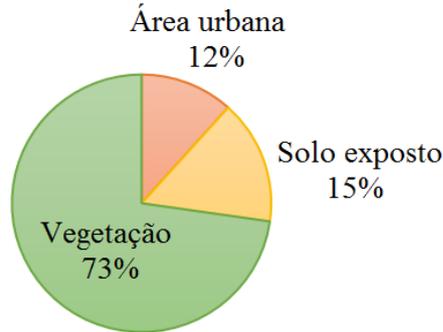
FIGURA 22 – USO E COBERTURA DO SOLO NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE



FONTE: A autora (2018).

Parte da sub-bacia abriga o Parque Natural Municipal Saint Hilaire, no município de Viamão, sendo assim, a maior parte da área da sub-bacia é formada por áreas verdes. O restante da bacia divide seu espaço entre área urbana, localizada já no município de Porto Alegre, e solo exposto. A FIGURA 23 apresenta as porcentagens de cada uso do solo em relação à área da bacia para o MDT LiDAR 1m.

FIGURA 23 – USO DO SOLO NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE: PORCENTAGEM EM RELAÇÃO À ÁREA TOTAL DA BACIA

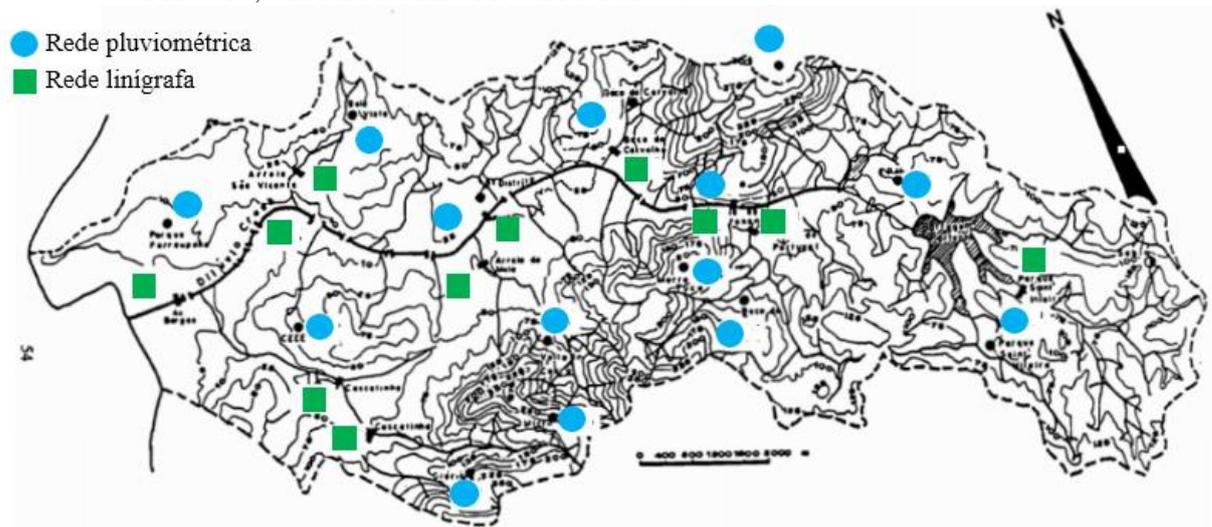


FONTE: A autora (2018).

4.1.5. Dados observados de precipitação e vazão

Os dados hidrológicos disponíveis para a Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio são datados do período de 1978 a 1982, quando a bacia atingia cerca de 50% de urbanização, e chegou a ser monitorada por 11 linígrafos e 14 pluviógrafos, representados na FIGURA 24 pelas letras H e P, respectivamente (Silveira, 2000).

FIGURA 24 – REDES LINÍGRAFA (H) E PLUVIOGRÁFICA (P) DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO DILÚVIO, GERADAS PELO PROJETO DILÚVIO



FONTE: Adaptado de Silveira (1996).

A rede linígrafa operava com equipamentos flutuantes, providos de uma boia, que devido a sua autonomia semanal registravam em papel os valores observados a cada 30 minutos. Os dados obtidos foram posteriormente digitalizados, porém nem todos os postos apresentaram séries contínuas ou isentas de erros, possivelmente provocadas por panes no sistema ou imprevistos diversos (Silveira, 1996; Silveira, 2000).

A rede pluviográfica trabalhou com um total de 14 pluviógrafos, dos quais 12 foram instalados para o projeto e registravam cerca de 80% da chuva no local. A autonomia da maioria dos aparelhos era semanal, com uma resolução temporal de 30 minutos, o que era compatível com a dos linígrafos. Entretanto, essa resolução não foi ideal para todas as sub-bacias envolvidas no projeto devido à rapidez dos eventos de cheia em áreas urbanizadas da bacia (Silveira, 1996; Silveira, 2000).

Para o desenvolvimento deste estudo na sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire estão disponíveis 32 eventos de chuva e vazão, sendo 18 selecionados para serem trabalhados na presente pesquisa, como explicado adiante no item 4.3.

4.2. PROCESSAMENTO BÁSICO DO MDE

Os modelos digitais de elevação utilizados na pesquisa são provenientes de duas fontes de dados distintas, sendo um obtido por meio de dados de radar orbital (SRTM), e outro através de laser aerotransportado (LiDAR).

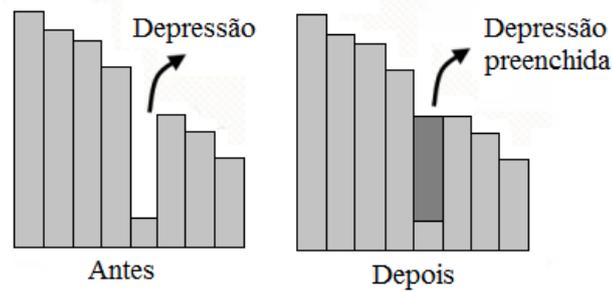
Esses produtos podem conter falhas advindas do seu método de captura, e para que possam ser utilizados para a modelagem hidrológica adotada neste trabalho é necessário que inicialmente sejam realizados alguns procedimentos de tratamento, que são descritos a seguir.

4.2.1. Métodos e parâmetros

Os modelos advindos de sensores remotos podem conter falhas em áreas do globo, comumente chamadas de falsas depressões, que são pontos com elevação superior ou inferior aos seus vizinhos.

As causas estão relacionadas à ocorrência de corpos hídricos que produzem um espalhamento do sinal, à ocorrência de relevos acidentados que aumentam a frequência dos dados devido ao sombreamento e pela presença de nuvens no local de captura da imagem, fazendo com que os modelos necessitem passar por um processo de remoção para que não interfiram na extração das redes de drenagem (FIGURA 25) (Luedeling et al., 2007; Sobrinho et al., 2010; O'Callaghan e Mark, 1984).

FIGURA 25 – PREENCHIMENTO DE FALSAS DEPRESSÕES



FONTE: Adaptado de Sobrinho (2010).

Após a remoção das depressões, a matriz das direções de fluxo dos modelos digitais é gerada seguindo o modelo D8, que através da análise das cotas do terreno indica uma entre oito possíveis direções para a água (Tarboton e Ames, 2001). A partir dessa matriz é realizada a obtenção das áreas acumuladas de drenagem, cuja apresentação também se dá em formato matricial, onde cada pixel recebe um valor indicativo da sua contribuição no escoamento (Fan et al., 2013).

Em uma próxima etapa, a matriz das áreas acumuladas é reclassificada de acordo com uma área mínima de drenagem ($Amín$), que indica a área necessária para que se tenha início um curso d'água, lembrando que a adoção de valores baixos resulta na criação de uma rede de drenagem mais ramificada, enquanto que na escolha de valores mais altos apenas os maiores rios são incluídos (Fan et al., 2013).

Para a pesquisa, o valor da $Amín$ foi determinado de forma que a ramificação da drenagem gerada estivesse o mais próximo possível da drenagem de referência, lembrando que esse procedimento foi realizado para as cinco resoluções espaciais empregadas.

A $Amín$ foi então escolhida com base na quantidade de pixels para o MDT LiDAR 1m, sendo adotada a $Amín = 27.000$ pixels ($0,027 \text{ km}^2$), que foi mantida para as demais resoluções espaciais adaptando o valor de acordo com a variação do número de pixels (TABELA 1).

TABELA 1 – $AMÍN$ DEFINIDA PARA CADA RESOLUÇÃO ESPACIAL EMPREGADA NA PESQUISA

Resolução espacial em análise	Quantidade de pixel da sub-bacia	$Amín$ (km^2)	$Amín$ (pixels)
MDT LiDAR 1m	5.833.505	0,027	27.000
MDT LiDAR 2m	1.458.951	0,027	6.750
MDT LiDAR 10m	58.110	0,027	270
MDT LiDAR 30m	6.468	0,027	30
MDE SRTM 30m	6.368	0,027	30

FONTE: A autora (2018).

A etapa final do processamento básico foi a obtenção da delimitação da bacia hidrográfica que, assim como os demais passos, é executada com o auxílio de softwares de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), com a prévia definição da localização do seu exutório.

O local foi determinado com o auxílio de imagens do Google Earth e a sobreposição das redes de drenagem disponíveis, sendo utilizada a mesma localização para as cinco resoluções espaciais empregadas.

4.2.2. Comparação entre MDEs

Conforme o exposto no item 4.1.1, para fins de comparação optou-se por utilizar modelos digitais provenientes de duas fontes de dados distintas, sendo um deles o SRTM, um MDE de moderada resolução espacial (30m), e o LiDAR, um MDT de alta resolução espacial (1m), que foi reamostrado para as resoluções de 2, 10 e 30 m com o objetivo de apresentar o efeito dessa variação.

Apesar de todos serem considerados MDEs, existe uma pequena diferença de nomenclatura entre eles. Enquanto o MDE representa a elevação do terreno em análise, juntamente com tudo o que há sobre a superfície, como edificações e vegetação, o MDT é uma representação apenas das cotas do terreno, ou seja, sem considerar os valores de cotas de objetos que possam estar acima do terreno.

Para analisar a diferença de altitude dos modelos utilizados na pesquisa, tanto os originais quanto os reamostrados, uma alternativa empregada é a análise através de histogramas, que são gráficos que representam a frequência de ocorrências individuais de determinada característica, porém dividida em classes.

Sendo assim, optou-se por apresentar histogramas analisando a frequência de ocorrência de classes de valores de altitude para cada uma das cinco resoluções espaciais empregadas, além de uma comparação entre o MDS e MDT LiDAR 1m com a intenção de apresentar a diferença de altitudes do modelo digital de superfície, que contém tanto vegetação quanto edificações, e do modelo digital de terreno, que representa o solo nu.

4.2.3. Avaliação das sub-bacias hidrográficas e redes de drenagem

Sub-bacias hidrográficas

Para a análise quantitativa das sub-bacias hidrográficas geradas, ao contrário da rede de drenagem utilizada como referência, não foi possível localizar uma sub-bacia hidrográfica de referência para a área de estudo, dessa forma optou-se por empregar como referência a sub-bacia gerada pelo processamento do MDT LiDAR 1m, tendo em vista o fato de esse ser o dado com a maior resolução espacial empregada.

De posse dos resultados, procedeu-se à inspeção visual da delimitação das sub-bacias, observando em quais pontos ocorriam as maiores discrepâncias quando comparadas as sub-bacias geradas por cada resolução espacial com a sub-bacia de referência.

A delimitação das sub-bacias foi também analisada por meio do erro de comissão, que representa os pixels que fazem parte da sub-bacia em análise, mas não da sub-bacia de referência, e do erro de omissão, que contabiliza os pixels que fazem parte da sub-bacia de referência, mas não da bacia em análise.

Com a intenção de melhorar a visualização da diferença de área e perímetro das sub-bacias analisadas e de referência, foi calculada a Diferença Relativa das áreas através da EQUAÇÃO 14.

$$Diferença\ relativa = \frac{Simulado - Observado}{Observado} * 100\% \quad (14)$$

Redes de drenagem

A avaliação das redes de drenagem de diferentes resoluções espaciais e geradas a partir das diferentes fontes de dados foi realizada de forma quantitativa e qualitativa, através de diferentes critérios e métricas, utilizando como referência a rede de drenagem presente no Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre, como exposto no item 4.1.2.

Apesar do estudo realizado para a escolha da rede de drenagem de referência, não é possível atestar a sua exatidão nem a considerar como verdade absoluta, desse modo, as análises citadas abaixo foram feitas em relação a esse referencial.

Para a avaliação das redes de drenagem foi necessário realizar um levantamento de seus comprimentos, tanto da rede de drenagem total quanto do canal principal. Os resultados encontrados foram utilizados na aplicação das diferentes métricas de comparação.

A primeira avaliação realizada, de cunho qualitativo, foi a inspeção visual das redes de drenagem geradas pelas diferentes resoluções espaciais. Nessa abordagem realizou-se uma análise comparativa entre os traçados das redes geradas e da rede de referência, observando sua similaridade no traçado, e julgando visualmente a coerência das redes geradas pelas resoluções empregadas na pesquisa ao reproduzir o traçado da rede de referência.

A segunda métrica utilizada foi a do *buffer*, na qual um polígono de largura pré-estabelecida é desenhado ao redor do objeto tido como verdadeiro, nesse caso ao redor da rede de drenagem de referência, sendo calculada a porcentagem da rede de drenagem analisada que se encontra inserida no *buffer*.

Essa métrica é utilizada por permitir que o traçado da rede de drenagem obtida através do MDE não siga exatamente o traçado da rede de drenagem de referência, o que é compreensível, uma vez que o real fluxo do rio engloba toda a sua largura, além da possibilidade de a rede de drenagem de referência ser inexata (Sousa e Paz, 2017).

A principal deficiência do método é a sua forma de definição da largura da *buffer*, que não chega a um consenso na literatura científica, fazendo com que certos autores relacionem o limite do *buffer* com o tamanho do pixel (Sousa e Paz, 2017). Zhou e Chen (2011), por exemplo, utilizam como limite 1 pixel da resolução espacial empregada na pesquisa (5m), enquanto Vogt et al. (2003) testaram *buffers* de 1, 2 e 4 pixels da resolução espacial empregada (250m).

Desse modo, foram utilizadas diferentes larguras de *buffer* para avaliar a influência da resolução espacial na qualidade da caracterização das redes de drenagem. Os valores empregados variam de acordo com o tamanho do pixel de cada resolução espacial, sendo ainda utilizada uma segunda abordagem, na qual um valor de *buffer* foi considerado para todas as resoluções espaciais (TABELA 2).

TABELA 2 – VALORES DE BUFFER APLICADOS À REDE DE DRENAGEM TOMADA COMO REFERÊNCIA

Resolução espacial da rede de drenagem em análise	Largura do <i>buffer</i> (m)	
	<i>Buffer</i> = dx	<i>Buffer</i> constante
MDT LiDAR 1m	1	30
MDT LiDAR 2m	2	30
MDT LiDAR 10m	10	30
MDT LiDAR 30m	30	30
MDE SRTM 30m	30	30

FONTE: A autora (2018).

A terceira métrica empregada analisa a distância média entre as redes de drenagem, sendo ela a representação do quanto a rede de drenagem em análise está distante da rede de referência. Quanto maior o valor encontrado para a distância média, mais distantes estão as redes de drenagem e quanto menor o valor encontrado mais próximas estão as redes.

A distância média entre as redes de drenagem é calculada pela razão entre o somatório das áreas formadas entre as redes de drenagem (a rede em análise e a de referência) e o comprimento total da rede de drenagem de referência para o trecho analisado (Chen et al., 2012).

Com os valores de comprimento de cada rede de drenagem foi possível calcular também a diferença relativa do comprimento total e do rio principal, comparando-os com a rede de drenagem de referência através da EQUAÇÃO 14, e a sinuosidade do curso d'água principal em cada resolução espacial, fazendo uso da EQUAÇÃO 15, que relaciona o comprimento do rio principal (L_c) com a distância em linha reta entre a nascente e a foz (d_c).

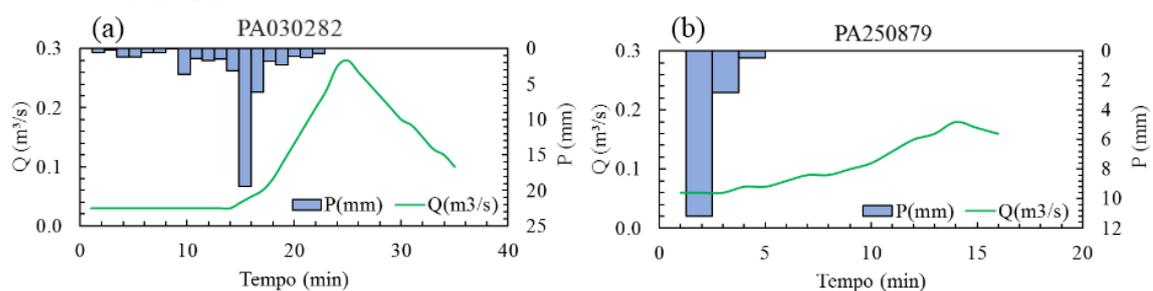
$$S_c = \frac{L_c}{d_c} \quad (15)$$

4.3. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS CHUVA-VAZÃO

A sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire dispõe de 32 eventos de precipitação e vazão, discretizados em um intervalo de tempo de 30 minutos e datados do levantamento realizado nas décadas de 70 e 80.

Para a utilização na abordagem distribuída do método SCS-CN-HUT, os eventos passaram por um processo de triagem e divisão em dois grupos, no primeiro grupo reuniram-se 18 eventos que atendiam às características de um hidrograma completo (ascensão e recessão) (FIGURA 26A) e no segundo grupo 14 eventos que não atendiam tal critério (FIGURA 26B).

FIGURA 26 – EXEMPLO DE EVENTOS (A) SELECIONADOS NA TRIAGEM E (B) DESCARTADOS NA TRIAGEM



FONTE: A autora (2018).

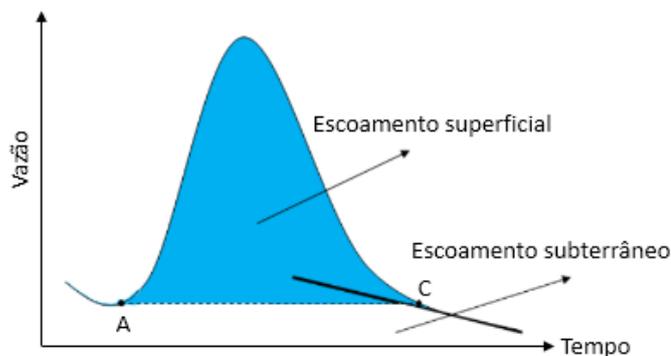
Separação do escoamento

Para determinar o volume e duração de um evento de inundação é necessário realizar a separação do escoamento de base e do escoamento direto. Após a separação vários atributos dos eventos, como pico, volume e duração, podem ser calculados e utilizados em análises mais detalhadas das bacias hidrográficas (Bezak et al., 2015).

Para os eventos selecionadas da sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire, o método SCS-CN-HUT distribuído demandou que fosse realizado a separação do escoamento superficial, que foi efetuada por meio do método gráfico.

O método gráfico de inspeção visual (FIGURA 27) empregado é considerado o procedimento mais simples para a obtenção do ponto de início do escoamento superficial, ponto A, e do ponto que indica o término do escoamento superficial e início do escoamento subterrâneo, ponto C. De acordo com Tucci et al. (2003), o método tem como base a plotagem das vazões em escala mono-log pois, como a recessão segue uma equação exponencial, quando utilizada a escala logarítmica ela passa a seguir uma reta, e o ponto C é identificado quando ocorre uma mudança considerável da declividade dessa reta.

FIGURA 27 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DE OBTENÇÃO DO ESCOMANETO SUPERFICIAL

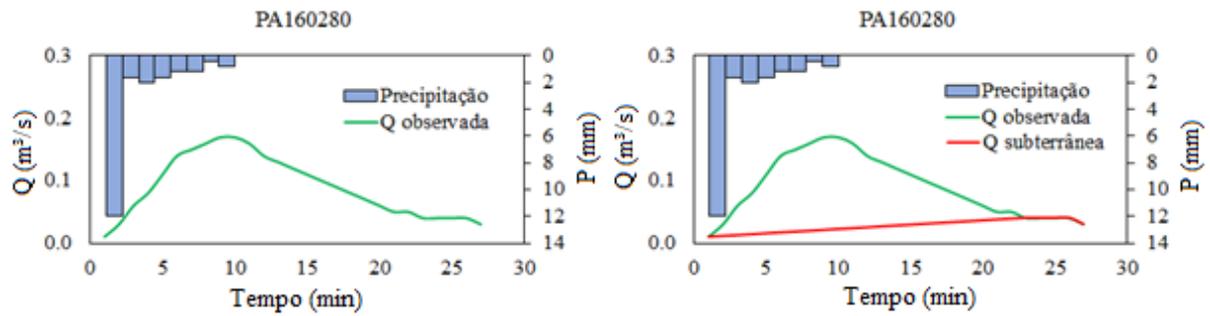


FONTE: Adaptado de Costa (2017).

Visando a otimização da separação dos escoamentos, foi utilizada a rotina computacional *Hydrosep* desenvolvida por Costa (2017) para o software MatLab®, que separou a vazão observada dos eventos selecionados em vazão subterrânea e vazão superficial, vazão essa que foi posteriormente analisada com as vazões calculadas para as cinco resoluções espaciais empregadas e seus 18 eventos selecionados.

A FIGURA 28 é utilizada para ilustrar a separação do escoamento de um dos eventos utilizados, sendo apresentadas a vazão observada e a separação em vazão subterrânea e superficial.

FIGURA 28 – EXEMPLO DE SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO E SUPERFICIAL



FONTE: A autora (2018).

Caracterização dos eventos

Além da separação do escoamento, a rotina *Hydrosep* fornece algumas características básicas de cada evento, como precipitação total, duração do evento, tempo de concentração, intensidade de precipitação (EQUAÇÃO 16), precipitação efetiva (EQUAÇÃO 17), vazão de pico, tempo de pico e coeficientes de escoamento global (EQUAÇÃO 18) e superficial (EQUAÇÃO 19), que são apresentados posteriormente.

$$I = \frac{P}{\Delta t} \quad (16)$$

$$P_{efetiva} = \left(\frac{\sum_1^i Q_{sup} \cdot \Delta t}{A \cdot 10^6} \right) \quad (17)$$

$$C_{global} = \left(\frac{\sum_1^i Q_{obs} \cdot \Delta t}{(P_{total} \cdot 0,001) \cdot A \cdot 10^6} \right) \quad (18)$$

$$C_{superficial} = \left(\frac{\sum_1^i Q_{sup} \cdot \Delta t}{(P_{total} \cdot 0,001) \cdot A \cdot 10^6} \right) \quad (19)$$

Sendo: I é a intensidade (mm/h); $P_{efetiva}$ é a precipitação efetiva (mm); P_{total} é a precipitação total (mm); C_{global} é o coeficiente de escoamento global (inclui escoamento superficial e subterrâneo); $C_{superficial}$ é o coeficiente de escoamento superficial; Δt é a variação do tempo (segundos); Q_{obs} é a vazão observada (m^3/s) e Q_{sup} é a vazão superficial (m^3/s).

O tempo de concentração observado para cada evento, considerando a vazão superficial, foi calculado com o auxílio da separação do escoamento realizada pela rotina *Hydrosep*. O resultado foi obtido através da subtração do tempo onde foi localizado o ponto de inflexão da recessão do hidrograma superficial, e o tempo onde foi medida a última precipitação, ambos fornecidos pela rotina.

4.4. CÁLCULO DO TEMPO DE DESLOCAMENTO

A determinação do tempo de deslocamento da água segue a metodologia proposta pelo SCS-CN-HUT adaptada ao nível de pixel, apresentando duas equações distintas, que variam conforme as características do local para onde está sendo realizado o cálculo, uma para escoamentos em superfície e outra para escoamentos em canal.

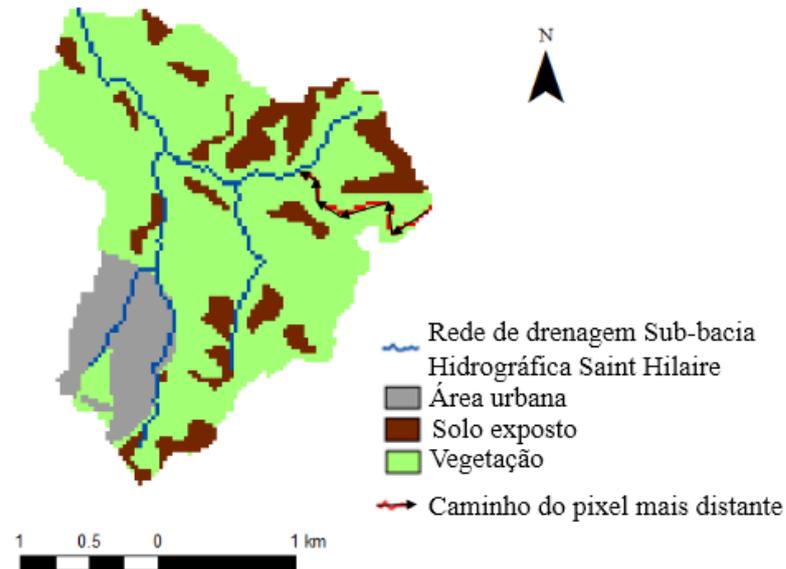
4.4.1. Ajuste inicial dos Coeficientes de Manning

Determinado em função do uso do solo, o ajuste dos valores do coeficiente de rugosidade de Manning (η) para a sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire foi feito via estimativa dos valores de tempo de concentração observado e calculado. O cálculo, em ambos os casos, foi realizado de forma tradicional, ou seja, considerando o ponto de contribuição mais distante da sub-bacia.

Como exposto no item 4.3, o cálculo do tempo de concentração de cada evento, para os dados observados, foi feito através da diferença entre o tempo de ocorrência do ponto C (FIGURA 27) da separação do escoamento e do tempo de ocorrência da última precipitação.

Para confrontar os resultados obtidos para o tempo de concentração observado, foi realizada uma simulação por meio das rotinas computacionais *Hidropixel* e do MDT LiDAR 30m, que forneceu como resultado o tempo de deslocamento do escoamento de cada pixel da sub-bacia, além de um indicativo do ponto de contribuição mais distante (FIGURA 29), permitindo assim a obtenção do tempo de concentração calculado pelo método tradicional.

FIGURA 29 – CAMINHO DO PIXEL COM MAIOR TEMPO DE DESLOCAMENTO ATÉ O CURSO D'ÁGUA MAIS PRÓXIMO



FONTE: A autora (2018).

O cálculo do tempo de concentração através do método tradicional envolve duas equações, uma para escoamentos em canal (EQUAÇÃO 4) e outra para escoamentos em superfície (EQUAÇÃO 5). Sendo assim, é necessário obter a declividade e o comprimento do trecho que vai do pixel mais distante até o curso d'água mais próximo (trecho superfície – canal, indicado pelas setas e pixels em vermelho), e do trecho que vai do ponto onde o pixel de superfície se encontra com o curso d'água até o exutório (trecho canal – indicado pelos pixels em azul).

A declividade S_{pn} é estimada pela EQUAÇÃO 20, com o auxílio do MDT LiDAR 30m e dos produtos gerados pela rotina computacional empregada para a determinação do caminho do pixel mais distante.

$$S = \frac{C_i - C_f}{L} \quad (20)$$

Sendo: S é a declividade do trecho (m/m); C_i é a cota do pixel do início do trecho (metros); C_f a cota do pixel final do trecho (metros) e, L é o comprimento do trecho (metros) obtido a partir do traçado da rede de drenagem.

Os resultados encontrados para cada trecho são apresentados na TABELA 3:

TABELA 3 – VALORES DE COMPRIMENTO E DECLIVIDADE DO PIXEL MAIS DISTANTE PARA OS TRECHOS DE SUPERFÍCIE E CANAL DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE

Trecho	Comprimento (m)	Declividade (m/m)
Superfície – canal	1496,10	0,041
Canal	2570,07	0,009

FONTE: A autora (2018).

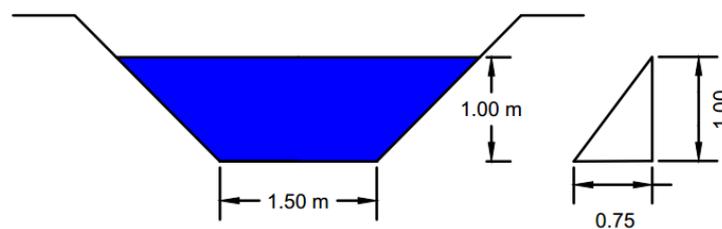
Além do comprimento e declividade de cada trecho, é necessário definir a seção transversal do canal, que foi estimada de forma qualitativa devido à pouca informação disponibilizada sobre a parte não canalizada do Arroio Dilúvio, local onde está inserida a sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire.

Grimaldi et al. (2012) reforçam que a principal causa de incertezas desse método é o envolvimento de várias hipóteses geométricas na definição do raio hidráulico da seção do canal.

Apesar de não ser ideal considerar de forma homogênea as características da seção transversal, devido à influência nos resultados, estudos como o de Fang et al. (2007) e Grimaldi et al. (2012) também utilizam valores fixos para os trechos com a intenção de simplificar o cálculo do tempo de deslocamento da água, além de adotarem uma seção transversal que possui uma forma geométrica constante e simplificada, representada geralmente por um trapézio, retângulo ou triângulo.

Sendo assim, foi considerado que todos os trechos possuem uma seção trapezoidal, com as dimensões apresentadas na FIGURA 30.

FIGURA 30 – SEÇÃO TRANSVERSAL ADOTADA EM TODOS OS TRECHOS DA REDE DE DRENAGEM



FONTE: A autora (2018).

Devido ao fato de o caminho do pixel mais distante até o exutório percorrer apenas áreas de vegetação, apenas o coeficiente de Manning referente à superfície com vegetação foi ajustado, sendo os valores do coeficiente de Manning para área urbana e solo exposto estimados com base nos valores recomendados por Canholi (2005) (TABELA 4). Para a área urbana optou-se por utilizar o valor de 0,024, referente a áreas pavimentadas, e para o solo exposto o valor de 0,13, utilizado na literatura para plantações rasteiras.

TABELA 4 – COEFICIENTE DE MANNING (η) ADOTADOS PARA ÁREA URBANA E SOLO EXPOSTO

Uso e ocupação do solo	Coefficiente de Manning (η)
Asfalto liso	0,011
Concreto liso/rugoso	0,012
Pisos cerâmicos	0,015
Pavimento intertravado/paralelepípedo	0,024
Gramados (esparcos/densos)	0,15/0,24
Vegetação arbustiva (leve/densa)	0,40/0,80
Plantações rasteiras (normais)	0,13

FONTE: Adaptado de Canholi (2005).

Para a vegetação, que ocupa mais de 70% da área da sub-bacia (FIGURA 23), o coeficiente de rugosidade de Manning foi estimado analisando os valores de tempo de concentração observado e calculado, obtidos de acordo com a abordagem tradicional, ou seja, considerando o ponto de contribuição mais distante da sub-bacia e aplicando as EQUAÇÕES 4 e 5 com o auxílio do MDT LiDAR 30m.

Inicialmente baseado na literatura, o coeficiente da vegetação teve seu valor analisado por meio de duas abordagens:

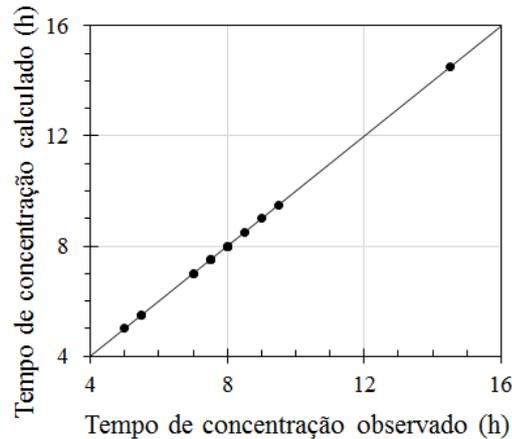
1) **η da vegetação variável:** os tempos de concentração, observado e calculado, são igualados de modo que cada evento (TABELA 5) possua um valor de η da vegetação (FIGURA 31).

TABELA 5 – COEFICIENTE DE MANNING (η) PARA A VEGETAÇÃO DEFINIDO POR EVENTO

ID do evento	Data	Coefficiente de Manning (n)
PA180579	18/05/1979	0,16
PA200779	20/07/1979	0,32
PA030879	03/08/1979	0,29
PA050280	05/02/1980	0,38
PA160280	16/02/1980	0,24
PA030380	03/03/1980	0,18
PA310580	31/05/1980	0,33
PA080780	08/07/1980	0,51
PA310880	31/08/1980	0,30
PA081180	08/11/1980	0,31
PA301180	30/11/1980	0,15
PA141280	14/12/1980	0,26
PA181280	18/12/1980	0,20
PA110781	11/07/1981	0,28
PA260881	26/08/1981	0,32
PA200981	20/09/1981	0,42
PA051281	05/12/1981	0,21
PA030282	03/02/1982	0,38

FONTE: A autora (2018).

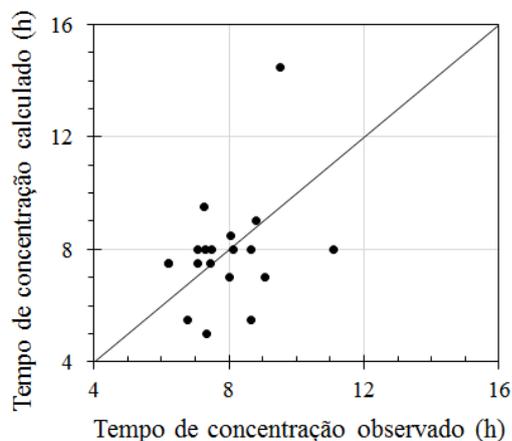
FIGURA 31 – DISPERSÃO DOS TEMPOS DE CONCENTRAÇÃO OBSERVADO E CALCULADO PARA O η DA VEGETAÇÃO VARIÁVEL



FONTE: A autora (2018).

2) **η da vegetação constante:** definido o Coeficiente de Manning que melhor se ajustou a todos os eventos ($\eta=0,29$), embora não tenha igualado os tempos de concentração observado e calculado de cada um deles (FIGURA 32).

FIGURA 32 – DISPERSÃO DOS TEMPOS DE CONCENTRAÇÃO OBSERVADO E CALCULADO PARA O η DA VEGETAÇÃO CONSTANTE ($\eta=0,29$)



FONTE: A autora (2018).

Seguindo a recomendação de se trabalhar com um único parâmetro para todos os eventos, a presente pesquisa utilizou o valor de η da vegetação obtido por meio da segunda abordagem, ou seja, um único valor de 0,29 para todos os eventos de chuva.

O coeficiente de rugosidade de Manning para as paredes dos canais foi estimado com base nos valores apresentados em Tucci et al. (2011) (TABELA 6).

TABELA 6 – COEFICIENTE DE MANNING (η) PARA ESCOAMENTO EM CANAL

Tipo	Características	Rugosidade		
		Mínima	Normal	Máxima
Canais de pequeno porte em planície (B < 30 m)	Limpos	0,025	0,033	0,045
	Trechos lentos	0,050	0,070	0,080
Canais de pequeno porte em montanhas (B > 30 m)	Leitos desobstruídos	0,030	0,040	0,050
	Leitos com matacões	0,040	0,050	0,070
Canais de grande porte (B > 30 m)	Seções regulares	0,025	-	0,060
	Seções irregulares	0,035	-	0,100
Planícies de inundação	Pastagens	0,025	0,030	0,035
	Culturas	0,020	0,040	0,050
	Vegetação densa	0,045	0,070	0,160

FONTE: Adaptado de Tucci et al. (2011).

Todos os trechos da sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire foram classificados como de pequeno porte em planícies, de escoamento lento e rugosidade máxima, o que resultou em um valor de coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,080.

Sendo assim, os valores definidos para os coeficientes de rugosidade de Manning (η) para a pesquisa são apresentados na TABELA 7.

TABELA 7 – VALORES DE COEFICIENTES DE MANNING (η) ADOTADOS

Uso e ocupação do solo	η de Manning
Área urbana	0,024
Solo exposto	0,130
Vegetação	0,290
Canais	0,080

FONTE: A autora (2018).

4.4.2. Metodologia para cálculo do tempo de deslocamento distribuído

Para determinar o tempo de deslocamento da água pixel a pixel para cada uma das cinco resoluções espaciais empregadas e seus 18 eventos, foi utilizada a metodologia desenvolvida pelo SCS adaptada ao nível de pixel. Esse método utiliza dois tipos de equação, de acordo com as características físicas do local onde está sendo feito o cálculo, podendo ser de escoamento em superfície ou escoamento em canal.

Escoamento em superfície

De acordo com o método, nos trechos onde a água escoar superficialmente, o tempo que a água demora para escoar dentro de cada pixel é estimado pela EQUAÇÃO 5 da onda Cinemática-Manning, exposta no item 2.3.1

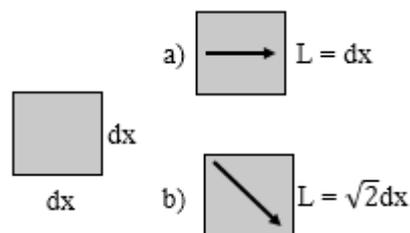
Os valores de coeficiente de rugosidade de Manning (η) empregados na EQUAÇÃO 5 variam de acordo com o uso do solo, sendo considerados os usos de área urbana e solo exposto, com seus coeficientes determinados de acordo com a literatura, e vegetação com seu coeficiente ajustado com o auxílio do MDT LiDAR 30m (TABELA 7).

A declividade foi calculada através da EQUAÇÃO 20 apresentada no item 4.4.1.

O comprimento do escoamento dentro do pixel (L) está ligado à direção de fluxo calculada pelo método D8, podendo ocorrer em duas situações:

1) Escoamento ortogonal dentro do pixel (FIGURA 33A): o comprimento L é igual a medida do lado dx do pixel. Por serem empregadas cinco resoluções espaciais de duas fontes de dados diferentes, os valores são apresentados na TABELA 8.

FIGURA 33 – COMPRIMENTO L DENTRO DO PIXEL



FONTE: A autora (2018).

TABELA 8 – DISTÂNCIAS ORTOGONAIS DE ACORDO COM O TAMANHO DO PIXEL

Resolução espacial empregada	dx do pixel	L (m)
MDT LiDAR 1m	1	1
MDT LiDAR 2m	2	2
MDT LiDAR 10m	10	10
MDT LiDAR 30m	30	30
MDE SRTM 30m	30	30

FONTE: A autora (2018).

2) Escoamento diagonal dentro do pixel (FIGURA 33B): o comprimento L é igual a medida do lado dx do pixel multiplicada por $\sqrt{2}$. Nesse caso, para as resoluções empregadas tem-se os valores apresentados na TABELA 9.

TABELA 9 – DISTÂNCIAS DIAGONAIS DE ACORDO COM O TAMANHO DO PIXEL

Resolução espacial empregada	dx do pixel	L (m)
MDT LiDAR 1m	1	$\sqrt{2}$.
MDT LiDAR 2m	2	$2\sqrt{2}$.
MDT LiDAR 10m	10	$10\sqrt{2}$.
MDT LiDAR 30m	30	$30\sqrt{2}$.
MDE SRTM 30m	30	$30\sqrt{2}$.

FONTE: A autora (2018).

A lâmina P_{24} , que corresponde ao total precipitado em 24h, é determinada para o tempo de retorno do projeto ou do evento em análise e a IDF do local de estudo.

As curvas IDF (intensidade – duração – frequência) fornecem a intensidade da precipitação para qualquer duração e período de tempo, sendo estimadas através da análise estatística das chuvas mais intensas ocorridas durante um período de tempo suficientemente longo e representativo dos eventos extremos do local (Tucci, 2003; Collischonn e Dornelles, 2013).

Como as curvas variam para diferentes locais e períodos de tempo, na presente pesquisa foi utilizada a curva IDF (EQUAÇÃO 21) recomendada para o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) de Porto Alegre, local mais próximo da sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire.

$$i = \frac{509,859 \cdot Tr^{0,196}}{(t_d + 10)^{0,72}} \quad (21)$$

Onde i é a intensidade da chuva (mm/h); Tr é o tempo de retorno para a precipitação (anos) e td é a duração da precipitação (min).

Para estimar o tempo de deslocamento da água para os 18 eventos selecionados, que representavam eventos de chuva que efetivamente ocorreram, o Tr de cada evento foi estimado através da EQUAÇÃO 21.

Após sua determinação, utilizando novamente a EQUAÇÃO 21, foi determinada a intensidade referente a uma precipitação com $td = 24h$, ou seja, a P_{24} , através da EQUAÇÃO 22.

$$P_{24} = 24 \cdot i_{24} \quad (22)$$

Sendo: i_{24} é a intensidade referente a uma precipitação com duração de 24 horas e Tr do evento.

A TABELA 10 apresenta os resultados da P_{24} para cada evento de chuva analisado.

TABELA 10 – P_{24} PARA OS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO OBSERVADOS NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE

ID do evento	Data	Precipitação total (mm)	Duração (h)	I (mm/h)	Tr (anos)	i_{24} (mm/h)	P_{24} (mm)
PA180579	18/05/1979	32,82	9,50	3,45	0,12	1,79	42,87
PA200779	20/07/1979	36,00	9,50	3,79	0,19	1,96	47,02
PA030879	03/08/1979	28,44	6,50	4,38	0,10	1,73	41,55
PA050280	05/02/1980	23,40	1,00	23,40	0,89	2,64	63,35
PA160280	16/02/0980	20,80	4,00	5,20	0,04	1,47	35,20
PA030380	03/03/1980	10,81	5,00	2,16	0,00	0,71	17,09
PA310580	31/05/1980	18,71	1,50	12,47	0,13	1,82	43,65
PA080780	08/07/1980	16,80	7,00	2,40	0,01	1,00	24,01
PA310880	31/08/1980	16,91	4,00	4,23	0,02	1,19	28,62
PA081180	08/11/1980	29,31	13,00	2,25	0,04	1,46	34,95
PA301180	30/11/1980	18,82	5,00	3,79	0,02	1,24	29,75
PA141280	14/12/1980	11,00	1,00	11,00	0,02	1,24	29,78
PA181280	18/12/1980	15,80	4,00	3,95	0,01	1,11	26,74
PA110781	11/07/1981	22,20	5,50	4,04	0,04	1,42	34,09
PA260881	26/08/1981	30,83	9,00	3,43	0,10	1,70	40,91
PA200981	20/09/1981	33,00	9,00	3,67	0,14	1,82	43,79
PA051281	05/12/1981	27,80	3,00	9,27	0,31	2,15	51,48
PA030282	03/02/1982	48,51	9,50	5,11	0,89	2,64	63,36

FONTE: A autora (2018).

Escoamento em canal

Para os pixels que representam o escoamento em canal, o método calcula a velocidade da água dentro do pixel com o auxílio da equação de Manning, EQUAÇÃO 2, exposta no item 2.3.1.

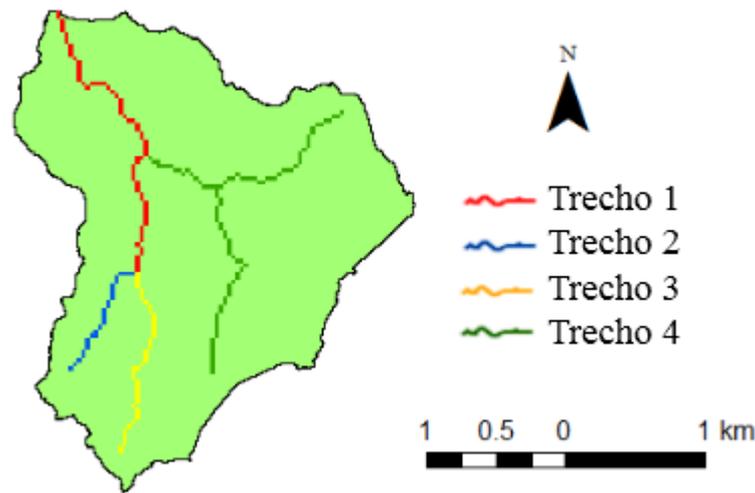
O raio hidráulico (R_h) do canal, calculado através da EQUAÇÃO 3, teve sua seção arbitrada com base nas informações obtidas junto ao DEP, assim como a seção transversal do canal, explicada no item 4.4.1.

E o tempo de deslocamento da água no pixel foi obtido através da EQUAÇÃO 4, que relaciona o comprimento do canal que está sendo analisado, nesse caso do pixel, e a velocidade média da água.

Para o cálculo do tempo de deslocamento em canal, o método divide a rede de drenagem em trechos, facilitando assim a determinação da declividade, coeficiente de Manning e raio hidráulico, de modo que esses valores possam ser considerados homogêneos por trecho.

A divisão adotada para a sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire foi realizada para todas as resoluções espaciais empregadas, sendo apresentada na FIGURA 34 um exemplo para o MDT LiDAR 30m.

FIGURA 34 – DIVISÃO DA REDE DE DRENAGEM EM SUBTRECHOS DE CARACTERÍSTICAS HOMOGÊNEAS DE DECLIVIDADE E SEÇÃO TRANSVERSAL



FONTE: A autora (2018).

Os valores de declividade foram calculados para cada subtrecho e resolução espacial empregada através da EQUAÇÃO 20, apresentada no item 4.4.1, e são apresentados na TABELA 11. O trecho 4, por ser composto por dois afluentes, teve sua declividade obtida através da média das declividades dos dois afluentes.

TABELA 11 – DECLIVIDADES DOS SUBTRECHOS DA REDE DE DRENAGEM

Trecho	MDT LiDAR	MDT LiDAR	MDT LiDAR	MDT LiDAR	MDE SRTM
	1m	2m	10m	30m	30m
S (m/m)					
1	0,006	0,006	0,007	0,008	0,007
2	0,031	0,031	0,035	0,036	0,043
3	0,020	0,021	0,023	0,025	0,025
4	0,021	0,022	0,025	0,027	0,031

FONTE: A autora (2018).

Para fins de simplificação, os valores de coeficiente de rugosidade de Manning (η) e raio hidráulico (R_h) utilizados na EQUAÇÃO 2 foram determinados de forma homogênea, ou seja, todos os subtrechos em todas as resoluções espaciais estudadas possuem o mesmo valor: 0,08 e 0,56 m, respectivamente. Sua determinação foi explicada de forma mais detalhada no item 4.4.1.

4.5. DETERMINAÇÃO DA CHUVA EXCEDENTE

A determinação da chuva excedente por pixel envolveu uma sequência de etapas, que vai desde a determinação da condição de umidade antecedente do solo, elaboração dos mapas de CN, ajuste das perdas iniciais até a obtenção da chuva excedente. Todos os passos são descritos de forma mais detalhadas nos itens abaixo.

4.5.1. Condição de umidade antecedente do solo (AMC)

A condição de umidade antecedente do solo ou *Antecedent Moisture Condition* (AMC) é descrita como uma das responsáveis pela variabilidade da geração de escoamento entre uma chuva e outra (McCuen, 2002). Nas versões iniciais do modelo proposto pelo SCS-CN, as condições de umidade anteriores ao evento chuvoso foram relacionadas ao nível de umidade no solo, sendo estipulados três níveis (TABELA 12) de AMC baseados na precipitação ocorrida cinco dias antes do evento de chuva em análise (Durán-Barroso et al., 2016).

TABELA 12 – CONDIÇÃO DE UMIDADE ANTECEDENTE DO SOLO (CUA) CONSIDERADOS PELO MÉTODO SCS-CN

Condição	Descrição
I	Solos secos: as chuvas nos últimos cinco dias não ultrapassaram 15 mm
II	Situação média na época das cheias: as chuvas nos últimos cinco dias totalizaram entre 15 e 40 mm
III	Solo úmido: as chuvas nos últimos cinco dias foram superiores a 40 mm

FONTE: Adaptado de Porto (1995)

Para a determinação do AMC dos 18 eventos selecionados para a sub-bacia, foram utilizados os dados da estação pluviométrica Porto Alegre (código 03051011), adquiridos através da plataforma *Hidroweb* da Agência Nacional de Águas (ANA), e os dados da estação Porto Alegre (código 83967), adquiridos por meio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que foram combinados com a intenção de preencher o maior número possível de falhas e assim obter os cinco dias anteriores de precipitação da maioria dos eventos.

Entretanto, para garantir a melhor escolha da condição de umidade, os cinco dias anteriores foram analisados em conjunto com a precipitação total, no dia do evento e após o evento, a vazão de pico, precipitação total, coeficiente de escoamento global e superficial dos dados observados (TABELA 13), o que fez com que alguns eventos não sigam a regra de definição do AMC exposta na TABELA 12.

Desse modo, após uma análise detalhada, cada evento apresentou um AMC específico (TABELA 13), sendo que os eventos que não dispunham de dados suficientes também tiveram seus AMCs determinados.

TABELA 13 – CONDIÇÃO DE UMIDADE ANTECEDENTE DOS EVENTOS SELECIONADOS

ID do evento	Data	P5 (mm)	Ptotal (mm)	Qp total (m ³ /s)	Cglobal	Csuperficial	AMC
PA180579	18/05/1979	20.80	32.82	0.32	0.049	0.017	II
*PA200779	20/07/1979	0.20	36.00	0.40	0.062	0.024	II
PA030879	03/08/1979	0.00	28.44	0.41	0.079	0.035	II
*PA050280	05/02/1980	0.00	23.40	0.22	0.028	0.018	I
PA160280	16/02/1980	12.20	20.80	0.17	0.035	0.025	I
*PA030380	03/03/1980	0.00	10.81	0.40	0.172	0.105	III
PA310580	31/05/1980	0.00	18.71	0.30	0.053	0.017	II
*PA080780	08/07/1980	-	28.00	0.10	0.027	0.015	I
PA310880	31/08/1980	0.00	16.91	0.19	0.050	0.022	II
PA081180	08/11/1980	23.50	29.31	0.21	0.044	0.017	I
PA301180	30/11/1980	1.70	18.82	0.24	0.056	0.025	II
PA141280	14/12/1980	28.30	11.00	0.17	0.063	0.020	II
*PA181280	18/12/1980	14.00	15.80	0.14	0.040	0.013	I
PA110781	11/07/1981	0.00	22.20	0.27	0.075	0.021	II
PA260881	26/08/1981	0.00	30.83	0.27	0.042	0.023	II
PA200981	20/09/1981	14.00	33.00	0.43	0.108	0.034	III
PA051281	05/12/1981	9.00	27.80	0.30	0.041	0.021	II
PA030282	03/02/1982	0.00	48.51	0.28	0.024	0.012	I

FONTE: A autora (2018).

LEGENDA: ID do evento = Identificação do evento; P5 = Precipitação nos 5 dias anteriores ao evento (mm); Ptotal = Precipitação no dia do evento dos dados observados (mm); Qp total = Vazão de pico dos dados observados (m³/s); C global = Coeficiente de escoamento global dos dados observados; Csuperficial = Coeficiente de escoamento superficial dos dados observados.

NOTA: O * é referente aos eventos que não apresentaram 5 dias anteriores de precipitação; a coluna P5 é referente ao total precipitado nos cinco dias antecedentes ao evento, para os eventos com * é apresentado o total precipitado nos dias que continham dados, exceto para o evento PA080780 que não continha dados de chuva antecedente.

4.5.2. Elaboração dos mapas de CN

A elaboração dos mapas de CN envolveu uma série de etapas, desde o ajuste realizado na classificação do uso do solo proposta por Costa (2017), a definição do grupo hidrológico de acordo com a classificação proposta por Sartori et al. (2005), até a análise e escolha do AMC de cada evento.

Após a definição do grupo hidrológico da sub-bacia e do AMC de cada evento, a determinação dos valores de CN foi feita através de tabelas encontradas na literatura, que fornecem os valores para os quatro diferentes grupos hidrológicos e diferentes AMCs, conforme apresentado na TABELA 14.

TABELA 14 – VALORES DE CN EM FUNÇÃO DA COBERTURA E GRUPO HIDROLÓGICO DO SOLO PARA AMC II

Tipo de uso do solo/ Tratamento/ Condições hidrológicas		Grupo Hidrológico			
		A	B	C	D
Uso residencial					
Tamanho médio do lote	% Impermeável				
até 500 m ²	65	77	85	90	92
1000 m ²	38	61	75	83	87
1500 m ²	30	57	72	81	86
Estacionamento pavimentados, telhados		98	98	98	98
Ruas e estradas					
pavimentadas, com guias de drenagem		98	98	98	98
com cascalho		76	85	89	91
de terra		72	82	87	89
Áreas comerciais (85% de impermeabilização)		89	92	94	95
Distritos Industriais (72% de impermeabilização)		81	88	91	93
Espaços abertos, parques, jardins:					
boas condições, cobertura de grama > 75%		39	61	74	80
condições médias, cobertura de grama > 50%		49	69	79	84
Terreno preparado para plantio, descoberto					
plantio em linhas reta		77	86	91	94
Culturas em fileiras					
linha reta	condições ruins	72	81	88	91
	boas	67	78	85	89
curva de nível	condições ruins	70	79	84	88
	boas	65	75	82	86
Culturas de grãos					
linha reta	condições ruins	65	76	84	88
	boas	63	75	83	87
curva de nível	condições ruins	63	74	82	85
	boas	61	73	81	84
Pasto					
	condições ruins	68	79	86	89
	médias	49	69	79	84
	boas	39	61	74	80
curva de nível	condições ruins	47	67	81	88
	médias	25	59	75	83
	boas	6	35	70	79
Campos		30	58	71	78
Florestas					
	condições ruins	45	66	77	83
	boas	36	60	73	79
	médias	25	55	70	77

FONTE: Adaptado de Porto (1995)

Pelo fato de algumas tabelas não apresentarem todos os valores para as condições de umidade I e III, são fornecidas pela literatura tabelas (TABELA 15) que pretendem auxiliar o cálculo desses valores.

TABELA 15 – CORREÇÃO DOS VALORES DE CN DE ACORDO COM A UMIDADE ANTECEDENTE

Condição de umidade		
I	II	III
100	100	100
87	95	99
78	90	98
70	85	97
63	80	94
57	75	91
51	70	87
45	65	83
40	60	79
35	55	75
31	50	70
27	45	65
23	40	60
19	35	55
15	30	50

FONTE: Adaptado de Porto (1995).

Dessa forma, para a presente pesquisa, os valores de CN obtidos para uso do solo, condição de umidade e grupo hidrológico são apresentados na TABELA 16.

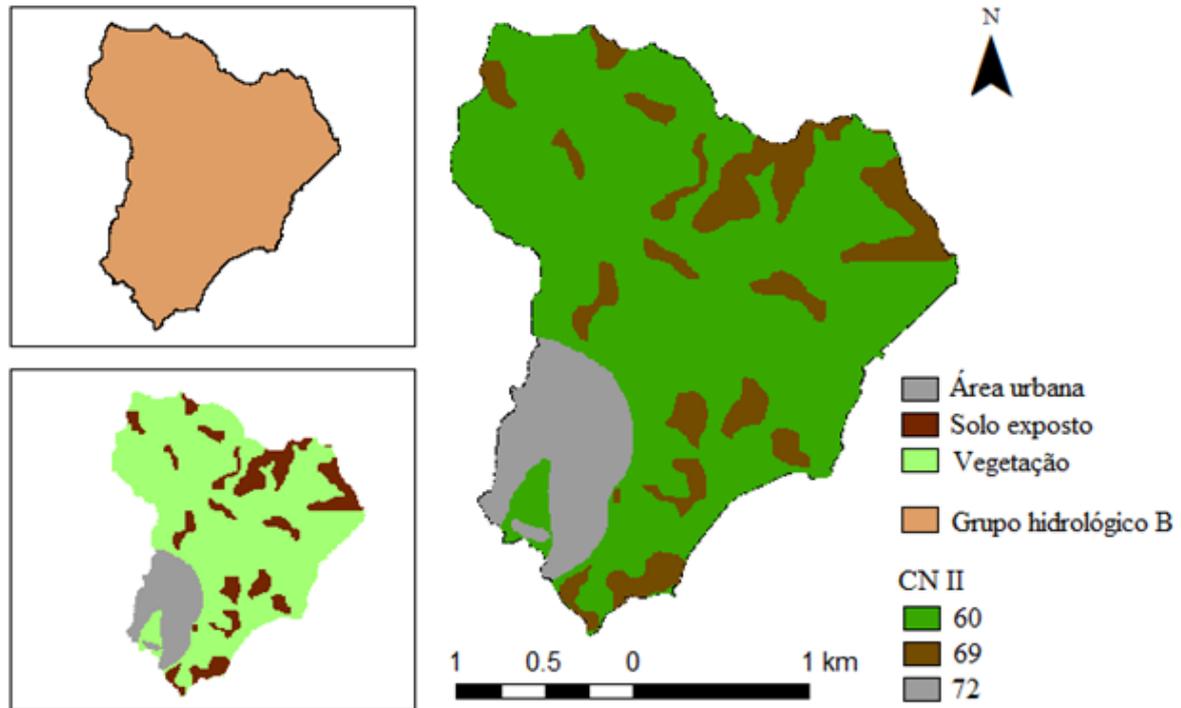
TABELA 16 – VALORES DE CN DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HIALIRE DE ACORDO COM O GRUPO HIDROLÓGICO E AMC

Uso do solo	Grupo Hidrológico	CN		
		AMC I	AMC II	AMC III
Área urbana	B	53	72	89
Solo exposto		50	69	86
Vegetação		40	60	79

FONTE: A autora (2018).

Por fim, para a elaboração dos mapas de CN, foi necessário cruzar o mapa do grupo hidrológico com o mapa de uso do solo para cada uma das resoluções estudadas, resultando no mapa de CN para AMC II (FIGURA 35).

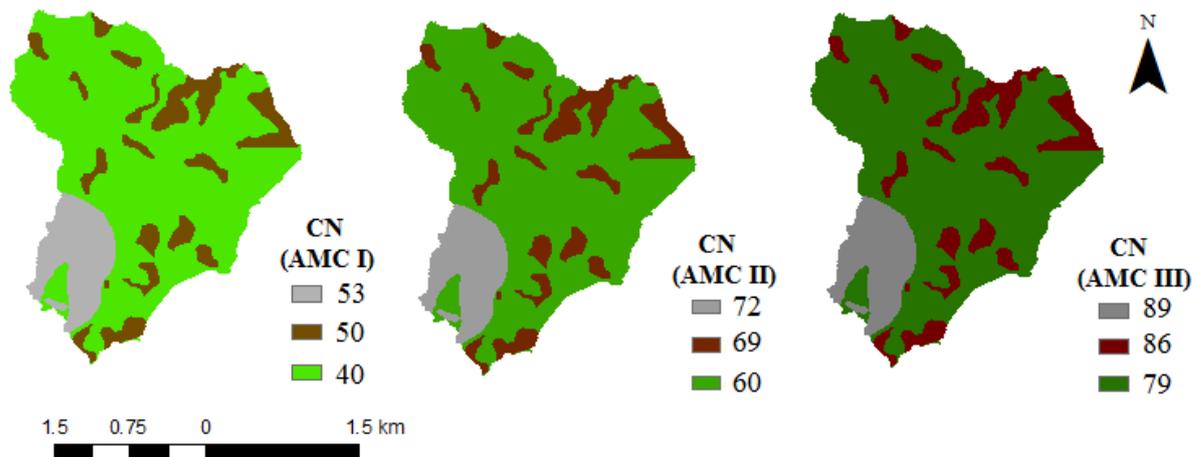
FIGURA 35 – ELABORAÇÃO DO MAPA DE CN PARA A AMC II, A PARTIR DOS MAPAS DE GRUPO HIDROLÓGICO E USO DO SOLO



FONTE: A autora (2018).

Posteriormente o mapa de CN para AMC II foi reclassificado com o auxílio de softwares de SIG, para gerar os mapas de CN para AMC I e AMCE III (FIGURA 36).

FIGURA 36 – VALORES DE CN POR PIXEL PARA OS DIFERENTES AMCS PARA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE



FONTE: A autora (2018).

4.5.3. Perdas iniciais

Com um importante papel no cálculo da lâmina de chuva escoada, pico do hidrograma e distribuição do tempo de escoamento, as perdas iniciais, ou abstrações iniciais (Ia),

representam a precipitação que não gera escoamento superficial, incluindo a água retida em depressões na superfície da terra, interceptada por vegetação, infiltrada ou evaporada, dependendo principalmente das condições climáticas do local de estudo e requerendo um maior refinamento para as bacias hidrográficas regionais (USDA, 1986; Ponce e Hawkins, 1996, Baltas et al., 2007; Ajmal e Kim, 2015).

O modelo proposto pelo SCS-CN prevê uma taxa de abstração (λ) de 20%, resultado da análise de uma série de bacias hidrográficas agrícolas (USDA, 1986). Entretanto, alguns autores frequentemente questionam a validade e aplicabilidade desse valor, alegando que a história e documentação desta relação são obscuras (Woodward et al., 2003; Shi et al., 2009; Yuan et al., 2012).

Em razão desses questionamentos, optou-se por ajustar manualmente o valor de λ com o auxílio dos eventos simulados para o MDT LiDAR 30m, devido a rapidez de resposta computacional ao se trabalhar com uma resolução espacial mais baixa. Os valores foram ajustados com a intenção de obter o λ que melhor aproximasse dos hidrogramas observados os valores de volume, vazão de pico e tempo de pico da abordagem distribuída, sendo escolhido para cada evento, através da inspeção visual, o que obteve o melhor desempenho.

Em seguida, esses valores ajustados foram utilizados na abordagem distribuída das outras resoluções espaciais, com posterior análise da influência da resolução nos valores de λ e hidrogramas resultantes. Além disso, todos os eventos foram simulados na abordagem distribuída para o valor padrão do método SCS-CN, com $\lambda = 0,2$ de abstração inicial.

Após a análise de todos os eventos, foram selecionados oito eventos de chuva (TABELA 17) para um reajuste do λ utilizando o MDT LiDAR 1m. O reajuste seguiu a mesma lógica utilizada anteriormente, onde cada um dos oito eventos passou por uma inspeção visual do seu volume, vazão de pico e tempo de pico na abordagem distribuída, sendo escolhido o valor de λ que melhor aproximou esses valores dos dados observados.

TABELA 17 – EVENTOS SELECIONADOS PARA O REAJUSTE DO VALOR DE λ

ID do evento	Data	AMC
PA180579	18/05/1979	II
PA200779	20/07/1979	II
PA030879	03/08/1979	II
PA030380	03/03/1980	III
PA301180	30/11/1980	II
PA110781	11/07/1981	II
PA260881	26/08/1981	II
PA051281	05/12/1981	II

FONTE: A autora (2018).

4.5.4. Precipitação excedente

Estimada pelo método da curva número proposto pelo SCS, o valor da precipitação excedente é influenciado pelo tipo do solo, AMC e condições de uso e ocupação (USDA, 1986; Porto, 1995).

Diferentemente da abordagem concentrada do método proposto pelo SCS-CN, o método distribuído fornece um valor de precipitação excedente para cada pixel. Para isso é utilizada a precipitação observada de cada evento, originalmente discretizada em intervalos de tempo de 30 min, e que passou a ser discretizada em intervalos de 1 min devido ao maior nível de discretização exigido pela abordagem distribuída.

Como visto anteriormente, o valor da precipitação excedente depende de três fatores: do tipo de solo, relacionado ao grupo hidrológico e apresentado no item 4.1.3; da condição de umidade antecedente do solo, que foi determinada para os 18 eventos individualmente e apresentada no item 4.5.1 e da estimativa dos valores de CN, que foi realizada a partir das tabelas descritas no item 4.5.2, respeitando o AMC de cada evento.

Além disso, como abordado no item 4.5.3, devido às incertezas sugeridas por alguns autores no valor utilizado para a taxa de abstração inicial (λ) do método tradicional do SCS-CN, optou-se por realizar as simulações de chuva excedente com o valor tradicional do método ($\lambda = 0,2$), e depois outras simulações foram realizadas com os valores ajustados para cada um dos 18 eventos de acordo com o MDT LiDAR 30m.

As equações utilizadas são as do método tradicional, apresentadas no item 2.3.2, porém com o diferencial de serem utilizadas considerando cada pixel da bacia individualmente e não de forma concentrada como o método originalmente propõe.

4.6. DETERMINAÇÃO E APLICAÇÃO DO HUT

A determinação do hidrograma resultante da sub-bacia foi feita através do método proposto pelo SCS-CN-HUT, aplicado de forma distribuída pixel a pixel.

O método foi aplicado para as cinco resoluções espaciais empregadas na pesquisa e para os 18 eventos de chuva-vazão selecionados.

4.6.1. Determinação do HUT

Conceitualmente, o HU é a representação da transformação de uma chuva unitária excedente em escoamento direto.

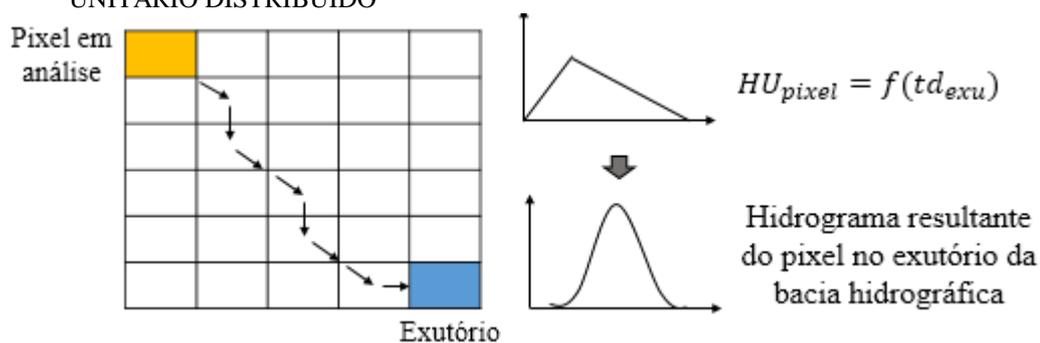
Para simplificar o cálculo do HU, técnicos do SCS sugeriam que ele pode ser aproximado por relações de tempo e vazão, estimadas pelo tempo de concentração e área das bacias em estudo, sendo que através dessa abordagem o HU pode ser aproximado a forma de um triângulo, definido por seu tempo de pico, tempo de base e vazão de pico, passando a ser chamado de hidrograma unitário triangular (HUT) (Collischonn e Dornelles, 2013).

Para determinar o HUT de cada pixel, as equações do Hidrograma Sintético Triangular apresentadas no item 2.3.3 foram adaptadas para a abordagem distribuída.

Enquanto na abordagem concentrada o tempo de pico, que é o tempo de subida do HU até atingir a vazão máxima, é estimado com base no tempo de concentração da bacia, como apresentado na EQUAÇÃO 10, na abordagem distribuída foram desenvolvidas duas variantes do modelo do HU:

1) **HU_{exu}**: o HU de cada pixel é determinado em função do tempo de deslocamento da água desde o pixel até o exutório da bacia hidrográfica (FIGURA 37), sendo o valor desse tempo de deslocamento (t_d) considerado como o tempo de concentração empregado nas equações do método SCS-CN-HUT distribuído (Costa, 2017).

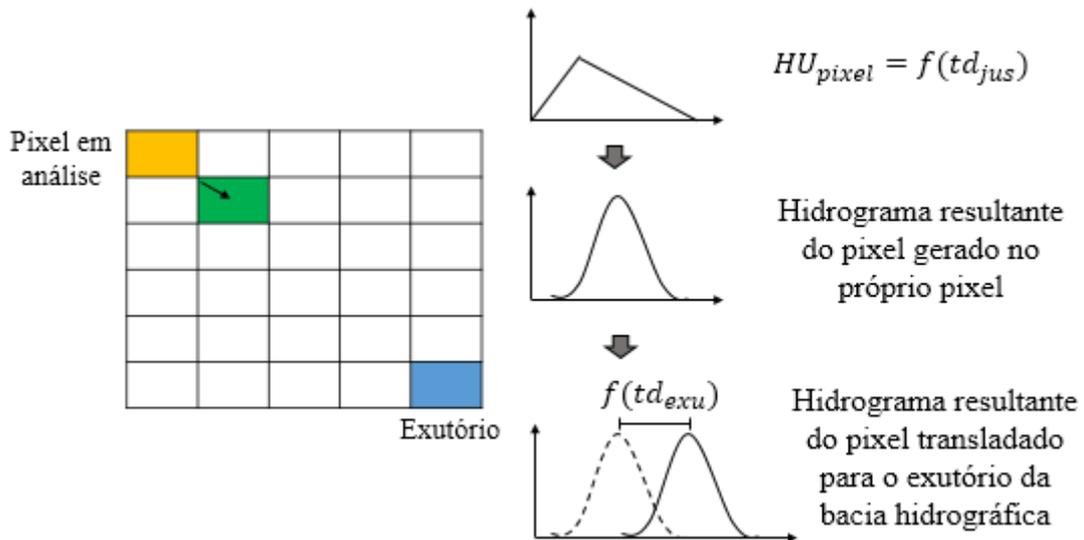
FIGURA 37 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DA VARIANTE HU_{EXU} DO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO DISTRIBUÍDO



FONTE: A autora (2018).

2) **HU_{jus}**: o HU de cada pixel é determinado considerando o tempo de deslocamento dentro do próprio pixel (FIGURA 38) até alcançar o pixel imediatamente a jusante, sendo esse valor do tempo de deslocamento considerado nas equações do método SCS-CN-HUT distribuído (Costa, 2017).

FIGURA 38 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DA VARIANTE HU_{JUS} DO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO DISTRIBUÍDO



FONTE: A autora (2018).

Em ambas as abordagens, o pixel é interpretado como se fosse uma pequena bacia hidrográfica de área igual a sua área superficial, considerando as variações de resolução espacial utilizadas na pesquisa, sendo a área do pixel utilizada nas equações apresentadas no item 2.3.3.

Cada pixel apresenta um valor de CN de acordo com o seu uso do solo, e fornece um hidrograma gerado por cada bloco de precipitação efetiva de cada evento em análise.

Na abordagem do HUexe, através do princípio de superposição, a aplicação do HUT a um pixel dá origem a um hidrograma resultante por pixel, que é a resposta hidrológica daquele pixel diretamente no exutório da sub-bacia. A superposição de todos esses hidrogramas resultantes gerados para cada pixel da sub-bacia fornece um hidrograma resultante final para a sub-bacia, ou seja, ao final do processo todos os hidrogramas resultantes dos pixels fornecem um único hidrograma resultante para cada evento (Costa, 2017).

Já na abordagem do HU_{jus} , o hidrograma resultante gerado em cada pixel é a resposta hidrológica de cada pixel ao alcançar o pixel a jusante. Para saber a resposta no exutório da sub-bacia é necessário aplicar nesse hidrograma uma defasagem igual ao tempo de viagem do escoamento superficial do pixel até o exutório, sendo feito, após isso, a superposição de todos os hidrogramas resultantes dos pixels defasados, que fornece um único hidrograma resultante para a sub-bacia (Costa, 2017).

Com a intenção de avaliar qual das variações melhor representaria o hidrograma resultante calculado, quando comparado com o hidrograma resultante observado, foi realizado o cálculo dos hidrogramas tanto pelo método do HUexe quanto do HUjus, utilizando para isso o MDT LiDAR 30m.

A verificação foi realizada para os 18 eventos através da inspeção visual dos hidrogramas gerados, ponderando o quão próximos o volume, vazão máxima e tempo de pico de vazão gerado por cada variação do HU foi capaz de aproximar-se da vazão superficial observada.

4.6.2. Aplicação do HUT

Para o cálculo do hidrograma resultante da sub-bacia, calculado para cada um dos 18 eventos de precipitação e resolução espacial trabalhados, o HUT e a precipitação efetiva de cada pixel forneceram, através dos princípios de proporcionalidade, superposição e do processo de convolução, um hidrograma resultante por pixel, que foi somado no exutório da sub-bacia com os hidrogramas resultantes dos demais pixels, fornecendo um hidrograma resultante para cada evento, resolução espacial e taxa de abstração inicial empregados na pesquisa.

O processo de convolução é um processo que a partir de duas funções produz uma terceira, sendo a vazão em um intervalo de tempo (t) calculada a partir da convolução entre as funções da precipitação efetiva (P_{ef}) e das ordenadas do hidrograma discretizado (h) (Collischonn e Dornelles, 2013).

Para que o método da convolução possa ser aplicado, a duração do intervalo de discretização do hidrograma unitário deve ser a mesma duração d da precipitação excedente unitária, que conseqüentemente é a mesma duração dos intervalos de tempo sobre os quais a precipitação está discretizada, sendo calculada a vazão $q(t)$ (EQUAÇÕES 23 e 24) para o HUTa cada intervalo de duração d (para $t = d, 2d, 3d...$).

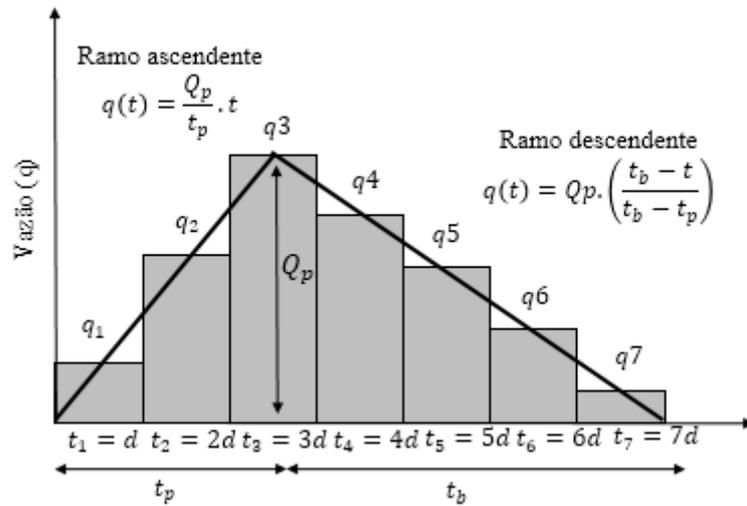
$$q(t) = \left(\frac{Q_p}{t_p} \cdot t \right) \quad \text{para } t \leq t_p \quad (23)$$

$$q(t) = Q_p \left(\frac{t_b - t}{t_b - t_p} \right) \quad \text{para } t \leq t_p \quad (24)$$

Sendo: $q(t)$ é a vazão no tempo t (m^3/s); Q_p é a vazão de pico do hidrograma unitário (m^3/s); t_p é o tempo do hidrograma unitário (min); t_b é o tempo de base do hidrograma unitário (min) e t é o instante de tempo para o qual se deseja estimar a vazão do HU (min).

A FIGURA 39 representa graficamente um HUT discretizado.

FIGURA 39 – HUT DO SCS DISCRETIZADO



FONTE: A autora (2018).

Analisando a FIGURA 39 percebe-se a relação entre o tempo (t) e a vazão (q(t)), que está exposta também na TABELA 18.

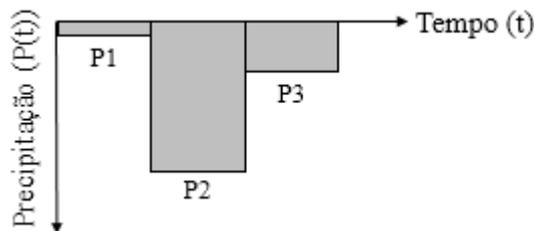
TABELA 18 – RELAÇÃO ENTRE O TEMPO (t) E A VAZÃO (q(t)) OBTIDAS A PARTIR DA DISCRETIZAÇÃO DE UM HU

Tempo (t)	P excedente
t ₁	q ₁
t ₂	q ₂
t ₃	q ₃
t ₄	q ₄
t ₅	q ₅
t ₆	q ₆
t ₇	q ₇

FONTE: A autora (2018).

Assim como a vazão (q(t)), a precipitação excedente também apresenta uma relação com o tempo (t), exemplificada na FIGURA 40 e TABELA 19.

FIGURA 40 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DA PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE (P(t))



FONTE: A autora (2018).

TABELA 19 – RELAÇÃO ENTRE O TEMPO (t) E A PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE (P(t))

Tempo (t)	P excedente
t ₁	P ₁
t ₂	P ₂
t ₃	P ₃

FONTE: A autora (2018).

Para obter o hidrograma gerado pela precipitação P₁, por exemplo, faz-se o produto entre P₁ e cada uma das vazões do hidrograma unitário discretizado apresentadas na TABELA 19. O resultado do produto (TABELA 20) é o hidrograma para precipitação P₁, sendo realizado o mesmo processo para a obtenção dos hidrogramas das demais precipitações.

TABELA 20 – HIDROGRAMA OBTIDO PELA PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE P₁

t	Q(P ₁)
t ₁	q ₁ .P ₁
t ₂	q ₂ .P ₁
t ₃	q ₃ .P ₁
t ₄	q ₄ .P ₁
t ₅	q ₅ .P ₁
t ₆	q ₆ .P ₁
t ₇	q ₇ .P ₁

FONTE: A autora (2018).

Os hidrogramas gerados estão deslocados no tempo conforme o instante em que ocorreu cada bloco de precipitação apresentado na TABELA 19, sendo assim, após realizar o produto de todas as precipitações e vazões obtêm-se a TABELA 21, que relaciona o tempo (t) e as vazões geradas por cada uma das precipitações excedentes (Q(P_i)).

TABELA 21 – EXEMPLO DE UM PROCESSO DE CONVOLUÇÃO

t	Q(P ₁)	Q(P ₂)	Q(P ₃)	Q(total)
t ₁	q ₁ .P ₁			q ₁ .P ₁
t ₂	q ₂ .P ₁	q ₁ .P ₂		q ₂ .P ₁ + q ₁ .P ₂
t ₃	q ₃ .P ₁	q ₂ .P ₂	q ₁ .P ₃	q ₃ .P ₁ + q ₂ .P ₂ + q ₁ .P ₃
t ₄	q ₄ .P ₁	q ₃ .P ₂	q ₂ .P ₃	q ₄ .P ₁ + q ₃ .P ₂ + q ₂ .P ₃
t ₅	q ₅ .P ₁	q ₄ .P ₂	q ₃ .P ₃	q ₅ .P ₁ + q ₄ .P ₂ + q ₃ .P ₃
t ₆	q ₆ .P ₁	q ₅ .P ₂	q ₄ .P ₃	q ₆ .P ₁ + q ₅ .P ₂ + q ₄ .P ₃
t ₇	q ₇ .P ₁	q ₆ .P ₂	q ₅ .P ₃	q ₇ .P ₁ + q ₆ .P ₂ + q ₅ .P ₃
		q ₇ .P ₂	q ₆ .P ₃	q ₇ .P ₂ + q ₆ .P ₃
			q ₇ .P ₃	q ₇ .P ₃

FONTE: A autora (2018).

Pelo princípio da superposição, o hidrograma resultante das precipitações efetivas P1, P2 e P3 é obtido através da soma das ordenadas dos hidrogramas gerados por cada uma das precipitações efetivas, para cada instante de tempo gerando a $Q(\text{total})$, que representa a soma das ordenadas para cada instante de tempo.

4.6.3. Análise de hidrogramas calculados

A análise dos hidrogramas resultantes calculados foi realizada comparando os resultados com as vazões superficiais determinadas pela separação do escoamento superficial dos dados observados, apresentadas na forma de hidrogramas observados provenientes do Projeto Dilúvio, utilizando os métodos de inspeção visual e cálculo da Diferença Relativa (EQUAÇÃO 14) do volume escoado (V), vazão de pico (Q_p) e tempo de pico (T_p).

Os hidrogramas resultantes para a sub-bacia foram gerados para as cinco resoluções espaciais utilizadas, nos 18 eventos selecionados, variando o valor da abstração inicial entre o valor padrão do método SCS-CN-HUT, 20%, e o valor ajustado de acordo com o MDE LiDAR 30m, além dos 8 eventos selecionados para o reajuste do λ a partir do MDT LiDAR 1m.

4.7. PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL DOS DADOS

O método SCS-CN-HUT distribuído foi aplicado na sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire em cinco resoluções espaciais diferentes, quatro delas provenientes de varredura a laser (LiDAR) e uma proveniente da missão SRTM.

Por serem modelos digitais de média a alta resolução espacial, a quantidade de pixels de cada sub-bacia utilizada aumenta conforme a resolução espacial aumenta, estando as maiores quantidades no MDT LiDAR 1m (TABELA 22).

TABELA 22 – QUANTIDADE DE PIXELS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO ESPACIAL

Resolução espacial em análise	Quantidade de pixels
MDT 1m	5833505
MDT 2m	1458951
MDT 10m	58110
MDT 30m	6468
SRTM 30m	6368

FONTE: A autora (2018).

Essa grande quantidade de pixels acabou interferindo na aplicação do método HU distribuído pois, por ser aplicado pixel a pixel, o processamento se tornou lento e demandou muito espaço para o armazenamento dos dados.

As etapas mais demoradas da aplicação do método foram a obtenção da chuva excedente e do hidrograma resultante final, que para as resoluções espaciais mais baixas (10 e 30m) eram solucionadas em questão de minutos, mas para as resoluções espaciais mais altas (1m e 2m), o tempo requerido para o processamento do HU chegou a cerca de 1h para o MDT LiDAR 2m e 30h para o MDT LiDAR 1m.

Devido ao enorme tempo empregado no processamento do MDT LiDAR 1m para a geração dos HUs resultantes nos diferentes λ utilizados, foi necessária a utilização de vários computadores simultaneamente, objetivando a agilidade do processo e a geração dos resultados dentro do prazo determinado.

Os resultados gerados também apresentaram dificuldade em seu armazenamento, principalmente nas resoluções espaciais mais altas, pelo fato de alguns arquivos necessitarem de cerca de 30 a 40 Gigabytes de armazenamento por evento, resultando em um total de 2,2 Terabytes de dados ao final do processamento, sendo necessária a aquisição de unidades portáteis de grande capacidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, são apresentados os resultados acerca da avaliação das redes de drenagem e sub-bacias hidrográficas geradas para cada uma das resoluções espaciais empregadas.

Em um segundo momento, são apresentados e analisados os resultados gerados pela simulação do método SCS-CN-HUT distribuído para os 18 eventos de chuva vazão nas cinco resoluções espaciais.

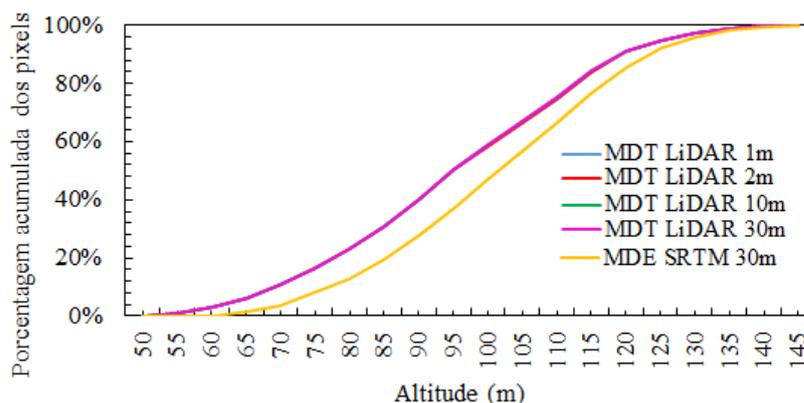
5.1. ANÁLISE DOS MODELOS DIGITAIS

MDE SRTM e MDTs LiDAR

Os MDTs e MDE utilizados na pesquisa foram inicialmente analisados através da diferença de altitudes, expostas por meio de histogramas de frequência.

A FIGURA 41 apresenta uma comparação entre as altitudes dos MDTs LiDAR e MDE SRTM utilizados para obter as redes de drenagem e delimitação da sub-bacia, lembrando que os MDTs de resolução espacial de 2, 10 e 30m são reamostragens do MDT LiDAR 1m.

FIGURA 41 – HISTOGRAMAS ACUMULADOS DE ALTITUDE DOS MDTs LiDAR E MDE SRTM UTILIZADOS NA PESQUISA



FONTE: A autora (2018).

Analisando o gráfico da FIGURA 41 é possível perceber que em todas as resoluções espaciais do MDT LiDAR cerca de 80% dos pixels da sub-bacia apresentam altitudes de até 115m, indicando que apesar de o MDT LiDAR 1m ter passado por processos de reamostragem de seus pixels para gerar MDTs com resoluções espaciais mais baixas, isso não alterou de forma significativa as altitudes dos modelos digitais, resultando em curvas idênticas.

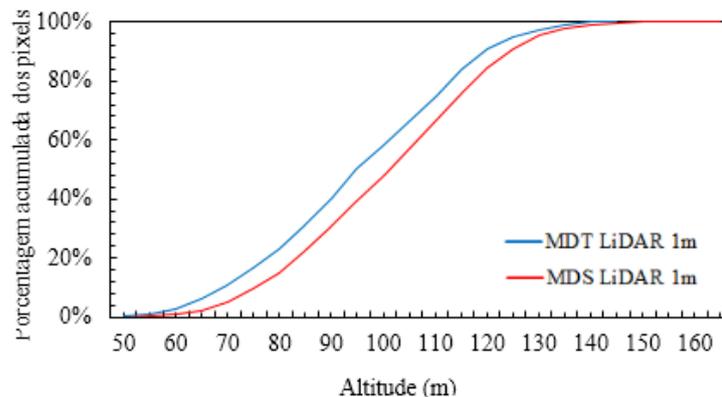
Já para o MDE SRTM 30m, a sub-bacia apresenta em cerca de 80% de seus pixels altitudes de até 120m, valor ligeiramente maior do que o encontrado nos MDTs. Além disso, os menores valores de altitude registrados no MDE SRTM estão na faixa dos 60m, enquanto que para os MDTs LiDAR esse valor é de cerca de 50m.

Essa diferença de valores mínimos e máximos entre o MDE SRTM e os MDTs LiDAR, mesmo que pequena, pode ser atribuída as diferentes formas de obtenção dos modelos digitais. Enquanto um é proveniente de monitoramento por satélite (orbital), que pode conter erros devido a fatores citados no item 2.2.2, o outro é resultado de técnicas baseadas no uso de lasers aerotransportados (item 2.2.3), o que também exerce certa influência na precisão dos resultados da topografia do terreno.

MDS e MDT LiDAR

Analisada através do histograma de frequências, a diferença de altitudes entre o MDS e MDT LiDAR 1m (FIGURA 42) indica que a maioria dos pixels, tanto do MDS quanto do MDT apresentam cotas acima de 50 m, com os maiores valores registrados na faixa dos 130 m, o que é condizente com a localização da área de estudo que está inserida em sua maior parte em uma área de preservação, apresentando árvores de grande porte que tem sua altura registrada no MDS LiDAR.

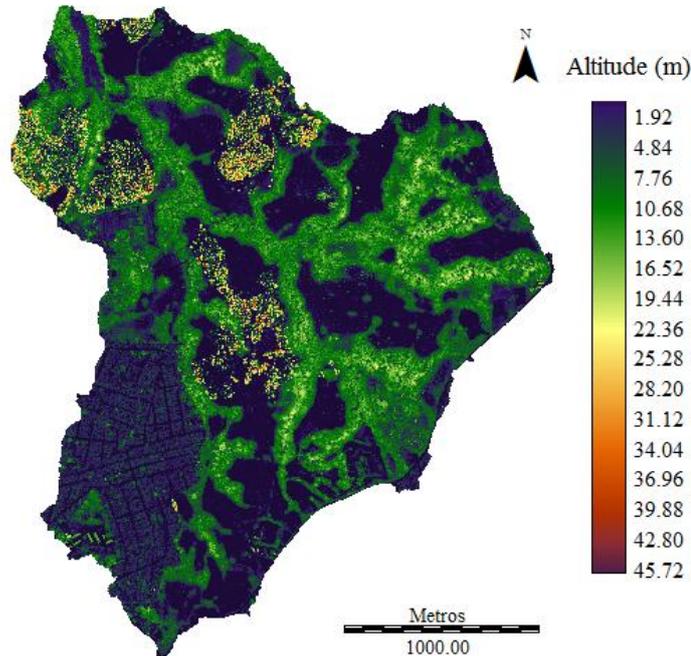
FIGURA 42 – HISTOGRAMA ACUMULADO DA DIFERENÇA DE ALTITUDE ENTRE O MDS LiDAR 1m E MDT LiDAR 1m



FONTE: A autora (2018).

Com o auxílio da FIGURA 43 é possível verificar que as áreas onde ocorrem as maiores altitudes na sub-bacia estão localizadas em seu interior, área que abriga o Parque Natural Municipal Saint Hilaire.

FIGURA 43 – DIFERENÇA DE ALTITUDE ENTRE O MDS LiDAR 1m E MDT LiDAR 1m PARA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE



FONTE: A autora (2018).

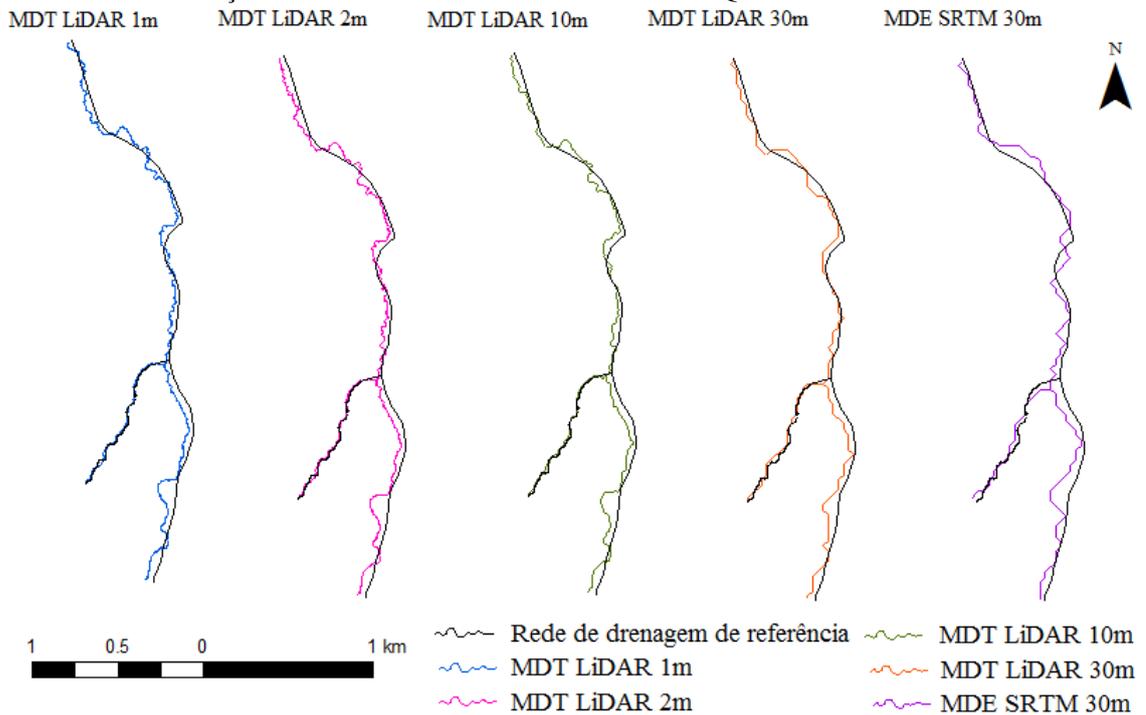
5.2. AVALIAÇÃO DAS REDES DE DRENAGEM

As redes de drenagem geradas pelos modelos digitais são oriundas do MDT LiDAR com resoluções espaciais de 1, 2, 10 e 30m e do MDE SRTM 30m, sendo utilizada como rede de referência a drenagem obtida através do processamento dos dados fornecidos pelo DEP.

5.2.1. Inspeção visual e características das redes de drenagem

A análise visual das redes de drenagem geradas através do processamento dos modelos digitais permitiu observar o quanto essas redes conseguiram representar o traçado da rede de drenagem utilizada como referência, nesse caso a rede de drenagem com apenas dois afluentes obtida a partir dos dados do DEP, sendo os resultados apresentados por resolução espacial na FIGURA 44.

FIGURA 44 – INSPEÇÃO VISUAL DAS REDES DE DRENAGEM GERADAS PELAS DIFERENTES RESOLUÇÕES ESPACIAIS EMPREGADAS NA PESQUISA



FONTE: A autora (2018).

Para auxiliar na análise das redes de drenagem, foram extraídos os comprimentos da rede drenagem de referência e das redes de drenagem geradas por cada resolução espacial, assim como de seus respectivos rios principais (TABELA 23), constatando que a rede de drenagem do MDT LiDAR 30m foi a que mais se aproximou do comprimento da rede de drenagem de referência.

Além disso, para verificar a similaridade das redes de drenagem, foi calculada a diferença relativa percentual (EQUAÇÃO 14) dos comprimentos das redes, e a sinuosidade (EQUAÇÃO 15) do curso d'água principal de cada resolução espacial, sendo seus resultados expostos na TABELA 23.

Analisando os resultados da diferença relativa percebe-se que quanto maior a resolução espacial, maior a diferença calculada. Isso pode ser explicado através da fonte de dados utilizada na geração da drenagem de referência. Por ser proveniente de um levantamento antigo do DEP, sua obtenção pode ter sido realizada através de imagens de satélite de resoluções espaciais mais baixas, o que explica as diferenças relativas menores para o MDE SRTM 30m e MDT LiDAR 30m.

Pelo fato de ambos, o dado utilizado como referência e os MDE e MDT de 30m analisados, fornecerem imagens com um menor detalhamento, a representação das redes de drenagem nos três casos é mais similar quando comparada com as redes de drenagens geradas por resoluções espaciais mais altas.

TABELA 23 – COMPRIMENTO E DIFERENÇA RELATIVA PERCENTUAL DAS REDES DE DRENAGEM EM ANÁLISE

Rede de drenagem em análise	Comprimento das redes de drenagem		Diferença relativa percentual (%)		Sinuosidade do curso d'água (Sc)
	Rede de drenagem total (km)	Rio principal (km)	Rede de drenagem total (%)	Rio principal (%)	Rio principal
Rede de drenagem de referência	4,64	3,57	-	-	-
MDT LiDAR 1m	6,22	5,10	34.10	42.66	1,10
MDT LiDAR 2m	5,99	4,90	29.20	37.15	1,59
MDT LiDAR 10m	5,36	4,36	15.54	22.03	1,53
MDT LiDAR 30m	4,91	3,98	5.91	11.27	1,36
MDE SRTM 30m	5,03	4,14	8.47	15.82	1,24

FONTE: A autora (2018).

Em relação a sinuosidade, é possível perceber que à medida que a resolução espacial aumenta, a sinuosidade das redes de drenagens também aumenta, e embora os valores para as cinco resoluções espaciais sejam relativamente próximos, percebe-se através da FIGURA 48 que os MDTs LiDAR geraram drenagens visualmente mais sinuosas, uma vez comparados com a rede de drenagem do MDE SRTM 30m, que aparenta ser mais angulosa.

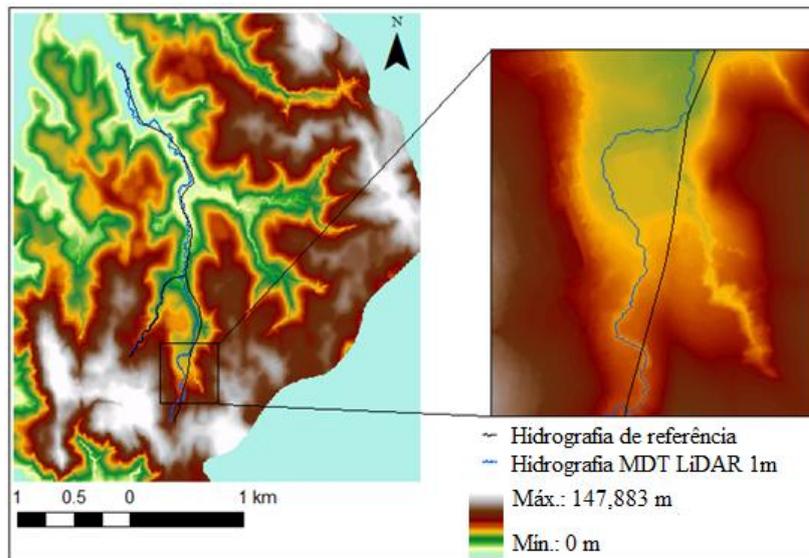
Ao mesmo tempo, observando as redes de drenagem geradas através dos diferentes modelos digitais utilizados, percebe-se um leve paralelismo em relação a rede de referência.

Esse paralelismo pode ser resultado da mudança de sistema de referência geodésico e projeção cartográfica dos mapas e produtos disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre, que inicialmente utilizavam o *datum* Observatório da Comissão da Carta Geral do Brasil e a projeção Gauss-Krüger. Porém, após o Decreto nº18.315, passou a adotar o *datum* SIRGAS2000 e a projeção cartográfica TM-POA, sendo necessária a conversão das coordenadas do acervo cartográfico existente, o que pode ter acarretado em distorções lineares (Prefeitura de Porto Alegre, 2013).

Além disso, observando as redes de drenagem nota-se que em todas elas o afluente à direita contém um meandro mais proeminente do que na rede de drenagem de referência.

Analisando a topografia do MDT LiDAR 1m (FIGURA 45), por exemplo, é possível identificar cotas de terreno mais baixas próximas ao local onde a rede de drenagem derivada desse MDT passa. Esse comportamento é observado também nas demais resoluções espaciais, tanto do LiDAR quanto do SRTM, sugerindo que esse meandro presente nas redes de drenagem obtidas através do processamento dos modelos digitais de fato possa existir, e que a rede de drenagem de referência não é tão precisa ou contém inconsistências.

FIGURA 45 – DETALHAMENTO DA TOPOGRAFIA DO MDT LiDAR 1m



FONTE: A autora (2018).

5.2.2. Método do *buffer*

Para a aplicação do método do *buffer*, que estima a porcentagem da rede de drenagem em análise inserida em uma área pré-determinada ao redor da rede de drenagem de referência, optou-se por utilizar como valores de *buffer* o tamanho de cada pixel em sua respectiva resolução espacial, assim como um valor padrão de 30m para todas as resoluções espaciais (TABELA 2).

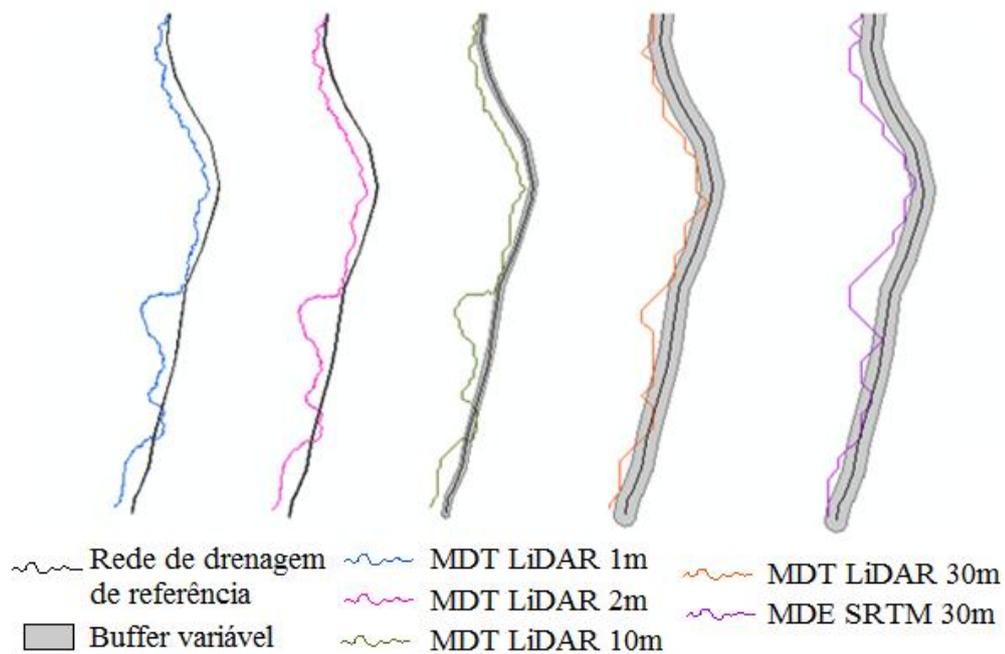
Os resultados quando utilizada a largura de *buffer* variável em função do tamanho do pixel são apresentados na TABELA 24 e FIGURA 46, e verifica-se que para a rede de drenagem total a rede de drenagem proveniente do MDT LiDAR 1m é a que menos se insere dentro da área do seu *buffer*, com apenas 1,87%, enquanto que o MDT LiDAR 30m é o que mais se insere, com 61,13%. Esse padrão de resultado é observado também para o rio principal, onde o MDT LiDAR 1m apresenta apenas 1,15% de sua inserida na área do *buffer*, ao mesmo tempo que o MDT LiDAR 30m apresenta 50,85%.

TABELA 24 – PORCENTAGEM DO RIO PRINCIPAL EM ANÁLISE INSERIDO NO BUFFER DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO ESPACIAL

Rede de drenagem em análise	Largura do <i>buffer</i> (m)	Porcentagem da rede de drenagem inserida no <i>buffer</i> (%)	
		Rede de drenagem total	Rio principal
MDT LiDAR 1m	1	1,87	1,15
MDT LiDAR 2m	2	3,68	2,10
MDT LiDAR 10m	10	30,30	16,71
MDT LiDAR 30m	30	61,13	50,85
MDE SRTM 30m	30	53,00	43,98

FONTE: A autora (2018).

FIGURA 46 – DETALHE DE TRECHOS DO RIO PRINCIPAL INSERIDOS NO BUFFER DE ACORDO COM SUA RESOLUÇÃO ESPACIAL



FONTE: A autora (2018).

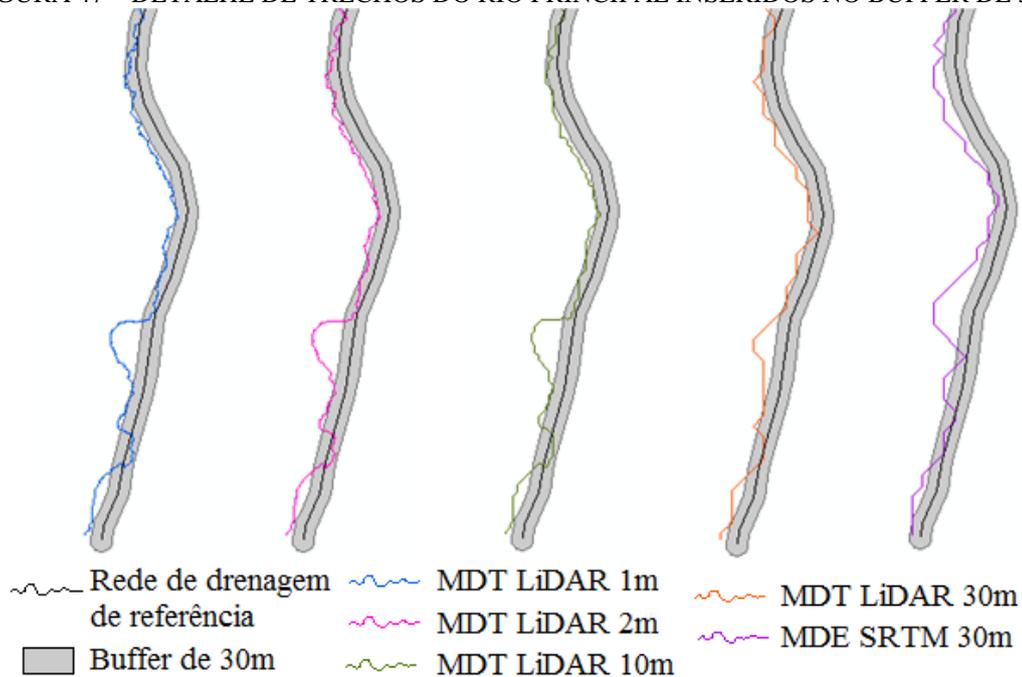
Entretanto, quando se utiliza a largura de *buffer* de 30m para todos os casos (TABELA 25) os valores obtidos são muito próximos, variando de 53% a 64,53% para a rede de drenagem total, e de 43,98% a 56,24% para o rio principal. Porém, nesse caso a rede de drenagem que mais se insere na área do *buffer* é a do MDT LiDAR 1m, tanto para a rede de drenagem total (64,53%) quanto para o rio principal (56,24%) (FIGURA 47), enquanto que a que menos se insere é do MDE SRTM 30m, com 53% para a rede de drenagem total e 43,98% para o rio principal.

TABELA 25 – PORCENTAGEM DA REDE DE DRENAGEM EM ANÁLISE INSERIDA NO BUFFER DE 30m

Rede de drenagem em análise	Largura do <i>buffer</i> (m)	Porcentagem da rede de drenagem inserida no <i>buffer</i> (%)	
		Rede de drenagem total	Rio principal
MDT LiDAR 1m	30	64,53	56,24
MDT LiDAR 2m	30	60,47	51,18
MDT LiDAR 10m	30	62,61	53,53
MDT LiDAR 30m	30	61,13	50,85
MDE SRTM 30m	30	53,00	43,98

FONTE: A autora (2018).

FIGURA 47 – DETALHE DE TRECHOS DO RIO PRINCIPAL INSERIDOS NO BUFFER DE 30m



Fonte: A autora (2018).

Ainda observando a FIGURA 47, que mostra um trecho das redes de drenagem de forma mais detalhada, pode-se perceber mais claramente o paralelismo entre as redes de drenagem geradas e a rede de referência, exposto no item 5.2.1, comportamento esse que pode ter sido resultado da mudança de sistema de referência e projeção cartográfica.

Entretanto, apesar desse detalhe, a métrica conseguiu refletir bem o quanto o traçado das redes de drenagem nas diferentes resoluções espaciais esteve próximo da rede de drenagem de referência, obtendo melhor desempenho no *buffer* de 30m.

O fato de utilizar-se um *buffer* variável para cada resolução espacial faz com que se tenha uma tolerância de erro de um pixel para cada lado da rede de referência, o que torna muito rígida a tolerância para as resoluções espaciais mais finas, como a do MDT LiDAR 1m, e pouco rígida a tolerância para as resoluções espaciais mais grosseiras, como as do *buffer* de 30m.

5.2.3. Área e distância média

Os resultados para a área e distância média indicam a proximidade das redes de drenagem em análise e de referência. Desse modo, ao contrário do que ocorre na métrica do *buffer*, quanto maiores os valores encontrados para área e distância média, maior é a distância entre as redes de drenagem e, conseqüentemente, mais diferente é a rede de drenagem em análise da rede de drenagem de referência.

Os resultados encontrados, referentes ao rio principal das cinco resoluções espaciais empregadas, são apresentados na TABELA 26.

TABELA 26 – ÁREA E DISTÂNCIA MÉDIA ENTRE AS REDES DE DRENAGEM EM ANÁLISE E DE REFERÊNCIA

Rede de drenagem em análise	Comprimento do rio principal de referência (m)	Área entre as redes de drenagem (km ²)	Distância média entre as redes de drenagem (m)
MDT LiDAR 1m	3574.60	0,082	22,91
MDT LiDAR 2m		0,091	25,55
MDT LiDAR 10m		0,085	23,86
MDT LiDAR 30m		0,089	24,98
MDE SRTM 30m		0,064	18,03

FONTE: A autora (2018).

No geral, os valores de área obtidos para os diferentes modelos digitais são pouco discrepantes quando comparados entre si, sendo o MDE SRTM 30m o que mais difere entre eles, com uma diferença de 0,031 km² em relação a maior área encontrada (MDT LiDAR 2m).

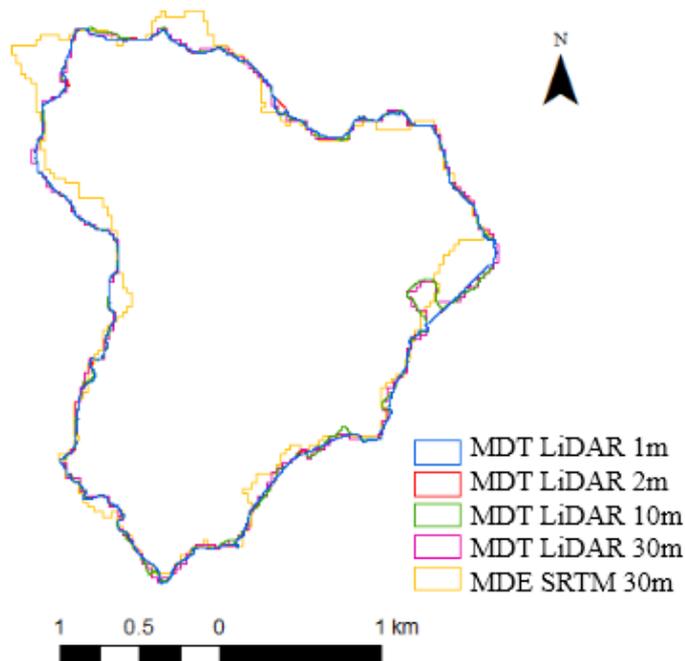
Esse valor reflete diretamente nos resultados da distância média, que assim como o observado pela área apresenta o MDE SRTM 30m como o de menor distância, com 18,03 m, e o MDT LiDAR 2m com 25,55m. Os valores de distância média indicam que todas as redes de drenagem geradas têm em média uma distância inferior a 30 m em relação à rede de referência, valor que coincide com o tamanho do pixel da resolução espacial mais grosseira trabalhada.

Analisando os valores de área e distância média para cada resolução espacial juntamente com os valores da porcentagem inserida no *buffer* percebe-se que o MDE SRTM 30m obteve um melhor desempenho na métrica da distância média, sendo a resolução espacial que mais próxima esteve da rede de drenagem de referência, mas não se saiu tão bem na métrica do *buffer*, por ser a rede de drenagem que menos se inseriu no *buffer* de 30m. Ao mesmo tempo, os resultados encontrados para os MDTs LiDAR são relativamente próximos nas duas métricas, variando no máximo 5,39% no método do *buffer* e 2,64 m na distância média, com a resolução espacial do MDT LiDAR 1m se saindo melhor em ambos os métodos.

5.3. AVALIAÇÃO DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

As sub-bacias foram analisadas através da inspeção visual de suas delimitações (FIGURA 48) e de suas áreas e perímetros (TABELA 27), que apresentaram valores muito próximos para todas as resoluções espaciais, com uma leve diferença entre os valores encontrados para os MDTs e para o MDE SRTM 30m, sendo de apenas 0,07 km² a diferença entre a maior área do MDT LiDAR 2m e do MDE SRTM 30m.

FIGURA 48 – SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS GERADAS PARA AS DIFERENTES RESOLUÇÕES EMPREGADAS



FONTE: A autora (2018).

TABELA 27 – ÁREAS E PERÍMETROS DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS GERADAS PELAS DIFERENTES RESOLUÇÕES ESPACIAIS

Sub-bacia hidrográfica em análise	Área (km ²)	Perímetro (km)
MDT LiDAR 1m	5,83	16,05
MDT LiDAR 2m	5,84	15,70
MDT LiDAR 10m	5,81	15,66
MDT LiDAR 30m	5,82	15,00
MDE SRTM 30m	5,73	15,42

FONTE: A autora (2018).

Para auxiliar na compreensão das sub-bacias foi calculada a diferença relativa das áreas (TABELA 28), considerando a sub-bacia gerada pelo MDT LiDAR 1m como referência.

O resultado indicou valores muito pequenos para todas as resoluções espaciais, com diferenças menores de 0,5% para as sub-bacias geradas pelos MDTs LiDAR e menor que 2% para a sub-bacia gerada pelo MDE SRTM, demonstrando um leve aumento da variação da delimitação da área das sub-bacias à medida que a resolução espacial aumenta.

Isso acontece devido à própria representação topográfica da bacia em cada MDE e consequentemente os caminhos de fluxo determinados a partir disso, mas também devido à diferença do tamanho dos pixels de cada resolução espacial e do posicionamento do exutório durante a geração da sub-bacia, o que faz com que as delimitações geradas sejam diferentes.

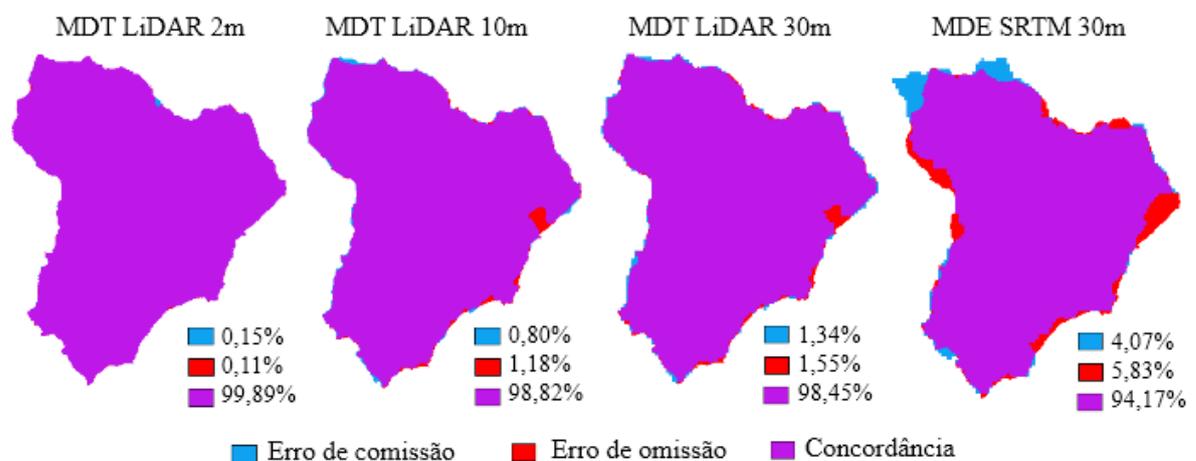
TABELA 28 – DIFERENÇA RELATIVA PERCENTUAL DAS ÁREAS DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

Sub-bacia hidrográfica em análise	Diferença relativa percentual (%)
MDT LiDAR 2m	0,04
MDT LiDAR 10m	-0,39
MDT LiDAR 30m	-0,21
MDE SRTM 30m	-1,75

FONTE: A autora (2018).

Além da área e perímetro, o erro na delimitação das sub-bacias também foi contabilizado através dos erros de comissão e omissão, que indicam as áreas das sub-bacias que foram erroneamente incluídas e omitidas, respectivamente, quando comparadas com a sub-bacia gerada pelo MDT LiDAR 1m (FIGURA 49).

FIGURA 49 – COMPARAÇÃO DA DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA PARA AS RESOLUÇÕES ESPACIAIS EMPREGADAS MOSTRANDO A PORCENTAGEM DA ÁREA ERRONEAMENTE INCLUÍDA OU OMITIDA



FONTE: A autora (2018).

Os resultados encontrados (FIGURA 49) demonstram que a concordância com a sub-bacia de referência diminui à medida que a resolução espacial aumenta, sendo a sub-bacia gerada pelo MDT LiDAR 2 m a que apresenta a melhor concordância (99,8%), além de ser o dado com os menores valores de erros de comissão (0,15%) e omissão (0,11%).

5.4. MODELAGEM CHUVA – VAZÃO

5.4.1. Obtenção do hidrograma das vazões observadas

Após realizar a separação do escoamento observado em vazão subterrânea e vazão superficial, foram calculados vários atributos dos eventos, que são expostos na TABELA 29.

TABELA 29 – CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT-HILAIRE

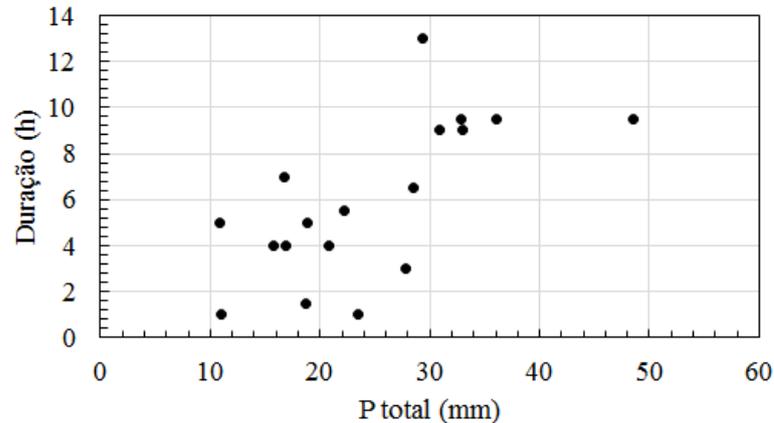
ID do evento	Data	Precipitação						Escoamento			
		P total	D prec	Tc	Iméd	I máx	Pef	Qp sup	Tp	C sup	C glo
PA180579	18/05/1979	32.82	9.50	5.00	3.45	9.60	0.57	0.19	10.00	0.02	0.05
PA200779	20/07/1979	36.00	9.50	7.50	3.79	10.80	0.86	0.25	11.00	0.02	0.06
PA030879	03/08/1979	28.44	6.50	7.50	4.38	13.60	0.99	0.26	8.50	0.03	0.08
PA050280	05/02/1980	23.40	1.00	7.50	23.40	45.60	0.41	0.18	4.50	0.02	0.03
PA160280	16/02/1980	20.80	4.00	7.00	5.20	24.00	0.52	0.15	4.50	0.02	0.04
PA030380	03/03/1980	10.81	5.00	8.00	2.16	6.40	1.13	0.34	6.50	0.10	0.17
PA310580	31/05/1980	18.71	1.50	8.00	12.47	35.00	0.32	0.18	5.50	0.02	0.05
PA080780	08/07/1980	16.80	7.00	14.5	2.40	5.60	0.41	0.08	10.00	0.02	0.04
PA310880	31/08/1980	16.91	4.00	9.00	4.23	12.20	0.37	0.13	6.50	0.02	0.05
PA081180	08/11/1980	29.31	13.0	8.50	2.25	4.40	0.50	0.13	16.00	0.02	0.04
PA301180	30/11/1980	18.82	5.00	5.50	3.76	8.00	0.47	0.17	6.50	0.02	0.06
PA141280	14/12/1980	11.00	1.00	8.00	11.00	20.40	0.22	0.09	6.00	0.02	0.06
PA181280	18/12/1980	15.80	4.00	7.00	3.95	10.40	0.21	0.07	8.50	0.01	0.04
PA110781	11/07/1981	22.20	5.50	8.00	4.04	17.20	0.47	0.14	8.00	0.02	0.08
PA260881	26/08/1981	30.83	9.00	8.00	3.43	12.80	0.72	0.21	10.50	0.02	0.04
PA200981	20/09/1981	33.00	9.00	9.50	3.67	10.60	1.11	0.22	11.50	0.03	0.11
PA051281	05/12/1981	27.80	3.00	5.50	9.27	43.00	0.60	0.22	6.00	0.02	0.04
PA030282	03/02/1982	48.51	9.50	7.50	5.11	38.80	0.61	0.21	12.50	0.01	0.02

FONTE: A autora (2018).

LEGENDA: ID do evento = Identificação do evento; Ptotal = Precipitação total (mm); Dprec = Duração da precipitação (horas); Tc = Tempo de concentração (horas); Iméd = Intensidade média (mm/h); Imáx = Intensidade máxima (mm/h); Pef = Precipitação efetiva (mm); Qp_sup = Vazão de pico superficial (m³/s); Tp = Tempo de pico (horas); Csuperficial = Coeficiente de escoamento superficial, e Cglobal = Coeficiente de escoamento global.

Os eventos selecionados possuem duração de 1 a 13h, com a maioria dos eventos apresentando curta a média duração e precipitação total (FIGURA 50), como o evento PA030380 que apresenta precipitação de 10,81 mm e duração de 5h.

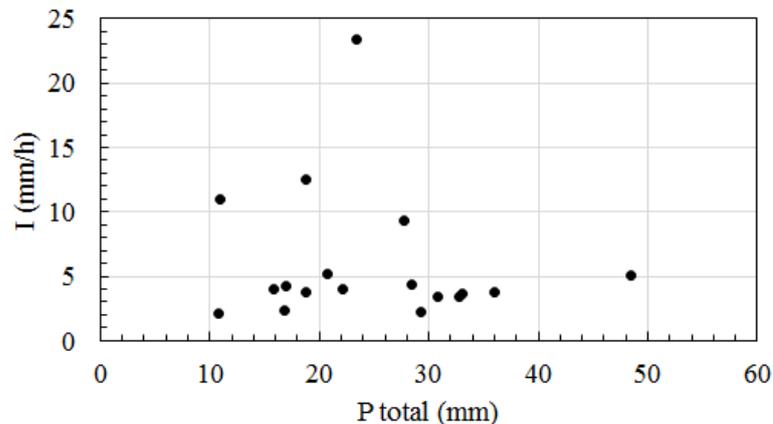
FIGURA 50 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO TOTAL E DURAÇÃO DOS EVENTOS



FONTE: A autora (2018).

A precipitação ainda pode ser relacionada à intensidade dos eventos através do gráfico de dispersão da FIGURA 51, que indica que a maioria dos eventos possui uma baixa intensidade, na faixa de 5 mm/h, enquanto apenas um evento (PA050280) possui uma intensidade acima de 20 mm/h, que pode ser considerada alta para o padrão da sub-bacia.

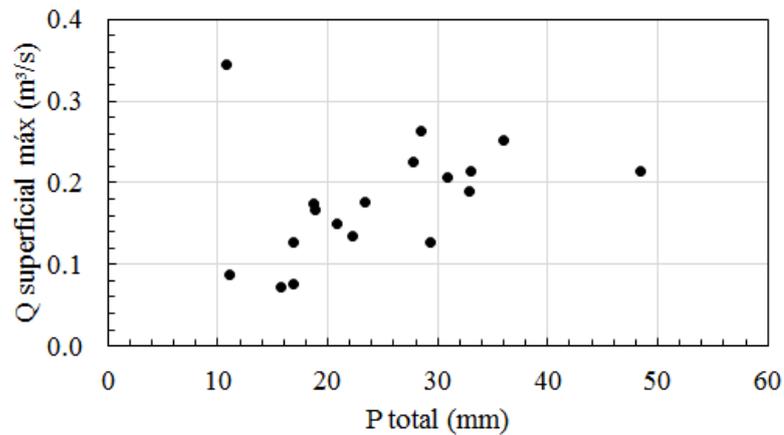
FIGURA 51 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO TOTAL E INTENSIDADE DOS EVENTOS



FONTE: A autora (2018).

Os valores de precipitação total, então calculados para os eventos selecionados, foram relacionados com suas vazões superficiais máximas (Q superficial máx) (FIGURA 52), apresentando um comportamento geral onde as precipitações médias (cerca de 20 a 30 mm) correspondem a Q superficial máx médias (entre 0,1 e 0,3 m^3/s). Entretanto, alguns eventos apresentam situações extremas, com baixa precipitação e alta Q superficial máx como o evento PA030380, ou com alta precipitação e baixa Q superficial máx como o evento PA200779.

FIGURA 52 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO TOTAL E VAZÕES SUPERFICIAIS MÁXIMAS DOS EVENTOS



FONTE: A autora (2018).

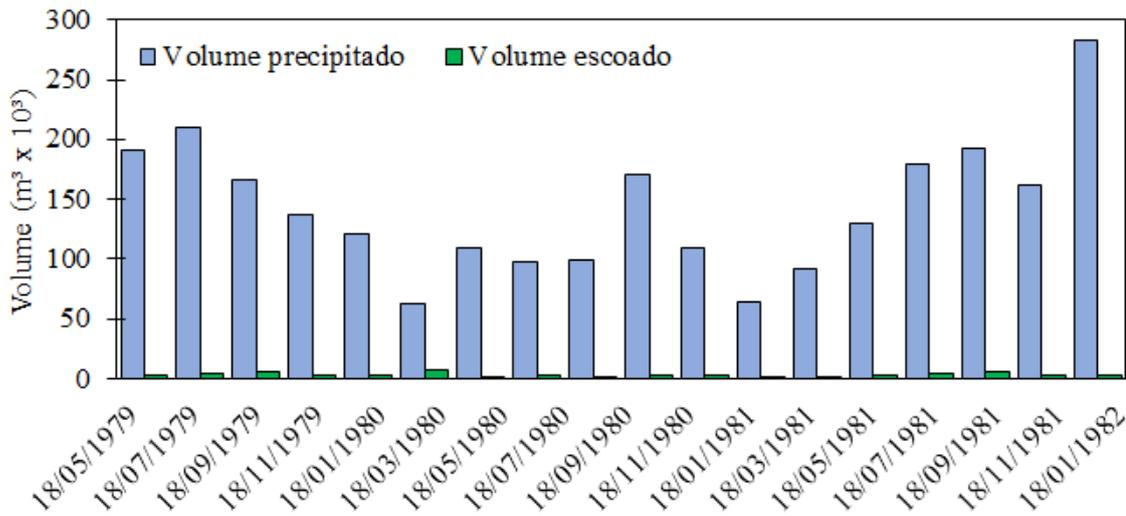
Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de a precipitação não ser a única envolvida na geração do escoamento, estando presentes outras variáveis como a condição de umidade antecedente do solo (AMC), vista no item 4.5.1., e a distribuição temporal da precipitação sobre a sub-bacia.

Por exemplo, em um evento de 2h de duração com precipitação total de 20 mm, se nos primeiros 30 min ocorreram 18 mm de precipitação, a vazão gerada é diferente de um mesmo evento que tenha essa mesma precipitação de 20 mm distribuída a cada 5 min em um intervalo de 4h. Somado a isso, a precipitação ocorrida nos dias anteriores determina quanta água o solo é capaz de absorver, transformando o restante em escoamento.

É o caso de eventos como o PA030380, que teve uma baixa precipitação total (10,81 mm) e alta vazão máxima (0,34 m³/s), e que apresenta um AMC que indica um solo extremamente saturado de água (AMC III), e o evento PA160280 que teve uma precipitação total média (20,80 mm) e baixa vazão máxima (0,15 m³/s), mas possui uma distribuição temporal da precipitação irregular.

Analisando de forma mais minuciosa a sub-bacia e o comportamento das precipitações e vazões para o período dos dados selecionados, foram calculados os volumes precipitados e os volumes escoados (FIGURA 53).

FIGURA 53 – VOLUME PRECIPITADO E ESCOADO PARA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE



FONTE: A autora (2018).

Os resultados apresentados indicam que, apesar de o somatório das precipitações e os valores das vazões superficiais máximas apresentarem uma boa correlação, a relação entre o volume precipitado e o volume que efetivamente escoou é muito baixa para todos os eventos.

Comportamento esse que está associado em parte ao uso do solo na sub-bacia, que tem predominância de áreas rurais, com 73% de sua área composta por vegetação e 15% de solo exposto, deixando apenas 12% para áreas urbanas que contribuem mais para a geração de escoamento superficial.

Entretanto, os principais responsáveis pelo pouco volume escoando, considerando as precipitações utilizadas, são a condição de umidade do solo (AMC) e em segundo plano a distribuição temporal e espacial da chuva.

A maioria dos eventos selecionados apresentou altos valores de precipitação total e baixos valores de coeficiente de escoamento global, como é o caso do evento PA030282, que possui uma precipitação total de 48,51 mm e um coeficiente de apenas 0,02, o que sugere um baixo AMC (AMC I), enquanto o evento PA030380 possui a menor precipitação total (10,81 mm) e o maior coeficiente de escoamento (0,17), indicando um alto AMC (AMC III).

5.4.2. Tempo de deslocamento do escoamento superficial

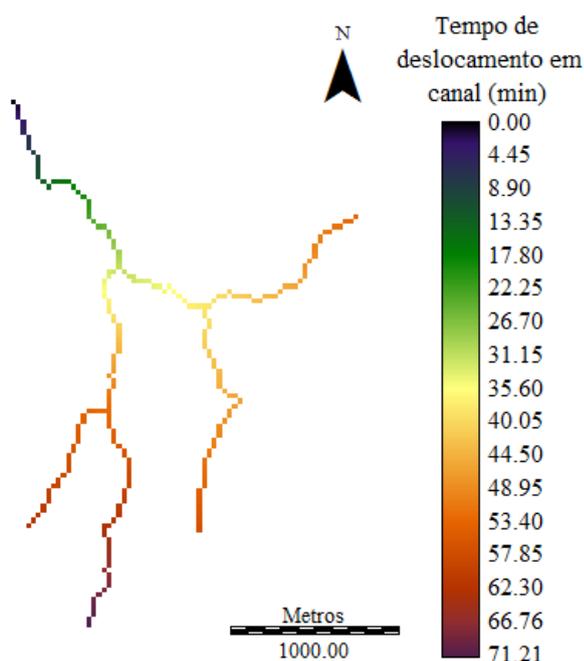
O cálculo do tempo de deslocamento da água de cada pixel até o exutório, em cada evento e resolução espacial utilizada, foi realizado através da adaptação do método do tempo de concentração proposto pelo SCS-CN-HUT.

A abordagem distribuída do método calcula o tempo de deslocamento da precipitação excedente de cada pixel até o exutório real da sub-bacia hidrográfica, utilizando para isso as mesmas equações do método tradicional (apresentadas no item 4.4.2), que diferencia o escoamento superficial (item 4.4.2.1) do escoamento em canal (item 4.4.2.2), mas considerando as características de cada pixel, como declividade (S) e coeficiente de rugosidade de Manning (η).

Logo, através do método distribuído, foram obtidos mapas de tempo de deslocamento para superfície, canal e total, para os 18 eventos selecionados nas cinco resoluções espaciais empregadas para a sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire.

O tempo de deslocamento em canal fornece o tempo em minutos que a água leva para percorrer cada pixel de canal até chegar ao exutório da sub-bacia. Conforme observado na FIGURA 54, um exemplo do evento PA030282 para o MDT LiDAR 30m, quanto mais distante do exutório maiores são os tempos de deslocamento.

FIGURA 54 – TEMPO DE DESLOCAMENTO EM CANAL MDT LIDAR 30m

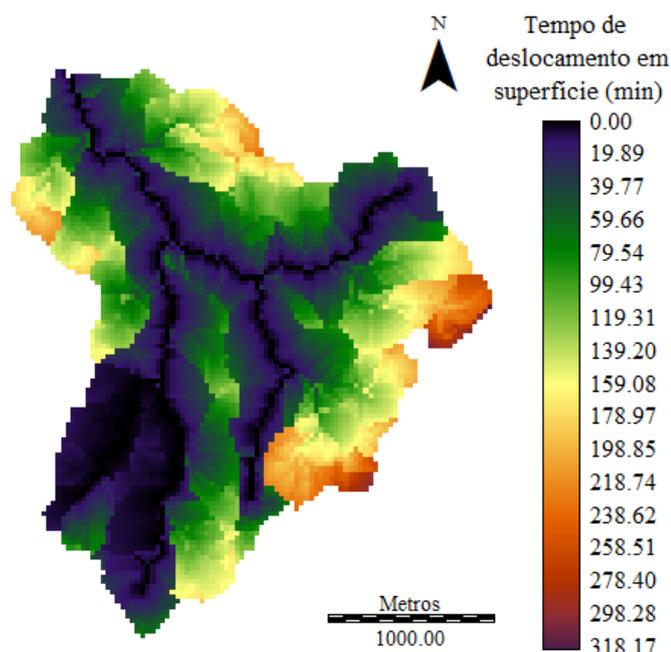


FONTE: A autora (2018).

O tempo de deslocamento em superfície representa o tempo que a água leva para percorrer cada pixel de superfície até alcançar o pixel de canal mais próximo. A FIGURA 55 mostra que os menores tempos estão localizados ao redor da rede de drenagem da sub-bacia e na área onde está presente a área urbana, enquanto que os maiores tempos são vistos em áreas de vegetação e solo exposto. A explicação para esse resultado é de que quanto mais

impermeabilizada a área mais rápido ocorre o escoamento, além da influência da rugosidade da superfície por onde a água está escoando, que é representada pelo coeficiente de Manning da TABELA 7.

FIGURA 55 – TEMPO DE DESLOCAMENTO EM SUPERFÍCIE MDT LIDAR 30m



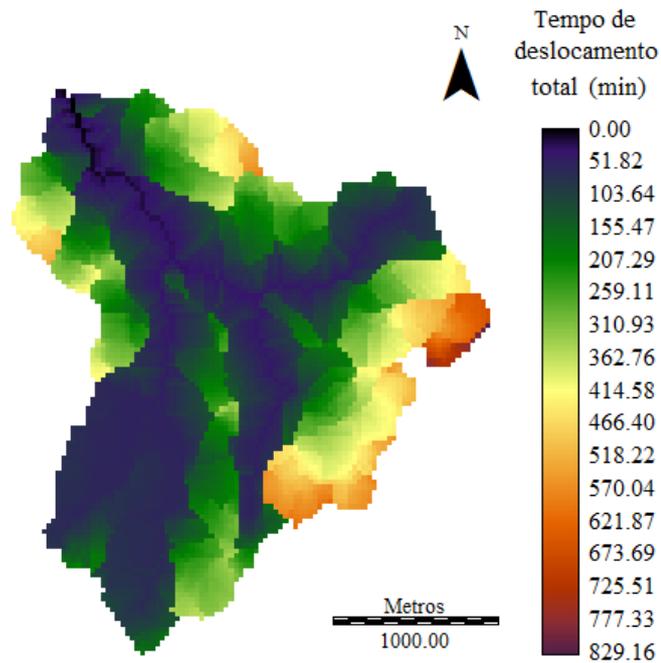
FONTE: A autora (2018).

Já o tempo de deslocamento total de cada pixel, que considera o tempo que a água gasta para escoar do pixel em análise até o exutório, passando por pixels de superfície e canal, é calculado considerando as direções de fluxo obtidas para a sub-bacia em cada resolução espacial utilizada, além do traçado da rede de drenagem.

Analisando a FIGURA 56, que apresenta um exemplo do evento PA030282 para o MDT LiDAR 30m, percebe-se que os menores tempo de deslocamento, que variam de 50 a cerca de 300 minutos, estão localizados na porção sudoeste da sub-bacia, enquanto na porção sudeste estão os maiores tempos de deslocamento, que alcançam o valor máximo de 829 minutos.

Apesar de a distância até o exutório ser praticamente a mesma, tanto na porção sudoeste quanto sudeste, essa diferença nos tempos é coerente e fisicamente esperada, pois observa-se a presença do núcleo urbano da sub-bacia a sudoeste, que por estar conectada a drenagem urbana é responsável por tempos de deslocamento menores.

FIGURA 56 – TEMPO DE DESLOCAMENTO TOTAL MDT LIDAR 30m

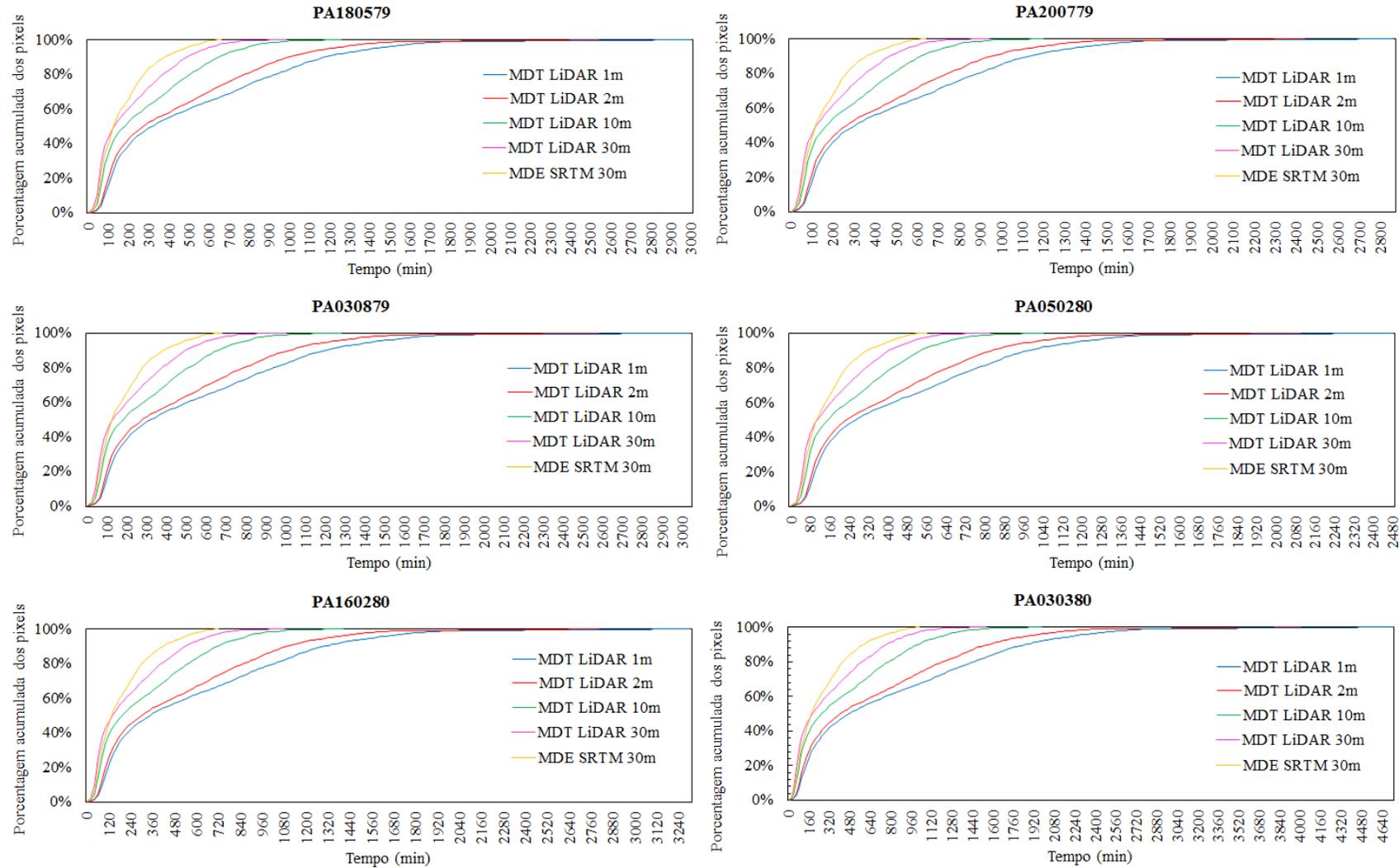


FONTE: A autora (2018).

Os resultados encontrados para o tempo de deslocamento total nos 18 eventos selecionados e nas cinco resoluções espaciais utilizadas apresentam o mesmo padrão, com tempos de deslocamento menores próximo à área urbana e canais, e tempos maiores em áreas de vegetação e solo exposto.

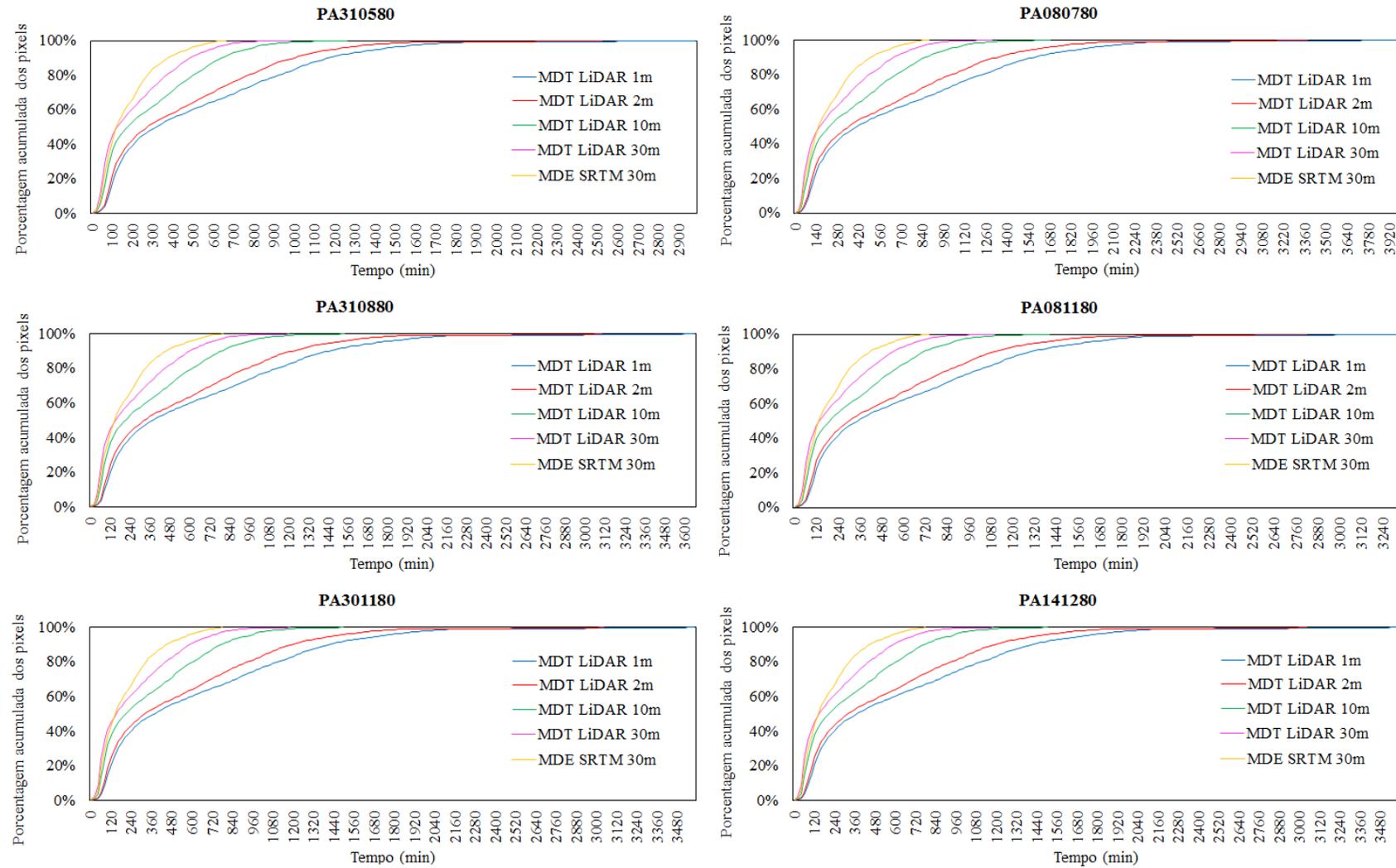
Para melhor visualizar os resultados foram organizados histogramas acumulados de tempo de deslocamento total, onde é possível comparar e analisar os tempos de um mesmo evento para as diferentes resoluções espaciais. Nas FIGURA 57, 58 e 59 são apresentados os histogramas de tempo de deslocamento para todos os eventos nas cinco resoluções espaciais.

FIGURA 57 – HISTOGRAMA ACUMULADO DE TEMPO TOTAL (EVENTOS PA180579, PA200779, PA030879, PA050280, PA160280 e PA030380) NAS CINCO RESOLUÇÕES ESPACIAIS UTILIZADAS



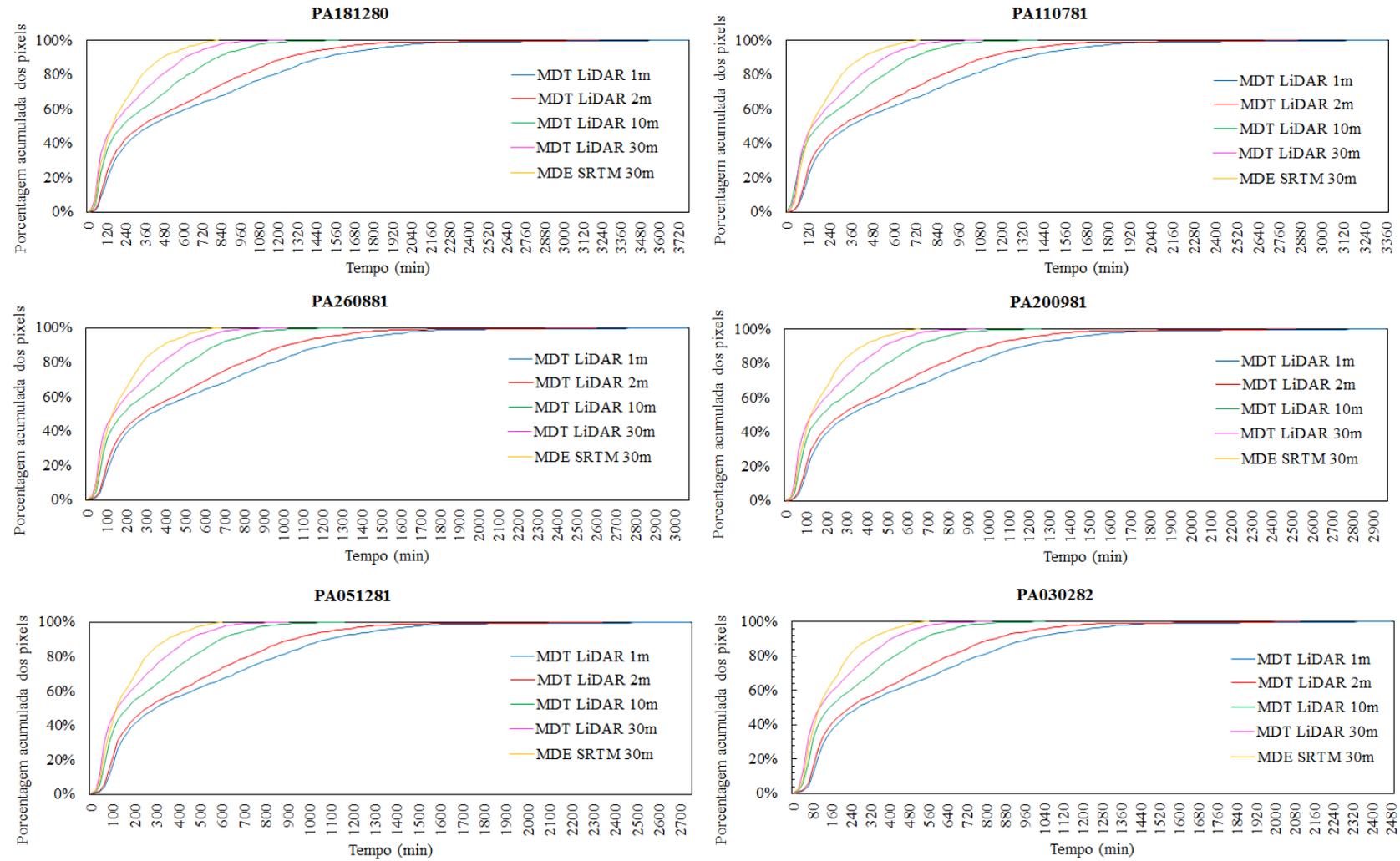
FONTE: A autora (2018).

FIGURA 58 – HISTOGRAMA ACUMULADO DE TEMPO TOTAL (EVENTOS PA310580, PA080780, PA310880, PA081180, PA301180, PA141280) NAS CINCO RESOLUÇÕES ESPACIAIS UTILIZADAS



FONTE: A autora (2018).

FIGURA 59 – HISTOGRAMA ACUMULADO DE TEMPO TOTAL (EVENTOS PA310580, PA080780, PA310880, PA081180, PA301180, PA141280) NAS CINCO RESOLUÇÕES ESPACIAIS UTILIZADAS



FONTE: A autora (2018).

Ao analisar a frequência de ocorrência dos tempos de deslocamento para o evento PA030282 (FIGURA 59), por exemplo, percebe-se que uma grande porcentagem dos pixels apresenta valores de pequenos a medianos, enquanto uma baixa porcentagem apresenta valores extremamente elevados. Para o MDE SRTM 30m cerca de 80% dos pixels apresenta tempos de deslocamento total de até 240 minutos, enquanto para cerca de 5% dos pixels esse tempo é superior a 400 minutos.

Esse comportamento repete-se para as demais resoluções espaciais, no MDT LIDAR 1m, por exemplo, no evento PA030282 80% dos pixels apresentam tempos de deslocamentos inferiores a 780 minutos e para apenas 5% dos pixels esse tempo é superior a 1180 minutos.

Além disso, as curvas das diferentes resoluções espaciais mostram um padrão de maiores tempos de deslocamento conforme a resolução espacial aumenta, resultado de uma melhor representação dos caminhos de fluxo por parte das resoluções espaciais maiores, o que acaba por aumentar o tempo de deslocamento do escoamento.

Para o evento PA030282, por exemplo, o maior tempo de deslocamento observado está na faixa de 560 minutos para o MDE SRTM 30m, 1040 minutos para o MDT LiDAR 10m e 2480 minutos para o MDT LiDAR 1m. Esse comportamento reflete a diferença dos tamanhos dos pixels que formam as redes de drenagem pois, para pixels de tamanhos menores, como 1 e 2 m por exemplo, o comprimento da drenagem gerada pelos respectivos MDTs é maior, aumentando também o tempo de deslocamento da água até o exutório. Já para pixels maiores, como 10 e 30m, os meandros das redes de drenagem geradas não são tão bem representados, o que encurta as distâncias e o tempo de deslocamento da água até o exutório.

Os demais eventos estudados têm seus tempos de deslocamento em até 80% dos pixels da sub-bacia resumidos na TABELA 30, e seguem a mesma linha de resultados do evento PA030282, apresentando valores maiores de tempo de deslocamento a medida que a resolução espacial aumenta, e com cerca de 80% dos pixels com valores de tempo de deslocamento que variam de 240 minutos a no máximo 1460 minutos, o que representa uma parcela expressiva dos pixels que formam a sub-bacia.

TABELA 30 – CARACTERÍSTICAS DOS HISTOGRAMAS ACUMULADOS DE TEMPO DE DESLOCAMENTO TOTAL

ID do evento	MDE SRTM 30m		MDT LiDAR 30m		MDT LiDAR 10m		MDT LiDAR 2m		MDT LiDAR 1m	
	Td	%	Td	%	Td	%	Td	%	Td	%
	(min)	acum	(min)	acum	(min)	acum	(min)	acum	(min)	acum
PA030282	240	82.28	320	81.43	420	80.31	660	80.88	780	80.63
PA030380	440	81.69	580	80.45	780	80.03	1220	80.31	1460	80.38
PA030879	280	80.78	380	80.56	520	80.74	800	80.55	940	80.04
PA050280	240	82.28	320	81.43	420	80.31	660	80.87	780	80.63
PA051281	260	81.62	340	80.28	460	80.07	720	80.44	860	80.56
PA080780	360	80.21	500	80.87	680	80.94	1040	80.50	1240	80.46
PA081180	300	80.27	420	81.04	560	80.48	860	80.17	1040	80.68
PA110781	320	82.14	420	80.73	560	80.06	880	80.57	1040	80.25
PA141280	340	82.05	440	80.24	600	80.23	940	80.61	1120	80.56
PA160280	300	80.38	420	81.18	560	80.59	860	80.29	1020	81.10
PA180579	280	81.20	380	81.01	520	81.26	780	80.17	940	80.59
PA181280	340	80.01	480	81.23	640	80.62	980	80.23	1180	80.56
PA200779	260	80.08	360	80.72	480	80.06	760	80.85	900	80.63
PA200981	280	81.59	380	81.29	500	80.30	780	80.54	920	80.18
PA260881	280	80.41	380	80.38	520	80.52	800	80.28	960	80.54
PA301180	340	82.00	440	80.24	600	80.22	940	80.59	1120	80.54
PA310580	280	81.50	380	81.27	500	80.25	780	80.49	920	80.12
PA310880	340	81.37	460	80.93	620	80.66	960	80.68	1140	80.51

FONTE: A autora (2018).

5.4.3. Ajuste da taxa de abstração inicial

Na presente pesquisa o ajuste do parâmetro λ da abstração inicial (EQUAÇÃO 8) foi realizado em função do MDT LiDAR 30m (TABELA 31), devido à rapidez da resposta computacional de uma resolução espacial mais baixa. Os valores ajustados foram então empregados no cálculo da precipitação excedente, conforme a EQUAÇÃO 6, das cinco resoluções espaciais estudadas, com posterior análise do comportamento dessas precipitações excedentes na geração da vazão calculada.

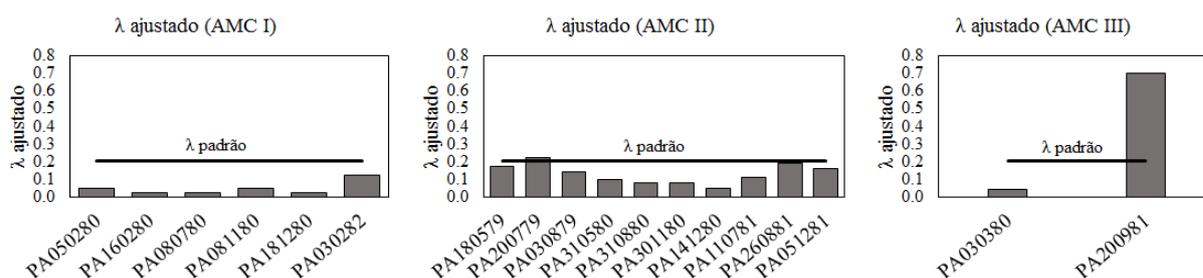
O ajuste do parâmetro λ foi realizado analisando a vazão superficial observada, proveniente dos eventos de chuva disponibilizados pelo Projeto Dilúvio, e a vazão calculada para cada evento do MDT LiDAR 30m. A escolha dos valores foi feita com base na vazão de pico, volume e tempo de pico do evento, verificando qual valor de λ aproximava mais essas variáveis das encontradas nos hidrogramas dos dados observados.

TABELA 31 – VALORES DE λ AJUSTADOS POR EVENTO

ID do evento	Data	AMC	λ ajustado
PA180579	18/05/1979	II	0.17
PA200779	20/07/1979	II	0.22
PA030879	03/08/1979	II	0.14
PA050280	05/02/1980	I	0.05
PA160280	16/02/1980	I	0.02
PA030380	03/03/1980	III	0.04
PA310580	31/05/1980	II	0.10
PA080780	08/07/1980	I	0.02
PA310880	31/08/1980	II	0.08
PA081180	08/11/1980	I	0.05
PA301180	30/11/1980	II	0.08
PA141280	14/12/1980	II	0.05
PA181280	18/12/1980	I	0.02
PA110781	11/07/1981	II	0.11
PA260881	26/08/1981	II	0.19
PA200981	20/09/1981	III	0.70
PA051281	05/12/1981	II	0.16
PA030282	03/02/1982	I	0.12

FONTE: A autora (2018).

A FIGURA 60 expõe os valores de λ ajustado para cada evento, de acordo com o AMC estipulado para o evento, apresentando ainda um indicativo do λ padrão através de uma linha de referência, que serve para melhor visualizar a diferença entre os λ ajustado e padrão.

FIGURA 60 – VALORES DE λ AJUSTADO POR EVENTO E AMC

FONTE: A autora (2018).

De forma geral, para o MDT LiDAR 30m, os valores de λ ajustados para cada evento são menores do que os 0,2 recomendados pelo método padrão do SCS-CN-HUT, com apenas dois eventos, PA200779 e PA200981, apresentando valores maiores, 0,22 e 0,70 respectivamente.

Com a variação do AMC e CN para as diferentes condições de umidade do solo, os menores valores de λ foram observados para as condições de umidade do solo seco (AMC I) e intermediário (AMC II), variando de 0,02 a 0,12 com predominância do $\lambda = 0,02$ para o AMC

I, e de 0,05 a 0,22 com a maioria dos eventos entre 0,11 a 0,22 para o AMC II. O alto valor encontrado para o evento PA200981, com $\lambda=0,70$ pode ser justificado pela sua condição de umidade do solo extremamente úmida (AMC III), gerando assim menos retenção da água e muito escoamento superficial.

Analisando os resultados encontrados para todos os eventos é possível perceber um padrão geral, onde o λ necessário para produzir um melhor ajuste entre a chuva excedente calculada e observada foi menor quanto mais seco o solo, ou menor o AMC, o que indica uma coerência com os processos físicos envolvidos e sugere que o λ do método SCS-CN deve ser variado em função do AMC, não o considerando constante.

Apesar de o valor padrão do método proposto pelo SCS-CN ser de 0,20, diversos estudos indicam que esse valor é demasiado elevado, propondo valores entre 0,01 e 0,05 (Beck et al., 2009).

Woodward et al. (2003) utilizam dados de chuva-vazão de 307 bacias hidrográficas dos Estados Unidos para determinar uma melhor relação entre a abstração inicial e o número CN. Em geral, os resultados mostram que o λ não é constante de bacia para bacia ou entre eventos de chuva, além de o valor de λ assumido pelo SCS ser muito elevado, o que está de acordo com a presente pesquisa, que indica que o valor de λ é variável em cada evento de chuva.

Após realizar a média dos valores calculados para todas as bacias hidrográficas empregadas, os autores chegaram ao valor ideal de $\lambda=0,05$, valor bem abaixo do encontrado para os eventos da sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire, que apesar de possuir eventos com $\lambda=0,05$ apresenta um valor médio de $\lambda=0,13$. Entretanto, os autores do estudo mencionado recomendam que o uso do λ diferente do original seja acompanhado do ajuste dos valores de CN, uma vez que as tabelas utilizadas foram desenvolvidas para $\lambda=0,2$, ajuste esse que não foi realizado na presente pesquisa.

Em seu estudo de uma bacia experimental na Grécia, Baltas et al. (2007) analisaram 18 eventos de chuva-vazão afim de determinar qual o melhor valor da taxa de abstração inicial para uma bacia com diferentes usos do solo e formações geológicas. A pesquisa dividiu a bacia hidrográfica em duas partes, a primeira considerando a parte norte, com características rurais, e a segunda considerando a bacia completa, que continha traços de área urbana. A respeito da taxa de abstração inicial ao norte da bacia, a média alcançada para o λ foi de 0,037, com valores máximo de 0,054 e mínimo de 0,014, enquanto que para a bacia completa, utilizando a mesma condição de umidade antecedente, a média foi de 0,014.

A sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire apresenta características similares as da bacia hidrográfica utilizada por Baltas et al. (2007), com características rurais ao norte e traços de área urbana ao sul. No entanto, apesar de os resultados de λ dos eventos da sub-bacia diferirem dos encontrados pelos referidos autores, os valores estão abaixo do recomendando pelo método tradicional, na faixa de 0,02 a 0,19, excluindo dois eventos com λ maior. Esse comportamento de λ menores é atribuído pelos autores do referido estudo a diferença de usos do solo e da geologia do local, e se aplica na presente sub-bacia.

Mais recentemente, utilizando o mesmo modelo aqui apresentado, Costa (2017) testou valores de λ que variavam de 0,05 a 0,50, para a sub-bacia hidrográfica Cascata I, localizada na Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio e com características predominantemente urbanas. A análise dos resultados concluiu que os menores valores de λ obtiveram um melhor desempenho para a sub-bacia, sendo o valor de 0,05 definido como o melhor resultado.

Apesar de utilizar o mesmo modelo aqui apresentado, o autor utilizou algumas variantes diferentes, como o fator do tempo de pico, que podem ter influenciado em seus resultados, além disso, apenas a resolução espacial de 30m foi empregada, a partir de dados topográficos do SRTM 30.

Os resultados encontrados por Costa (2017) confirmam os valores obtidos para as resoluções espaciais empregadas na presente pesquisa, e estão de acordo com autores como Baltas (2007) que relaciona os baixos valores de λ com o uso do solo na bacia.

5.4.4. Precipitação excedente

O cálculo da precipitação excedente utilizou as mesmas equações propostas pelo método desenvolvido pelo SCS-CN-HUT, apresentadas no item 2.3.2, porém considerando as variabilidades físicas da sub-bacia de forma distribuída pixel a pixel.

Para que essa variabilidade pudesse ser inserida nas equações foi realizada uma análise detalhada do grupo hidrológico da sub-bacia (item 4.1.3), AMC de cada evento (item 4.5.1), número CN dos diferentes usos do solo (item 4.5.2) e definição do λ para cada evento (item 4.5.3), resultando assim em mapas de precipitação excedente que não generalizaram os resultados encontrados, mas forneceram os valores respeitando a variação de cada pixel.

Para o cálculo da precipitação excedente conforme a EQUAÇÃO 6 foi necessário calcular o armazenamento (S) da sub-bacia. Por ser dependente do número CN foram obtidos três mapas de S diferentes para todas as resoluções espaciais, variando conforme o AMC do evento e, conseqüentemente, do CN.

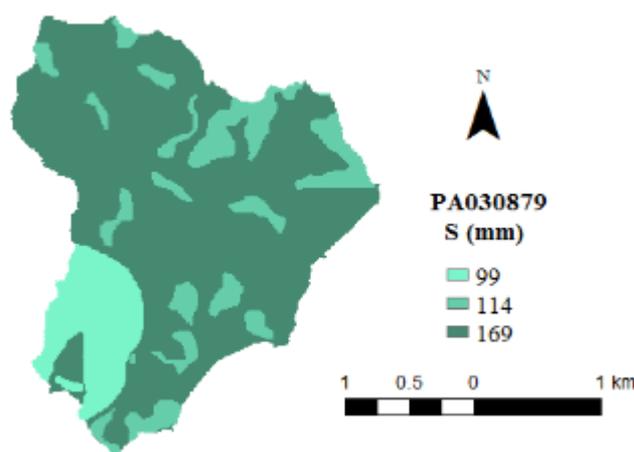
Na TABELA 32 são expostos os valores de S para as três condições de umidade. Para melhor ilustrar os valores é apresentado na FIGURA 61 o mapa de S do evento PA030879, para o AMC II e resolução espacial MDT LiDAR 1m.

TABELA 32 – ARMAZENAMENTO (S) PARA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT HILAIRE CONFORME AMC ADOTADO

Uso do solo	AMC I		AMC II		AMC III	
	CN	S (mm)	CN	S (mm)	CN	S (mm)
Área Urbana	53	225	72	99	89	31
Solo Exposto	50	254	69	114	86	41
Vegetação	40	381	60	169	79	68

FONTE: A autora (2018).

FIGURA 61 – ARMAZENAMENTO (S) PARA AMC II PARA O MDT LiDAR 1m



FONTE: A autora (2018).

O cálculo da parcela da precipitação que não gerou escoamento superficial, ou perdas iniciais (I_a), foi realizado através da EQUAÇÃO 8 de duas maneiras diferentes, a primeira considerando a taxa de abstração inicial padrão ($\lambda=0,2$) do método desenvolvido pelo SCS-CN-HUT e a segunda considerando o λ ajustado para cada evento conforme exposto no item 4.5.3.

Os resultados apresentados na TABELA 33 são referentes ao $\lambda=0,2$ e apresentam apenas os valores de I_a atribuídos ao S encontrado para cada AMC. Já os resultados apresentados na TABELA 34 expõem o I_a de cada evento, pois apesar de o S ser o mesmo do utilizado no I_a do $\lambda=0,2$, nesse caso o λ é variável.

TABELA 33 – PERDAS INICIAIS (I_a) PARA O λ PADRÃO ($\lambda = 0,2$)

Uso do solo	AMC I		AMC II		AMC III	
	CN	I_a (mm)	CN	I_a (mm)	CN	I_a (mm)
Área Urbana	53	45.05	72	19.76	89	6.28
Solo Exposto	50	50.80	69	22.82	86	8.27
Vegetação	40	76.20	60	33.87	79	13.50

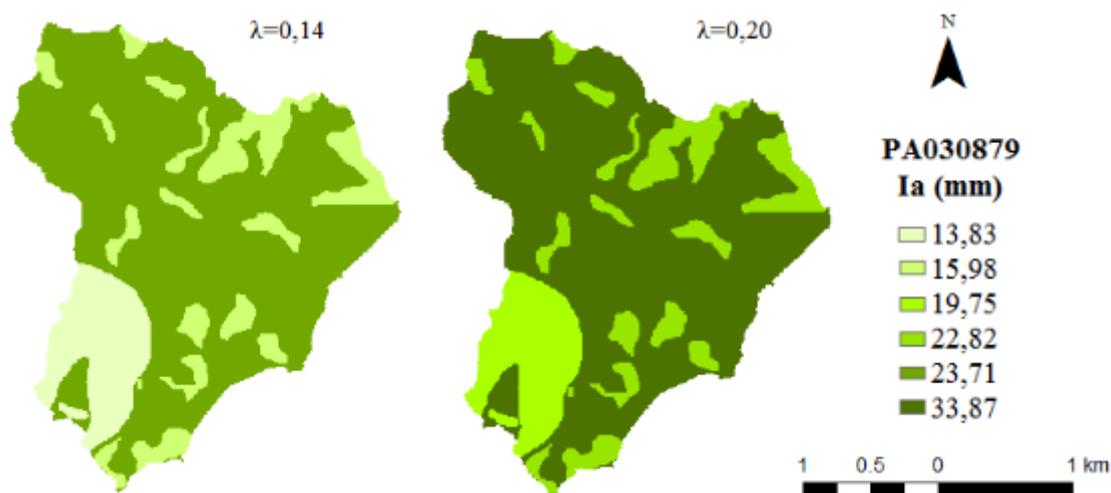
FONTE: A autora (2018).

TABELA 34 – PERDAS INICIAIS (Ia) PARA O λ AJUSTADO

ID Evento	Data	AMC	λ ajustado	Ia (mm)		
				Área urbana	Solo exposto	Vegetação
PA180579	18/05/1979	II	0.17	16.79	19.40	28.79
PA200779	20/07/1979	II	0.22	21.73	25.11	37.25
PA030879	03/08/1979	II	0.14	13.83	15.98	23.71
PA050280	05/02/1980	I	0.05	11.26	12.70	19.05
PA160280	16/02/1980	I	0.02	4.50	5.08	7.62
PA030380	03/03/1980	III	0.04	1.26	1.65	2.70
PA310580	31/05/1980	II	0.10	9.88	11.41	16.93
PA080780	08/07/1980	I	0.02	4.50	5.08	7.62
PA310880	31/08/1980	II	0.08	7.90	9.13	13.55
PA081180	08/11/1980	I	0.05	11.26	12.70	19.05
PA301180	30/11/1980	II	0.08	7.90	9.13	13.55
PA141280	14/12/1980	II	0.05	4.94	5.71	8.47
PA181280	18/12/1980	I	0.02	4.50	5.08	7.62
PA110781	11/07/1981	II	0.11	10.87	12.55	18.63
PA260881	26/08/1981	II	0.19	18.77	21.68	32.17
PA200981	20/09/1981	III	0.70	21.98	28.94	47.26
PA051281	05/12/1981	II	0.16	15.80	18.26	27.09
PA030282	03/02/1982	I	0.12	27.03	30.48	45.72

FONTE: A autora (2018).

A FIGURA 62 apresenta o mapa de Ia do evento PA030879, para a resolução espacial MDT LiDAR 1m, para os λ padrão e ajustado.

FIGURA 62 – PERDAS INICIAS (Ia) PARA O λ PADRÃO ($\lambda = 0,2$) E λ AJUSTADO ($\lambda = 0,14$) PARA O MDT LiDAR 1m

FONTE: A autora (2018).

Após a obtenção do armazenamento (S) e das perdas iniciais (Ia) de forma distribuída, a precipitação excedente para a sub-bacia foi calculada pixel a pixel (EQUAÇÃO 6) para o $\lambda=0,2$ e λ ajustado por evento, em cada um dos 18 eventos e resoluções espaciais estudados.

Os resultados obtidos para a precipitação excedente (Pexc) de cada evento por meio da utilização do $\lambda=0,2$ são apresentados na TABELA 35, que por considerar a variabilidade física da sub-bacia é exposta de acordo com o uso do solo.

TABELA 35 – PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE PARA $\lambda=0,2$

ID do evento	Data	AMC	λ padrão	Pexc (mm)		
				Área urbana	Solo exposto	Vegetação
PA180579	18/05/1979	II	0.20	1.526	0.805	0.000
PA200779	20/07/1979	II	0.20	2.294	1.364	0.027
PA030879	03/08/1979	II	0.20	0.702	0.263	0.000
PA050280	05/02/1980	I	0.20	0.000	0.000	0.000
PA160280	16/02/1980	I	0.20	0.000	0.000	0.000
PA030380	03/03/1980	III	0.20	0.572	0.147	0.000
PA310580	31/05/1980	II	0.20	0.000	0.000	0.000
PA080780	08/07/1980	I	0.20	0.000	0.000	0.000
PA310880	31/08/1980	II	0.20	0.000	0.000	0.000
PA081180	08/11/1980	I	0.20	0.000	0.000	0.000
PA301180	30/11/1980	II	0.20	0.000	0.000	0.000
PA141280	14/12/1980	II	0.20	0.000	0.000	0.000
PA181280	18/12/1980	I	0.20	0.000	0.000	0.000
PA110781	11/07/1981	II	0.20	0.059	0.000	0.000
PA260881	26/08/1981	II	0.20	1.116	0.525	0.000
PA200981	20/09/1981	III	0.20	12.287	9.255	4.368
PA051281	05/12/1981	II	0.20	0.606	0.208	0.000
PA030282	03/02/1982	I	0.20	0.052	0.000	0.000

FONTE: A autora (2018).

Segundo o método proposto pelo SCS-CN-HUT, para que seja gerada precipitação excedente em uma área é necessário que a quantidade precipitada seja maior do que as perdas iniciais (EQUAÇÃO 6), caso contrário não há geração de escoamento superficial (EQUAÇÃO 7).

Analisando a TABELA 35 é possível perceber que para o $\lambda=0,2$, utilizado para calcular as perdas iniciais, alguns eventos não geraram escoamento superficial em determinados usos do solo. Para os eventos PA180579, PA030879, PA030380, PA260881 e PA051281 não houve Pexc em áreas de vegetação, enquanto que para os eventos PA110781 e PA030282 não houve Pexc tanto para as áreas de vegetação quanto solo exposto.

Para a maioria dos eventos a utilização do $\lambda=0,2$ não resultou em escoamento superficial, sendo registrado escoamento superficial em todos os usos do solo em apenas dois

eventos, PA200779 e PA200981. Esse resultado vai no mesmo sentido do exposto pela literatura científica de que o valor da abstração inicial atribuído como padrão do método SCS-CN-HUT ($\lambda=0,2$) é demasiado elevado (Woodward et al., 2003; Baltas et al., 2007; Yuan et al., 2012; Costa, 2017).

As precipitações excedentes resultantes da utilização de λ ajustados para cada evento são apresentadas na TABELA 36, também expostas conforme o uso do solo da sub-bacia.

TABELA 36 – PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE PARA λ AJUSTADO

ID do evento	Data	AMC	λ ajustado	Pexc (mm)		
				Área urbana	Solo exposto	Vegetação
PA180579	18/05/1979	II	0.17	2.238	1.412	0.094
PA200779	20/07/1979	II	0.22	1.801	0.949	0.000
PA030879	03/08/1979	II	0.14	1.883	1.227	0.129
PA050280	05/02/1980	I	0.05	0.621	0.433	0.049
PA160280	16/02/1980	I	0.02	1.099	0.916	0.441
PA030380	03/03/1980	III	0.04	2.229	1.660	0.870
PA310580	31/05/1980	II	0.10	0.725	0.439	0.018
PA080780	08/07/1980	I	0.02	0.636	0.517	0.216
PA310880	31/08/1980	II	0.08	0.753	0.497	0.066
PA081180	08/11/1980	I	0.05	1.339	1.020	0.269
PA301180	30/11/1980	II	0.08	1.087	0.759	0.159
PA141280	14/12/1980	II	0.05	0.350	0.295	0.037
PA181280	18/12/1980	I	0.02	0.539	0.434	0.172
PA110781	11/07/1981	II	0.11	1.167	0.752	0.074
PA260881	26/08/1981	II	0.19	1.313	0.679	0.000
PA200981	20/09/1981	III	0.70	2.865	0.362	0.000
PA051281	05/12/1981	II	0.16	1.299	0.736	0.003
PA030282	03/02/1982	I	0.12	1.870	1.195	0.020

FONTE: A autora (2018).

Em contrapartida aos resultados da Pexc utilizando $\lambda=0,2$, a maioria dos eventos que utilizaram o λ ajustado apresentaram escoamento superficial, resultando em apenas três eventos sem valores de Pexc para as áreas recobertas por vegetação (PA200779, PA260881 e PA200981).

O cálculo do coeficiente de escoamento superficial ($C_{\text{superficial}}$), realizado através da EQUAÇÃO 19, tanto para os dados observados quanto para os eventos com λ padrão e ajustado, é apresentado na TABELA 37.

Avaliando os resultados é possível perceber um aumento do $C_{\text{superficial}}$ em relação aos dados observados e à medida que o λ diminui. Além disso, fica visível a relação entre as variáveis Pexc, apresentada nas TABELAS 35 e 36, $C_{\text{superficial}}$ e λ , pois a medida que o λ diminui, ocorre mais escoamento, aumentando a Pexc e o $C_{\text{superficial}}$.

TABELA 37 – COEFICIENTES DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA DADOS OBSERVADOS E EVENTOS COM λ PADRÃO E AJUSTADO

ID do evento	Data	Csuperficial	Csuperficial eventos λ padrão					Csuperficial eventos λ ajustado				
		Dados observados	MDT LiDAR 1m	MDT LiDAR 2m	MDT LiDAR 10m	MDT LiDAR 30m	MDE SRTM 30m	MDT LiDAR 1m	MDT LiDAR 2m	MDT LiDAR 10m	MDT LiDAR 30m	MDE SRTM 30m
PA180579	18/05/1979	0.017	0.273	0.272	0.272	0.273	0.275	0.502	0.502	0.501	0.503	0.505
PA200779	20/07/1979	0.024	0.391	0.391	0.391	0.392	0.395	0.291	0.291	17.457	0.292	0.294
PA030879	03/08/1979	0.035	0.129	0.129	0.129	0.130	0.131	0.517	0.517	0.515	0.517	0.518
PA050280	05/02/1980	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.211	0.211	0.211	0.211	0.212
PA160280	16/02/1980	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.828	0.829	0.826	0.827	0.820
PA030380	03/03/1980	0.105	0.244	0.244	0.244	0.246	0.247	3.102	3.103	3.091	3.098	3.069
PA310580	31/05/1980	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.262	0.262	0.262	0.263	0.264
PA080780	08/07/1980	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.310	0.310	0.309	0.309	0.307
PA310880	31/08/1980	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.336	0.336	0.336	0.337	0.338
PA081180	08/11/1980	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.512	0.512	0.510	0.511	0.509
PA301180	30/11/1980	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.565	0.566	0.564	0.565	0.564
PA141280	14/12/1980	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.300	0.300	0.299	0.300	0.299
PA181280	18/12/1980	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.508	0.508	0.506	0.507	0.503
PA110781	11/07/1981	0.021	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.398	0.398	0.397	0.399	0.400
PA260881	26/08/1981	0.023	0.200	0.200	0.200	0.201	0.202	0.248	0.248	0.248	0.249	0.251
PA200981	20/09/1981	0.034	5.421	5.422	5.403	5.415	5.367	0.348	0.348	0.348	0.351	0.352
PA051281	05/12/1981	0.021	0.104	0.104	0.103	0.104	0.105	0.276	0.276	0.276	0.277	0.279
PA030282	03/02/1982	0.012	7.000	0.004	0.004	0.004	0.004	0.245	0.245	0.244	0.245	0.247

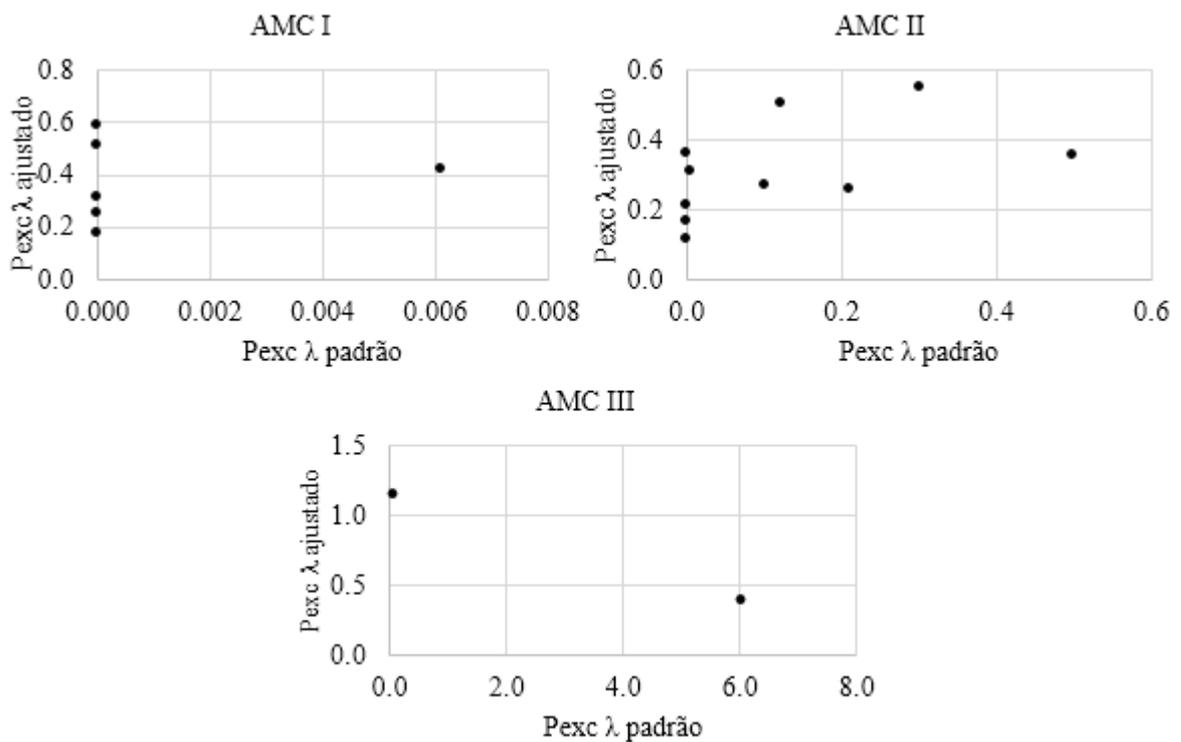
FONTE: A autora (2018).

LEGENDA: Csuperficial = Coeficiente de Escoamento Superficial.

Para uma melhor análise da P_{exc} foi realizada a média ponderada espacialmente para obter a média da bacia em cada evento, apresentando o resultado de acordo com o AMC e λ , padrão e ajustado, de cada evento (FIGURA 63).

Dessa forma, através dos gráficos da FIGURA 63 é possível visualizar o aumento da P_{exc} à medida que o AMC do evento aumenta ou seja, a medida que o solo fica mais úmido, e à medida que o λ é passado do padrão para o ajustado, indicando a forte relação da P_{exc} com o AMC e λ .

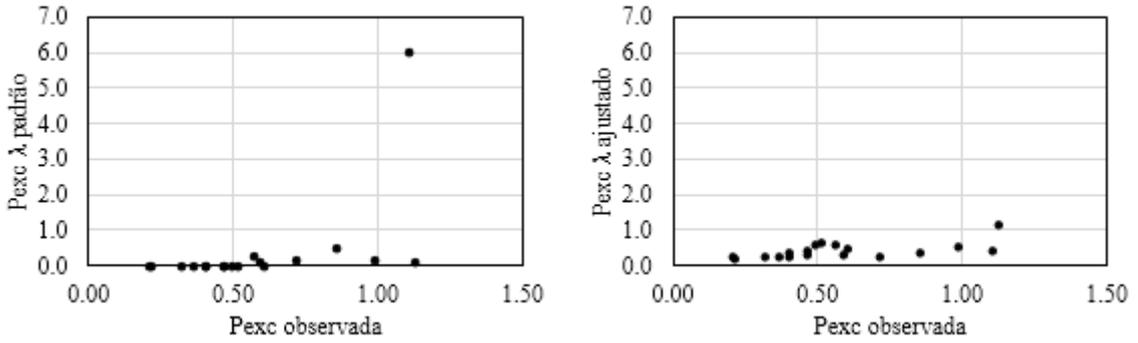
FIGURA 63 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DA P_{exc} PARA λ PADRÃO E AJUSTADO



FONTE: A autora (2018).

Além disso, o gráfico da FIGURA 64, que relaciona a precipitação excedente (P_{exc}) dos dados observados e a precipitação excedente (P_{exc}) de cada evento, tanto para o λ padrão quanto ajustado, mostra que os valores médios de P_{exc} calculados para os eventos com λ ajustado são menores do que os valores encontrados para o λ padrão e para a P_{exc} observada, reafirmando o exposto na literatura de que o $\lambda=0,20$ é demasiado elevado.

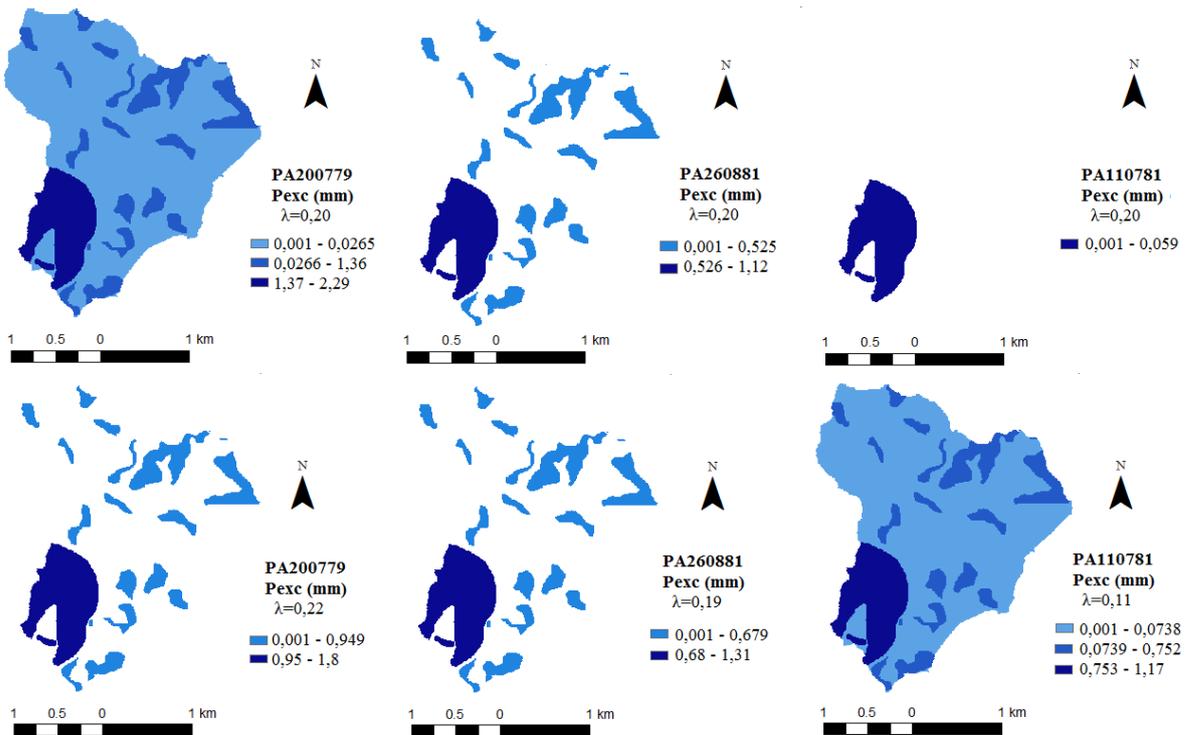
FIGURA 64 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DA Pexc PARA λ PADRÃO E AJUSTADO



FONTE: A autora (2018).

A influência do λ sobre a Pexc pode ser exemplificada através dos três eventos selecionados para compor a FIGURA 65. Pode-se observar onde há e onde não há geração de escoamento, enfatizando que para um mesmo evento quando o valor do λ diminui a Pexc aumenta e quando o valor de λ aumenta a Pexc diminui, como era esperado pela formulação do método SCS-CN.

FIGURA 65 – PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE (Pexc) PARA OS EVENTOS PA200779, PA260881 E PA110781 COM λ PADRÃO E AJUSTADO PARA O MDT LiDAR 1m



FONTE: A autora (2018).

A precipitação excedente foi calculada para os 18 eventos de chuva-vazão selecionados para a sub-bacia hidrográfica Saint Hilaire nas cinco resoluções espaciais empregadas. A resolução espacial trabalhada não tem influência nos valores de S , I_a e P_{exc} , em função da própria formulação do método (EQUAÇÕES 7, 8 e 9). Entretanto, o cálculo para todas as resoluções espaciais se fez necessário para que os arquivos gerados pudessem ser utilizados como entrada no cálculo dos hidrogramas resultantes pela aplicação do HUT.

Avaliando os resultados encontrados para a P_{exc} , com o auxílio das TABELAS 35 e 36 e FIGURA 65, é possível perceber que para todos os eventos os maiores valores de P_{exc} estão localizados na área urbana da sub-bacia, enquanto que as áreas com predominância de solo exposto e vegetação são as que apresentam o menor escoamento superficial. Esse comportamento está de acordo com o método originalmente proposto pelo SCS-CN-HUT, podendo ser confirmado através do AMC (TABELA 13) e do número CN de cada uso do solo (TABELA 16). Áreas com maiores zonas impermeáveis são responsáveis por um maior escoamento superficial, sendo representadas pelos maiores valores de CN, enquanto áreas com menores zonas impermeáveis produzem menos escoamento superficial e são representadas por valores de CN menores.

A taxa de abstração inicial (λ) também exibe uma clara influência na P_{exc} , pois a medida que o λ aumenta a P_{exc} diminui devido a maior retenção da precipitação.

Resultados semelhantes foram alcançados por Lal et al. (2017), que avaliaram o desempenho do método SCS-CN tradicional ($\lambda=0,2$) e estudaram a sensibilidade do escoamento superficial ao λ . Os autores realizaram sua pesquisa em um campo agrícola na Índia dividido em 27 parcelas, com usos do solo que variavam de plantio de cana-de-açúcar, milho, grama preta e terra em pousio, trabalhando com dados de chuva e vazão naturais e ordenados, que consistiam em classificar e realinhar os dados naturais formando um novo conjunto de pares de chuva-vazão com mesmo tempo de retorno.

Os valores λ encontrados pelos autores mencionados para os dados de chuva-vazão ordenados variaram de 0 a 0,659, com média e mediana de 0,108 e 0, respectivamente. Já para os dados naturais, os valores de λ variaram de 0 a 0,208, com média e mediana de 0,030 e 0, respectivamente.

Além disso, os autores verificaram que as estimativas de vazão melhoraram em 26 dos 27 locais estudados ao utilizar um $\lambda=0,030$, concordando com a presente pesquisa de que λ menores apresentam um melhor desempenho, apesar de os valores médios obtidos pelos autores serem bem menores do que a média obtida para a sub-bacia.

5.4.5. Análise dos hidrogramas resultantes

Comparação métodos HUexe e HUjus

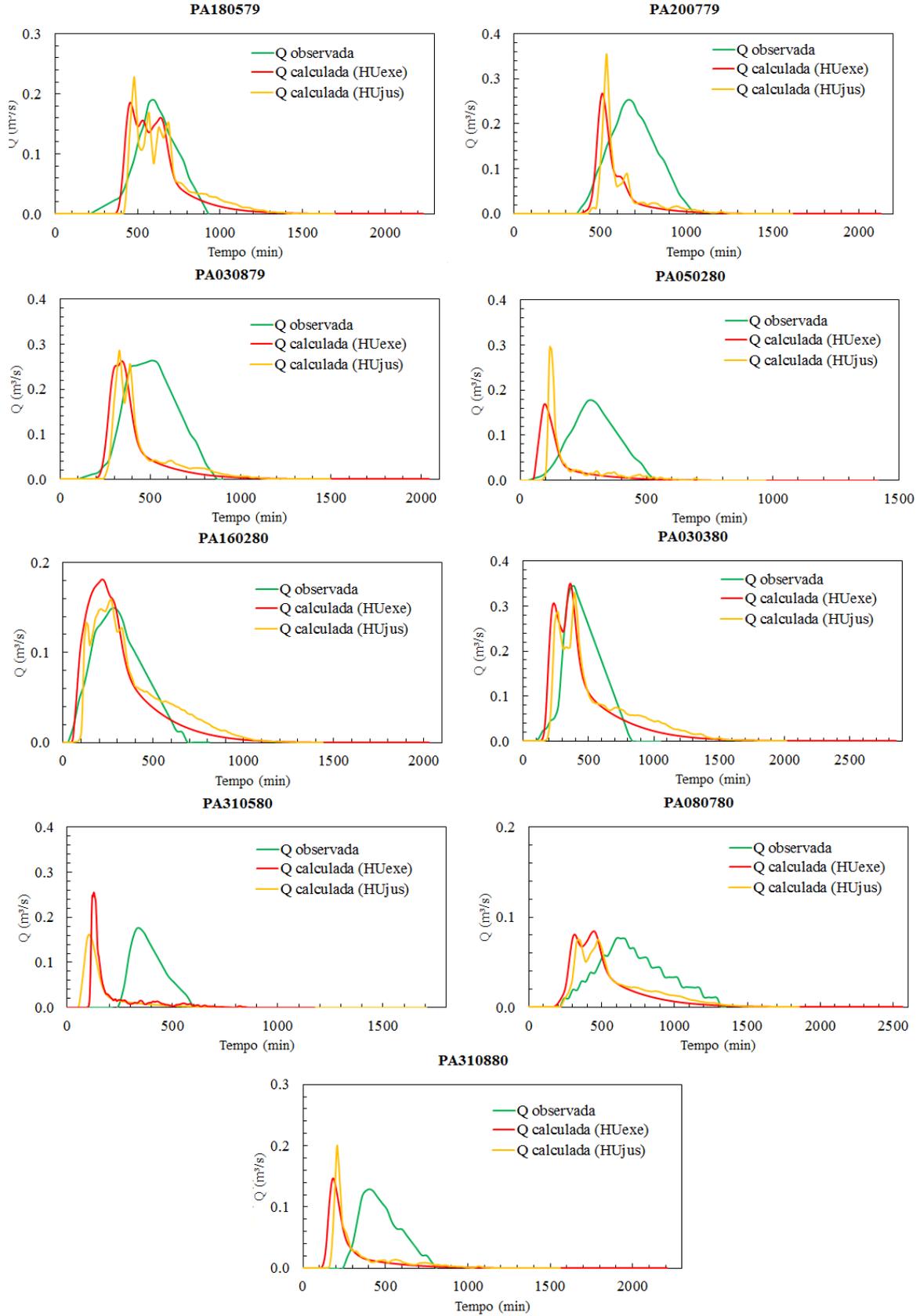
As FIGURAS 66 e 67 exemplificam o processo de inspeção visual realizado para comparação dos hidrogramas calculados e observados nos 18 eventos de chuva-vazão do MDT LiDAR 30m, simulados pelo HUexe e HUjus.

De modo geral, os resultados das duas abordagens foram relativamente semelhantes entre si. Ambas tenderam a antecipar o tempo de pico em relação aos dados observados, com a abordagem do HUexe gerando hidrogramas levemente mais antecipados em alguns eventos em relação aos resultados pela abordagem do HUjus. Além disso, na maioria dos casos, os hidrogramas resultantes da abordagem HUjus possuem uma maior vazão de pico e uma forma mais pontiaguda, apresentando em alguns eventos diversos sub-picos, em relação aos resultados via HUexe.

Os hidrogramas gerados pelo método do HUexe forneceram hidrogramas com tempos de pico antecipados em relação aos dados observados, entretanto, a vazão máxima foi, na maioria dos casos, mais similar a dos dados observados, com hidrogramas mais abaulados onde são observados menos sub-picos do que os gerados pelo HUjus.

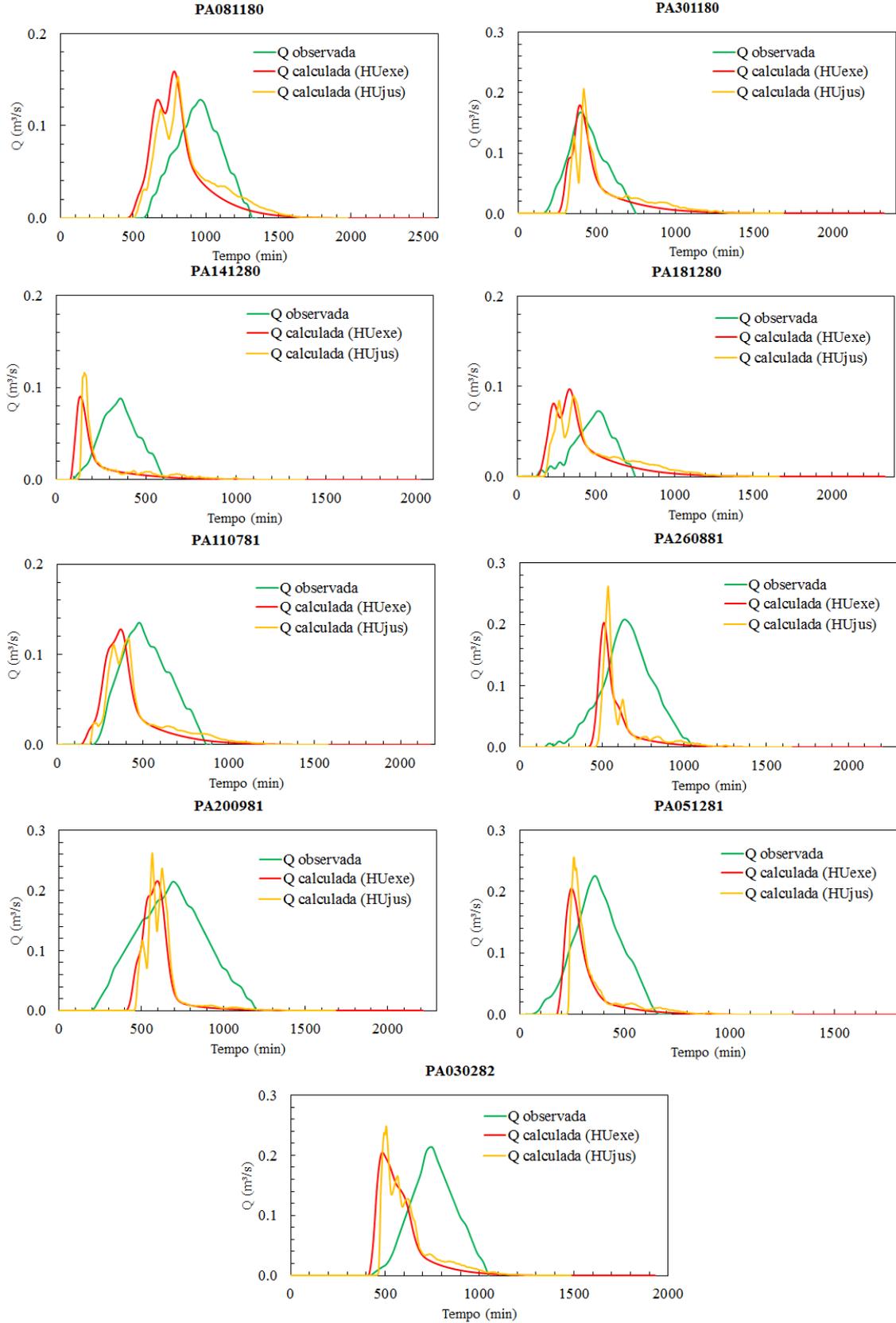
Após analisar as simulações com ambas as abordagens, HUexe e HUjus, identificou-se que os resultados para a sub-bacia foram melhores com a utilização do método HUexe. Por esse motivo o método foi escolhido para realizar as simulações dos 18 eventos selecionados, nas cinco resoluções espaciais empregadas.

FIGURA 66 – HIDROGRAMAS RESULTANTES OBTIDOS ATRAVÉS DO HU_{EXE} E HU_{JUS} PARA O MDT LiDAR 30m (EVENTOS PA180579, PA200779, PA030879, PA050280, PA160280, PA030380, PA310580, PA080780, PA310880)



FONTE: A autora (2018).

FIGURA 67 – HIDROGRAMAS RESULTANTES OBTIDOS ATRAVÉS DO HU_{EXE} E HU_{JUS} PARA O MDT LiDAR 30m (EVENTOS PA081180, PA301180, PA141280, PA181280, PA110781, PA260881, PA200981, PA051281, PA030282)



FONTE: A autora (2018).

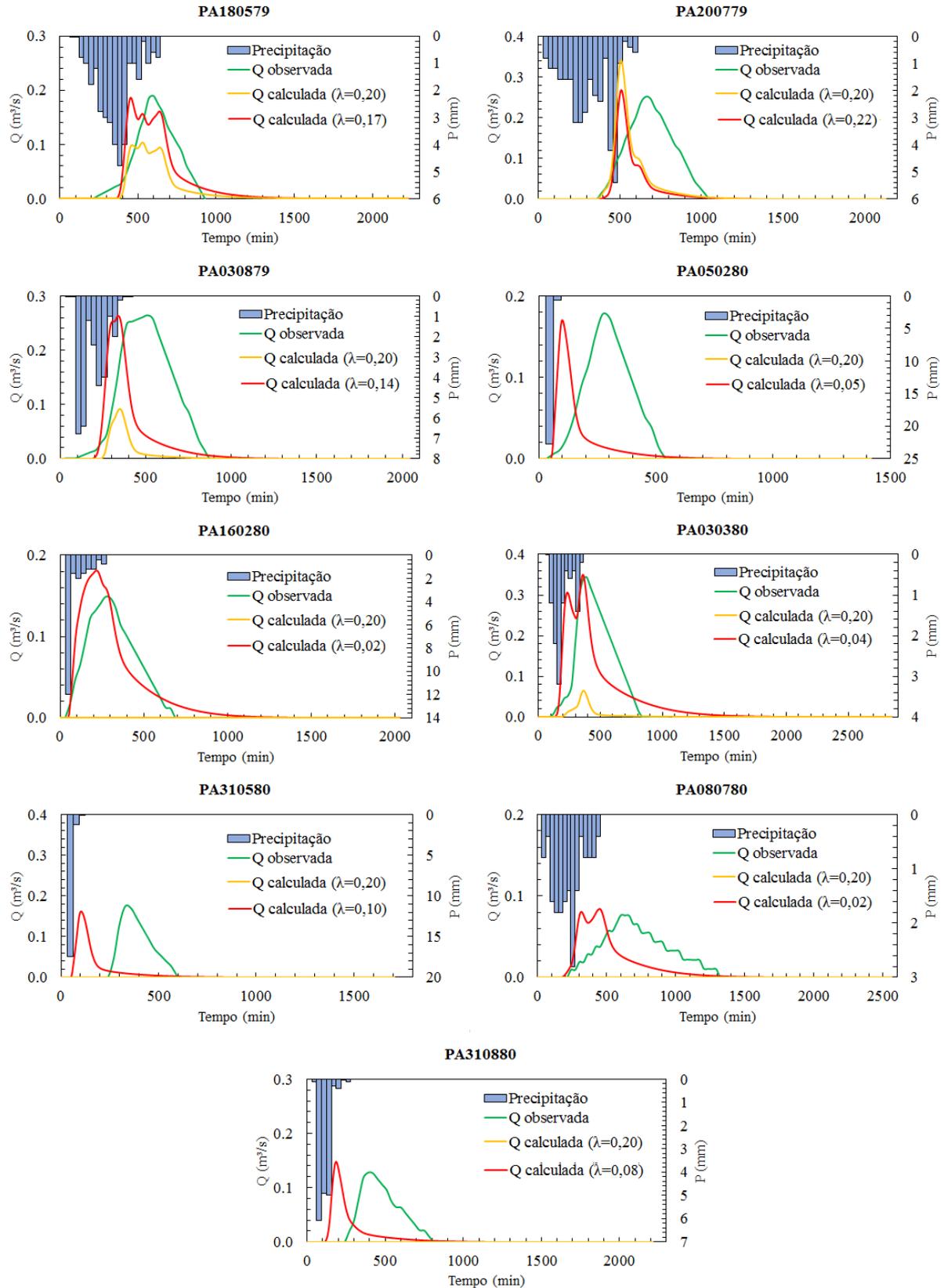
Comparação λ padrão e λ ajustado pelo MDT LiDAR 30m

Após definido o método de cálculo do hidrograma resultante, foram obtidos os resultados para os eventos de chuva-vazão das demais resoluções espaciais, variando o valor da taxa de abstração inicial em cada evento em $\lambda=0,2$ e λ ajustado.

Como apresentado na TABELA 35, devido ao alto valor do λ padrão alguns eventos não geraram escoamento superficial, impossibilitando assim o cálculo do hidrograma resultante. Entretanto, quando aplicado o λ ajustado não foram registrados eventos sem escoamento superficial em nenhuma área da sub-bacia (TABELA 36), sendo possível gerar os hidrogramas resultantes de todos os eventos em todas as resoluções espaciais.

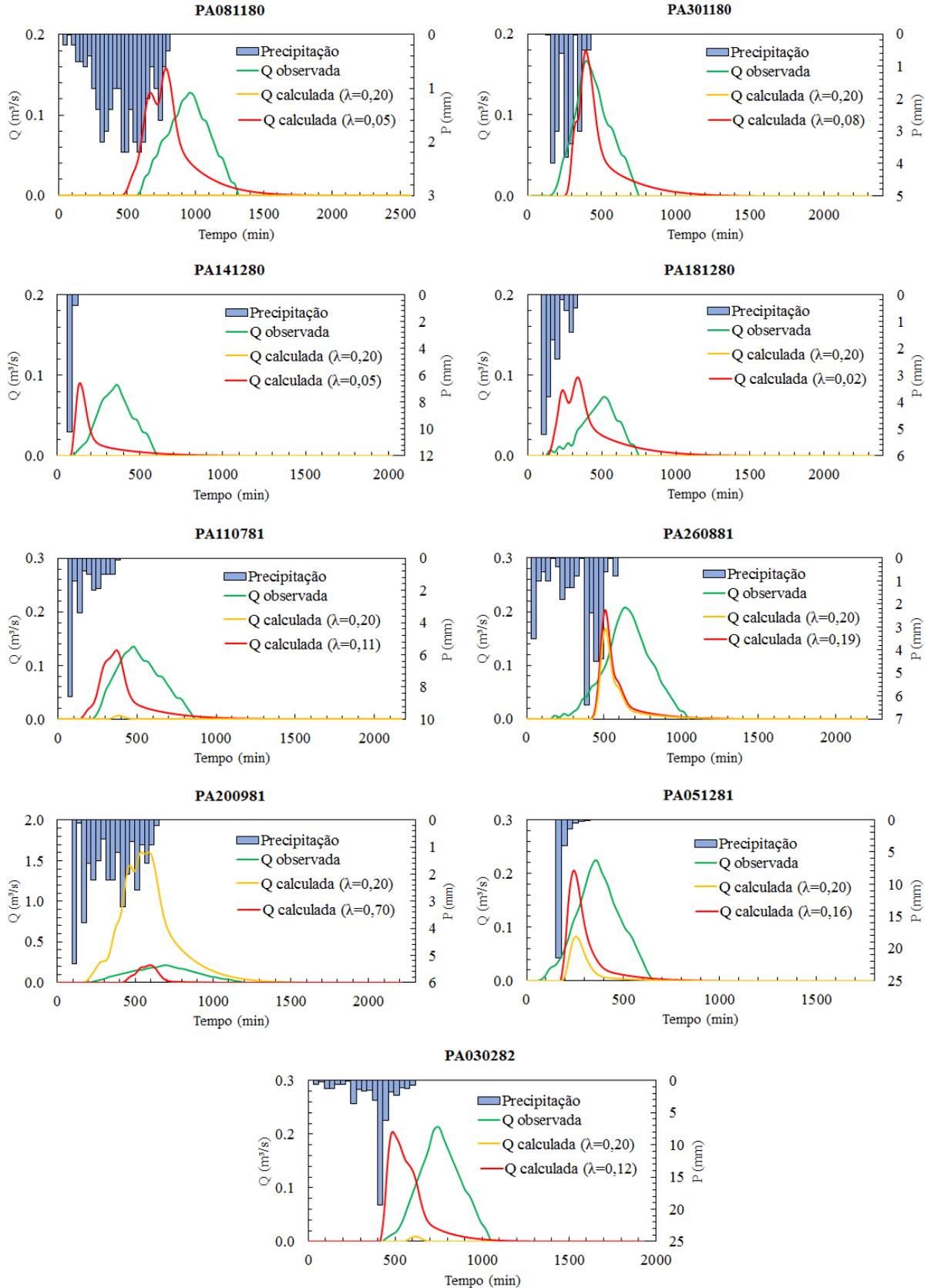
As FIGURAS 68 e 69 expõem de outra maneira a diferença dos hidrogramas resultantes do MDT LiDAR 30m quando o valor do λ é alterado, e é possível visualizar mais claramente a influência dessa alteração em cada evento. Os gráficos das demais resoluções espaciais são apresentados no APÊNDICE A.

FIGURA 68 – COMPARAÇÃO DO HIDROGRAMA RESULTANTE COM λ PADRÃO E λ AJUSTADO PARA O MDT LiDAR 30m (EVENTOS PA180579, PA200779, PA030879, PA050280, PA160280, PA030380, PA310580, PA080780, PA310880)



FONTE: A autora (2018).

FIGURA 69 – COMPARAÇÃO DO HIDROGRAMA RESULTANTE COM λ PADRÃO E λ AJUSTADO PARA O MDT LiDAR 30m (EVENTOS PA081180, PA301180, PA141280, PA181280, PA110781, PA260881, PA200981, PA051281, PA030282)



FONTE: A autora (2018).

Assumindo o λ ajustado como o responsável pelo melhor resultado do hidrograma resultante em cada evento, para melhor quantificar as diferenças entre a vazão observada e calculada em cada resolução espacial, as FIGURAS 70, 71 e 72 apresentam a diferença relativa calculada pela EQUAÇÃO 14, do tempo de pico (t_p), vazão de pico (Q_p) e volume (V) dos eventos para o λ padrão e λ ajustado

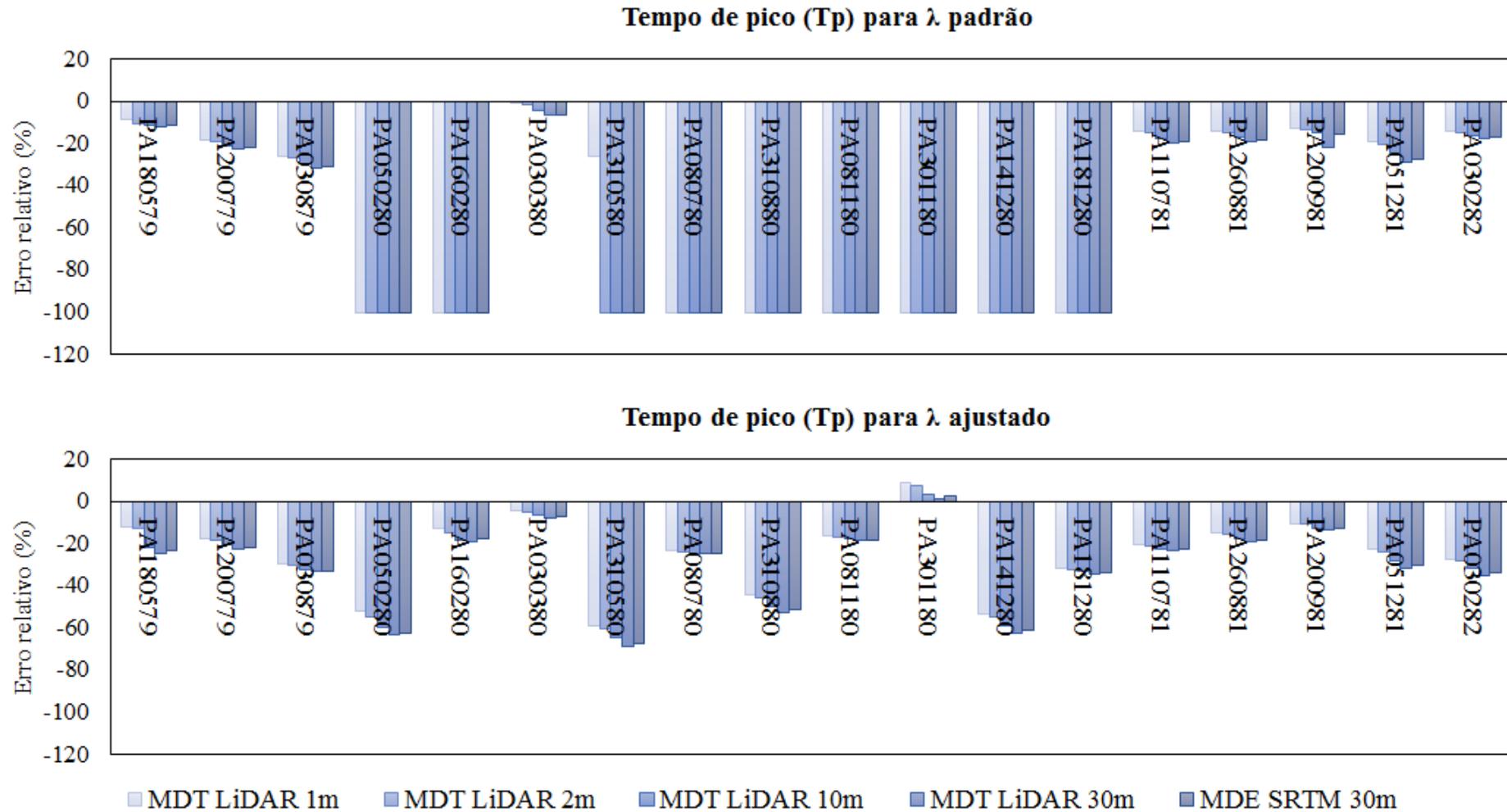
Analisando a FIGURA 70, referente ao tempo de pico (t_p), para todos os eventos com λ ajustado, à medida que a resolução espacial do LiDAR aumenta a diferença relativa diminui, indicando uma diminuição da diferença do t_p calculado quando comparado com o t_p observado. De certa forma, pode estar havendo uma compensação de fatores: (i) por um lado, quanto maior a resolução espacial, tem-se caminhos de fluxo e redes de drenagem mais extensas, devido à maior sinuosidade, o que leva a maiores tempos de deslocamento do escoamento; (ii) por outro lado, a tendência da metodologia de simulação chuva-vazão adotada neste trabalho foi de antecipar os tempos de pico. Logo, quanto maior o retardo do escoamento devido ao fator (i) maior a compensação do efeito trazido pelo fator (ii).

Os valores de diferença relativa calculada para o SRTM com λ ajustado seguem a mesma regra, entretanto a diferença é menor do que o registrado pelo MDT LiDAR 30m, estando assim seus valores de t_p calculado um pouco mais próximos do t_p observado do que o MDT LiDAR 30m.

Em 17 eventos de chuva-vazão trabalhados o valor do t_p calculado foi subestimado, apresentando valores menores do que o t_p observado, tendo na resolução espacial do MDT LiDAR 1m os valores mais próximos ao observado. Enquanto que em apenas um evento, PA301180, em todas as resoluções espaciais o valor de t_p calculado foi superestimado, com o MDT LiDAR 30m sendo a resolução espacial que menor diferença apresentou.

Para os eventos com λ padrão, o t_p foi subestimado em todos os eventos, e a diferença relativa foi de 100% em nove eventos (PA080780, PA310880, PA081180, PA301180, PA141280, PA181280, PA310580, PA050280, PA160280) devido à não geração de escoamento. Para os demais a diferença foi menor ou com valores próximos ao calculado para os mesmos eventos com λ ajustado.

FIGURA 70 – COMPARAÇÃO DO TEMPO DE PICO ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E OS RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO SCS-CN-HUT DISTRIBUÍDO COM λ AJUSTADO, PARA CADA EVENTO E CADA RESOLUÇÃO ESPACIAL



FONTE: A autora (2018).

Em relação à vazão de pico (Q_p) exposta na FIGURA 71, para 9 eventos com λ ajustado (PA180579, PA200779, PA030879, PA050280, PA310580, PA110781, PA260881, PA051281, PA030282) à medida que a resolução espacial do LiDAR diminui o valor da diferença relativa diminui, fornecendo valores de Q_p calculado mais próximos ao Q_p observado para o MDT LiDAR 30m, mas sempre subestimando o observado.

Para outros 6 eventos com λ ajustado (PA030380, PA080780, PA310880, PA301180, PA141280 e PA200981) ocorre comportamento similar, no entanto nesses eventos o MDT LiDAR 30m passa a superestimar o valor do Q_p observado. E para os 3 eventos restantes (PA160280, PA081180, PA181280) os MDTs LIDAR 10 e 30m superestimam as Q_p s, sendo mais próximos do observado os valores encontrados para o MDT LiDAR 2m.

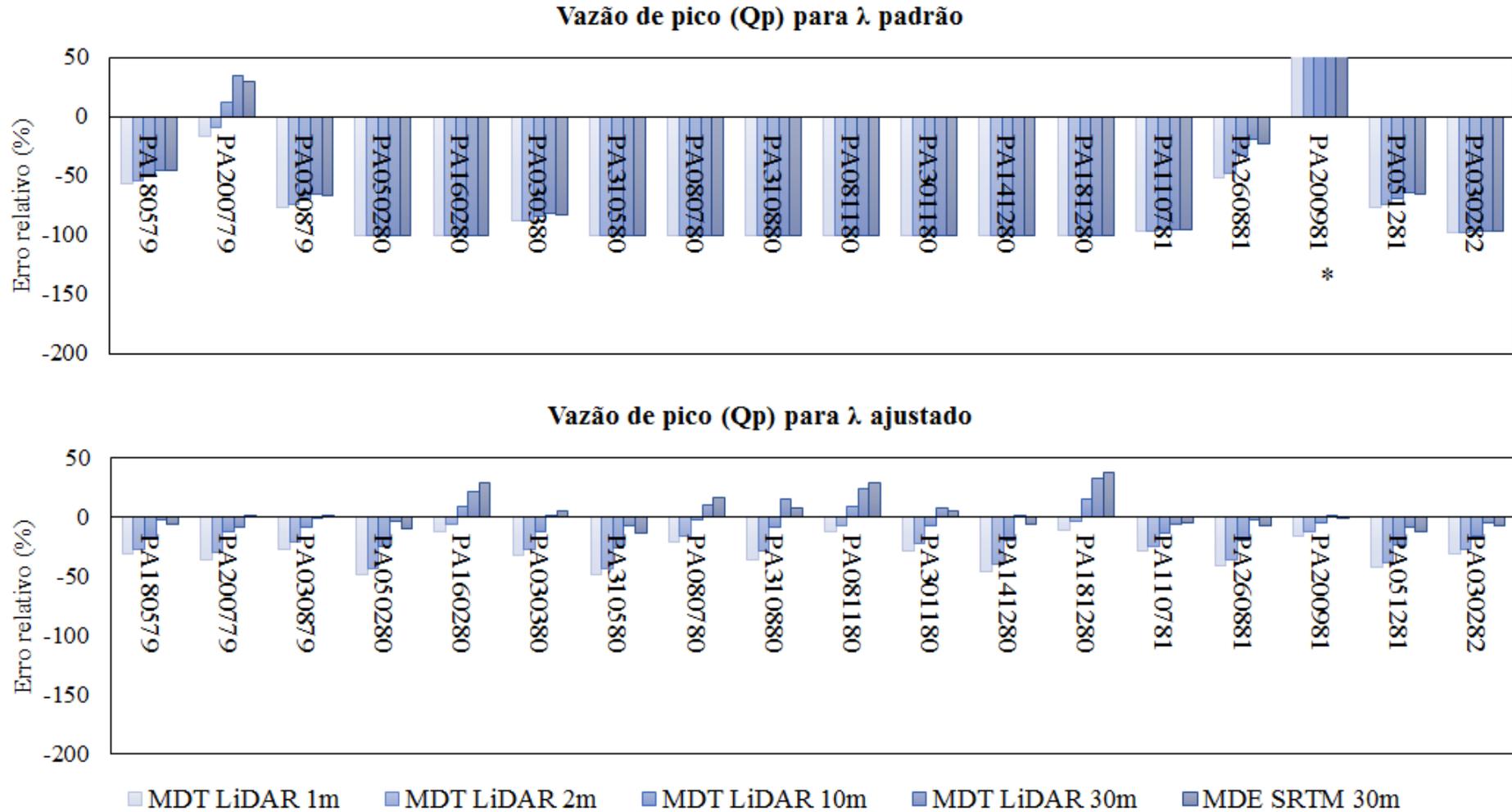
Em relação ao SRTM, 9 eventos com λ ajustado (PA180579, PA050280, PA310580, PA141280, PA110781, PA260881, PA200981, PA051281 e PA030282) subestimam a Q_p observada, apresentando valores de diferença relativa ente o MDT LiDAR 10m e MDT LiDAR 30m. Nos 9 eventos restantes (PAPA200779, PA030879, PA160280, PA030380, PA080780, PA310880, PA081180, PA301180 e PA181280) o valor da diferença é superestimado.

De modo geral, o MDT LiDAR 30m foi o que apresentou as menores diferenças relativas, indicando uma maior proximidade dos valores de Q_p observado e Q_p calculado. Contribuiu para isso o fato de que os λ foram ajustados tomando as simulações com essa resolução espacial e esse MDT.

Para os eventos com λ padrão os valores da diferença relativa são de 100% para 9 eventos (PA050280, PA160280, PA310580, PA080780, PA310880, PA081180, PA301180, PA141280, PA181280) devido à falta de escoamento superficial motivada pelo alto valor de λ empregado. Em 8 eventos (PA180579, PA200779, PA030879, PA030380, PA110781, PA260881, PA051281, PA030282) a diferença relativa calculada é extremamente alta, subestimando os valores de Q_p .

O evento PA200981 apresentou uma diferença relativa na faixa de 400 a 600% para todas as resoluções, valores que podem ser associados ao AMC III e ajuste do $\lambda = 0,70$, que fez com que o λ padrão apresentasse uma diferença relativa muito elevada. Para fins de detalhamento da FIGURA 71, a escala de valores foi reduzida para que os demais eventos fossem melhor visualizados, não mostrando assim o evento PA200981 por completo.

FIGURA 71 – COMPARAÇÃO DA VAZÃO DE PICP ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E OS RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO SCS-CN-HUT DISTRIBUÍDO COM λ AJUSTADO, PARA CADA EVENTO E CADA RESOLUÇÃO ESPACIAL



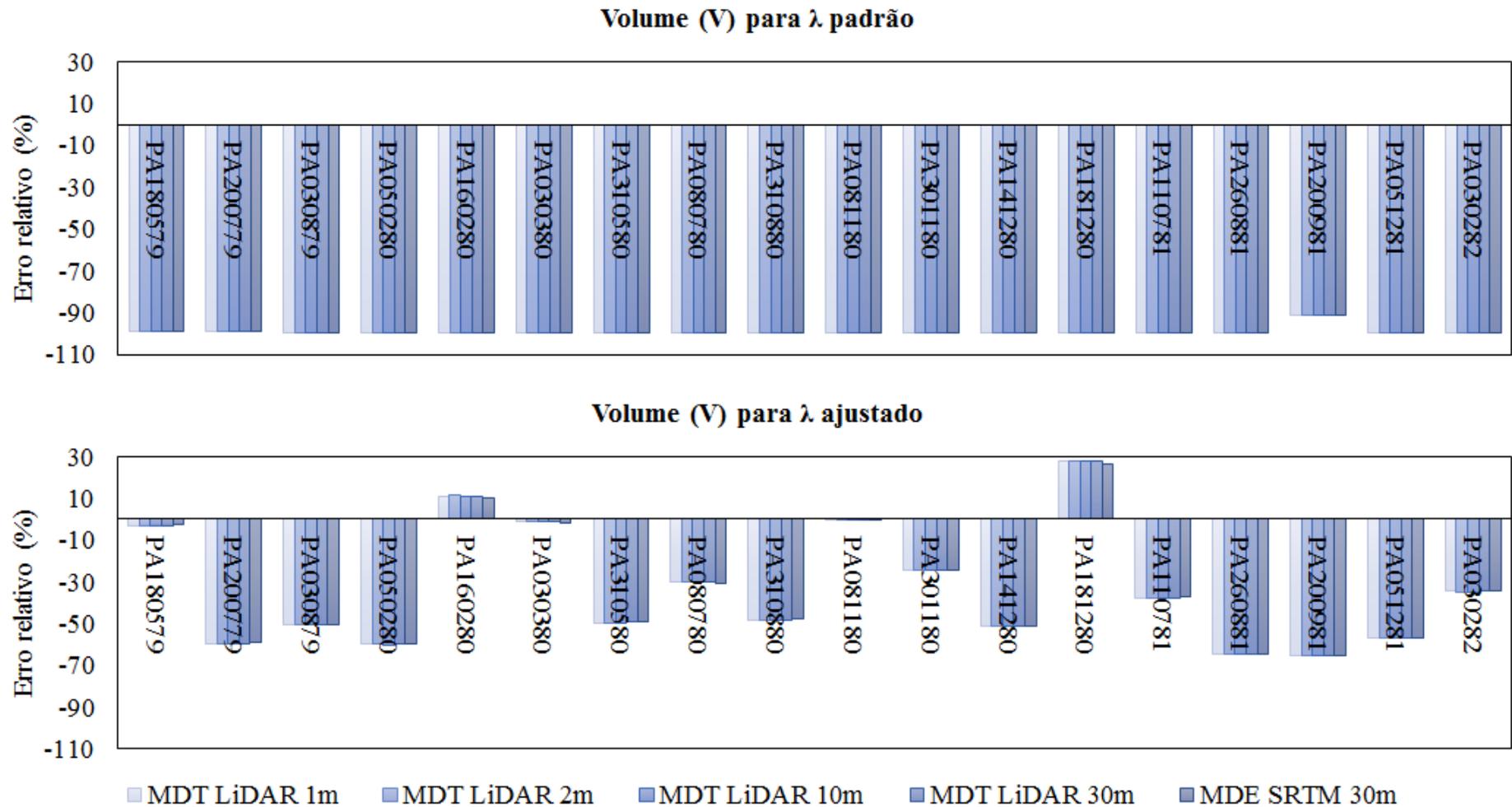
FONTE: A autora (2018).

Na FIGURA 72 são apresentados os resultados da diferença relativa para o volume (V). Em 12 eventos com λ ajustado (PA180579, PA200779, PA030879, PA050280, PA160280, PA310580, PA310880, PA141280, PA181280, PA110781, PA260881, PA200981, PA051281, PA030282) o valor da diferença relativa aumentou conforme diminuiu a resolução espacial para os MDTs LiDAR 1, 2 e 10m, apresentando um comportamento contrário para o MDT LiDAR 30m que obteve os menores valores de diferença relativa entre os dados LiDAR, todos subestimando o V observado.

Quando comparados com o MDE SRTM 30m com λ ajustado 13 eventos (PA180579, PA200779, PA030879, PA050280, PA160280, PA310580, PA310880, PA181280, PA141280, PA181280, PA110781, PA260881, PA200981, PA051281, PA030282) resultaram em diferenças relativas menores, correspondendo a V calculados mais próximos dos V observados, estando apenas um desses eventos superestimando os V observado.

Os eventos com λ padrão apresentaram os mesmos 9 eventos de tp e Qp com valores de diferença relativa de 100%, e os outros 9 eventos possuem diferenças relativas na faixa de 99%, o que distancia muito o volume dos eventos calculados e dos eventos observados.

FIGURA 72 – COMPARAÇÃO DO VOLUME ESCOADO ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E OS RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO SCS-CN-HUT DISTRIBUÍDO COM λ AJUSTADO, PARA CADA EVENTO E CADA RESOLUÇÃO ESPACIAL



FONTE: A autora (2018).

De modo geral percebe-se que as menores resoluções espaciais dos eventos com λ ajustado conseguiram representar mais fielmente a Q_p e V dos dados observados, em contrapartida ao tp que teve seu melhor desempenho localizado no MDT LiDAR 1m.

O comportamento do tp pode ser explicado pela quantidade de pixels que formam a sub-bacia em cada resolução espacial (TABELA 22) e pelo processo de convolução explicado no item 4.7.

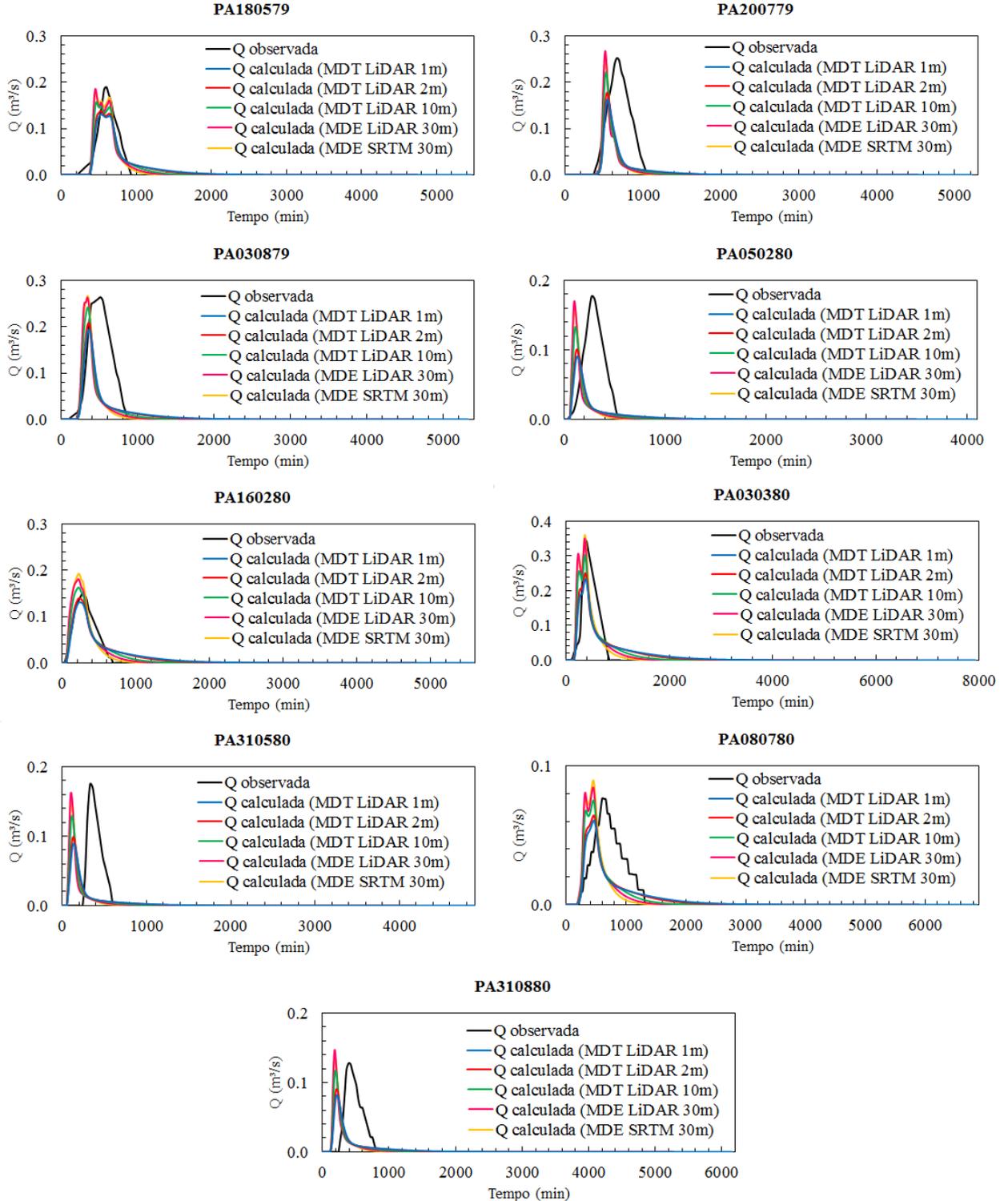
Pelo método distribuído do SCS-CN-HUT, cada pixel da sub-bacia é considerado como se fosse uma bacia hidrográfica de área igual à do pixel da resolução espacial em análise, dessa forma, cada pixel tem seu hidrograma resultante correspondente a sua P_{exc} , e através do método da convolução todos esses hidrogramas são somados no exutório da SBHSB, gerando um único hidrograma resultante.

Resoluções espaciais maiores como a do MDT LiDAR 1m, por exemplo, por conterem mais pixels e proporcionarem maiores tempos de deslocamento do escoamento, geram tempos de base (t_b) maiores em relação a resoluções espaciais menores, como do MDT LiDAR 30m, por exemplo, conseqüentemente refletindo no tp .

Já o fato de os melhores valores para a Q_p e V dos eventos com λ ajustado corresponderem às resoluções espaciais mais baixas, tanto do MDT LiDAR 30m quanto do MDE SRTM 30m, pode ser explicado pelo ajuste do λ de cada evento ter sido realizada com o auxílio do MDT LiDAR 30m, sendo esses valores utilizados nas demais resoluções espaciais (TABELA 31)

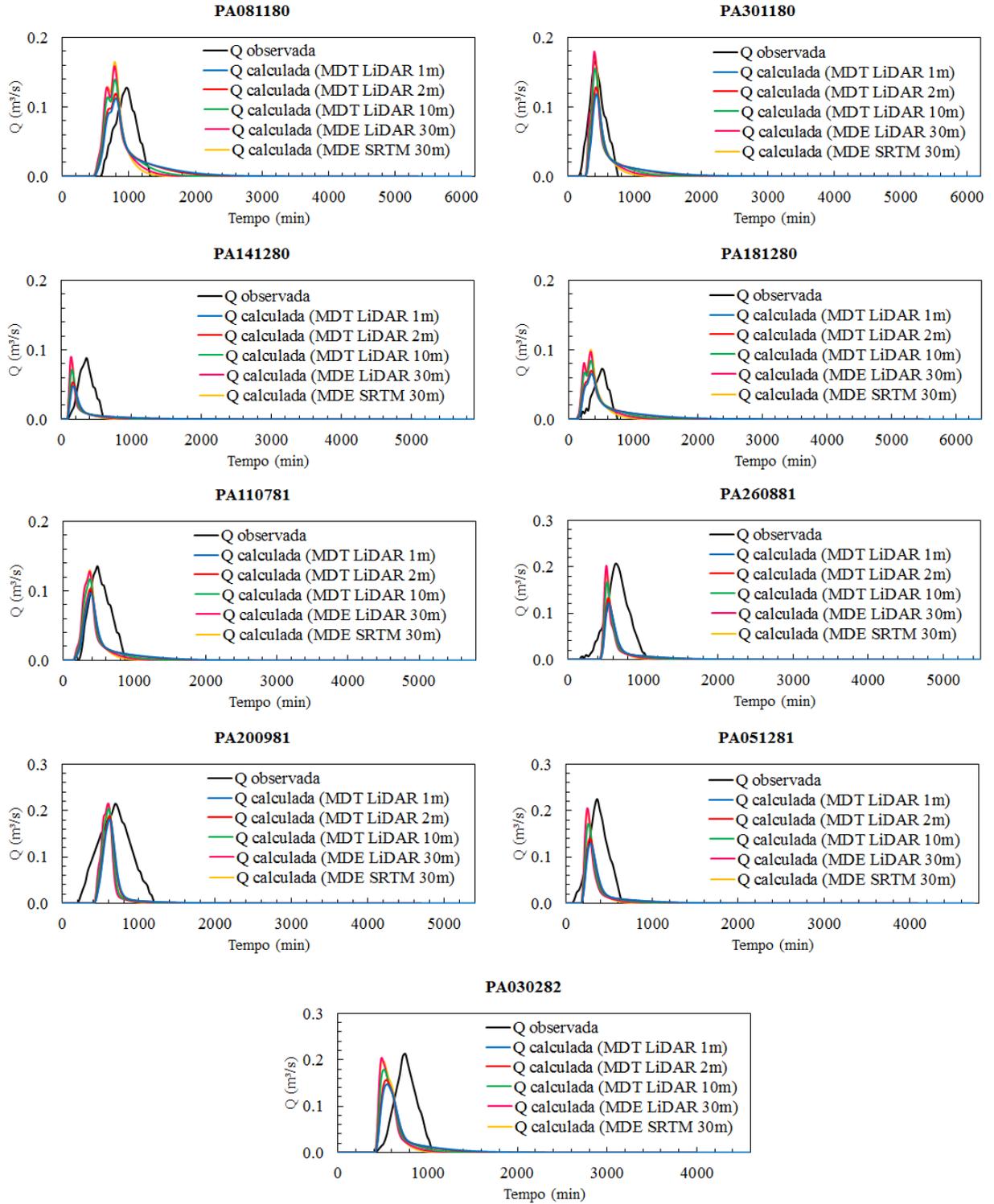
Para exemplificar o impacto da escolha do λ na geração do hidrograma resultante, as FIGURAS 73 e 74 apresentam os hidrogramas resultantes dos 18 em todas as resoluções espaciais empregadas na pesquisa.

FIGURA 73 – COMPARAÇÃO DOS HIDROGRAMAS RESULTANTES NAS CINCO RESOLUÇÕES ESPACIAIS EMPREGADAS (PA180579, PA200779, PA030879, PA050280, PA160280, PA030380, 310580, PA080780, PA310880)



FONTE: A autora (2018).

FIGURA 74 – COMPARAÇÃO DOS HIDROGRAMAS RESULTANTES NAS CINCO RESOLUÇÕES ESPACIAIS EMPREGADAS (PA081180, PA301180, PA141280, PA181280, PA110781, PA260881, PA200981, PA051281, PA030282)



FONTE: A autora (2018).

Análise do reajuste do λ para MDT LiDAR 1m

Como forma de avaliar o comportamento dos hidrogramas resultantes, os 8 eventos selecionados (TABELA 17) para a realização do reajuste do λ a partir do MDT LiDAR 1m, com posterior geração do hidrograma resultante e quantificação das diferenças relativas de t_p , Q_p e V são apresentados na FIGURA 75.

Os valores de λ reajustados com base no MDT LiDAR 1m para todos os 8 eventos selecionados permaneceram próximos dos valores ajustados a partir do MDT LiDAR 30m. Assim, tais valores ajustados para o MDT LiDAR 1m foram também menores do que o recomendado pelo método tradicional ($\lambda=0,2$), com variações sempre para redução em relação ao ajustado para o MDT LiDAR 30m (TABELA 38).

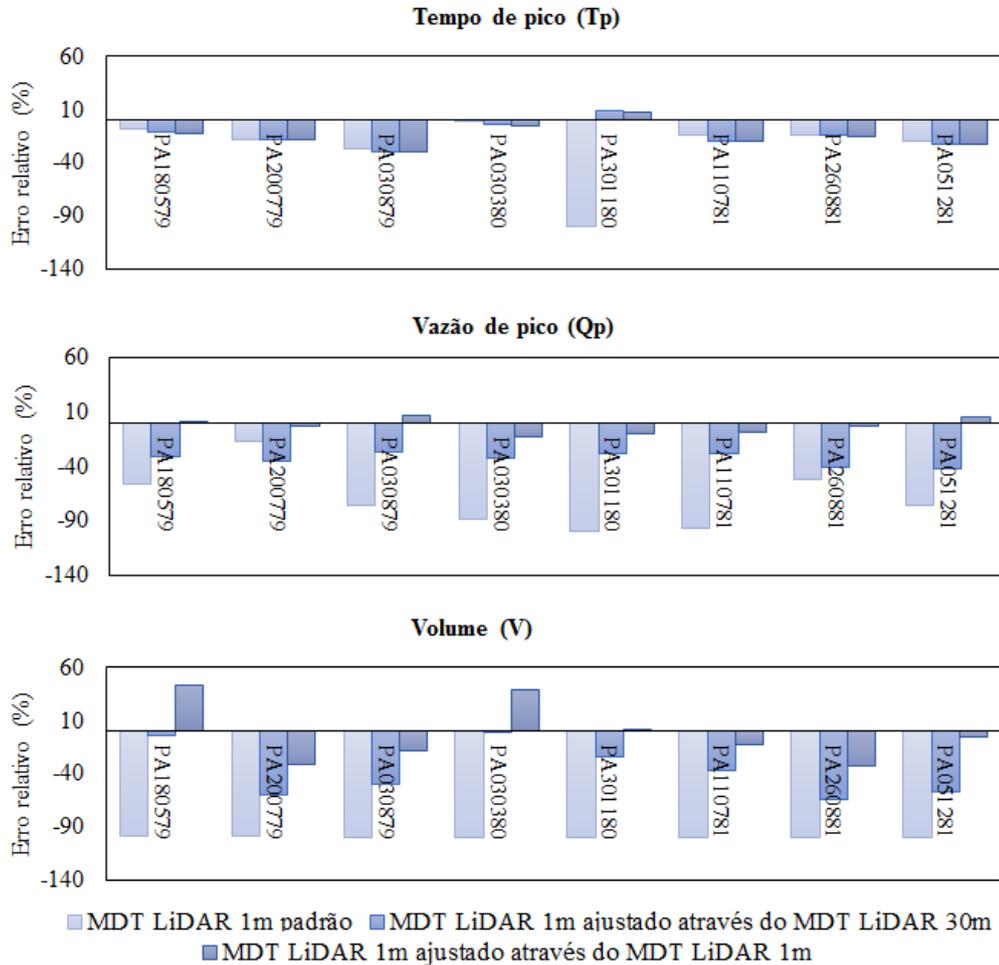
TABELA 38 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DE λ ANTIGO E REAJUSTADO PARA O MDT LIDAR 1m

ID do evento	Data	AMC	λ ajustado com base no MDT LiDAR 30m	λ ajustado com base no MDT LiDAR 1m
PA180579	18/05/1979	II	0.17	0,15
PA200779	20/07/1979	II	0.22	0,19
PA030879	03/08/1979	II	0.14	0,12
PA030380	03/03/1980	III	0.04	0,01
PA301180	30/11/1980	II	0.08	0,07
PA110781	11/07/1981	II	0.11	0,10
PA260881	26/08/1981	II	0.19	0,16
PA051281	05/12/1981	II	0.16	0,13

FONTE: A autora (2018).

Analisando os resultados das diferenças relativas calculadas para os eventos reajustados (FIGURA 75) e comparando-os com as diferenças relativas do λ padrão e do λ ajustado com o auxílio do MDT LiDAR 30m (FIGURA 75), é possível perceber uma melhora significativa nos valores de vazão de pico (Q_p) de todos os eventos e nos valores de volume (V) da maioria dos eventos, além de uma leve diferença no tempo de pico (t_p) da maioria dos eventos.

FIGURA 75 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E OS RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO SCS-CN-HUT DISTRIBUÍDO PARA O MDT LiDAR 1m COM λ PADRÃO, AJUSTADO E REAJUSTADO



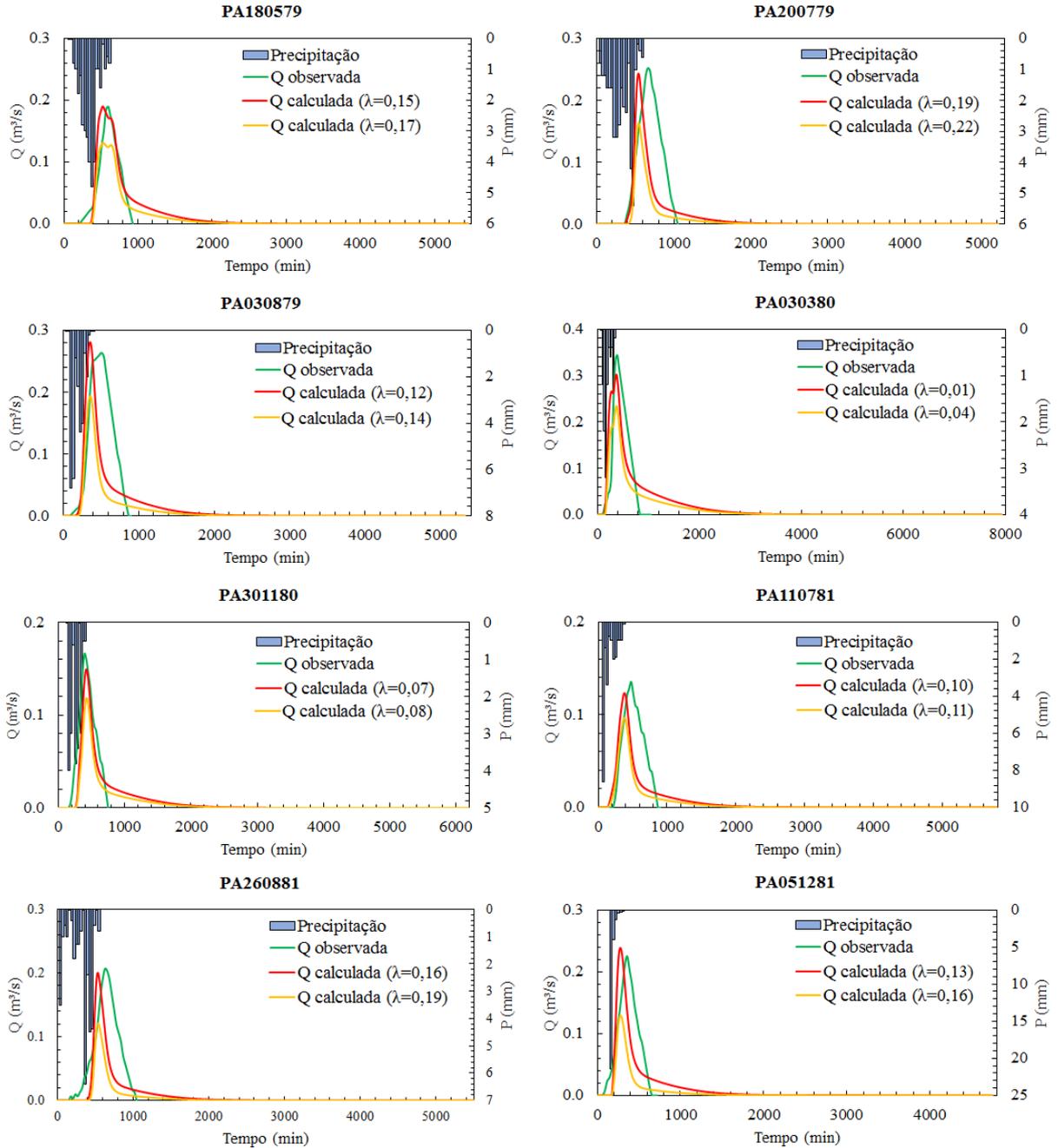
FONTE: A autora (2018).

Enquanto nos resultados dos eventos reajustados a diferença relativa da Q_p está na faixa dos 10% positivo e negativo, nos resultados do ajuste inicial a diferença relativa fica entre -10% e -40%. Já para o V , dois eventos reajustados (PA180579 e PA200779) obtiveram um desempenho pior do que com os λ antigos no cálculo da diferença relativa, com valores de diferença de cerca de 40% que antes eram de apenas cerca de 3%.

Os valores da diferença relativa do tempo de pico (t_p) calculados para os eventos reajustados apresentaram valores ligeiramente maiores do que os valores calculados para os eventos com λ do ajuste inicial, indicando um maior distanciamento do t_p dos eventos com λ reajustado em relação ao t_p observado. Com seus valores de diferença na faixa de -30% a cerca de 8%, apenas o evento PA301180 apresentou um t_p maior do que o t_p observado.

Através da FIGURA 76, que apresenta os hidrogramas resultantes dos eventos com λ reajustado e λ antigo, fica mais clara a influência do λ e da resolução espacial na geração dos hidrogramas, confirmando também os valores apresentados na TABELA 38.

FIGURA 76 – COMPARAÇÃO HIDROGRAMAS RESULTANTES MDT LiDAR 1m COM λ ANTIGO E REAJUSTADO



FONTE: A autora (2018).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. CONCLUSÕES

As análises quantitativas e qualitativas das redes de drenagem e sub-bacias hidrográficas, geradas através de MDE e MDTs de média e alta resolução espacial, foram fundamentais para a avaliação dos dados empregados na pesquisa, permitindo uma análise crítica de seu desempenho ao expor as diferenças de se trabalhar com dados de diferentes fontes de dados.

As redes de drenagem obtidas pelo processamento dos diferentes modelos digitais geraram redes e sub-bacias hidrográficas bem detalhadas e coerentes com as suas respectivas referências, resultando em características hidrográficas com pouca diferença na maioria das métricas testadas.

Nas redes de drenagem geradas, à medida que a resolução espacial aumentou, o comprimento e a sinuosidade das redes também aumentaram, distanciando-se assim da rede de drenagem de referência, mas apresentando delimitações de sub-bacias com pouca diferença (2% em média). A métrica do *buffer* padrão apresentou um comportamento similar, com as maiores porcentagens de rede de drenagem inserida na área do *buffer* das maiores resoluções espaciais, entretanto, isso não significa um melhor desempenho das maiores resoluções, uma vez que elas apresentaram comprimentos de drenagem maiores. Já a métrica da distância média apresentou um comportamento contrário as demais, resultando em maiores concordâncias à medida que a resolução espacial diminuiu. De forma geral, as redes de drenagem geradas pelos MDT LiDAR 30m e MDE SRTM 30m foram as que melhor representaram a rede de drenagem de referência, levantando evidências que de a rede de drenagem de referência possa ter sido originada a partir de um produto orbital de baixa resolução espacial.

Em relação à simulação hidrológica, a abordagem de quantificação do escoamento superficial aqui apresentado aborda o tradicional método SCS-CN-HUT de forma distribuída, preocupando-se em considerar as características físicas da área de estudo a nível de pixel, analisando juntamente alguns parâmetros chave do método tradicional e propondo uma nova visão sobre eles.

Os eventos de chuva utilizados para a simulação, provenientes do Projeto Dilúvio e datados da década de 70 e 80, apresentaram curta a média duração e baixa intensidade na maioria dos casos, com a ocorrência de poucos eventos extremos, com alta precipitação e baixa vazão, por exemplo.

A determinação da condição de umidade antecedente do solo (AMC) de cada evento foi um passo que exigiu grande atenção e pesquisa. Em razão da falta de dados de chuva antecedente para alguns eventos foi necessária a utilização de registros de chuva de duas plataformas distintas, juntamente com a análise de outras características dos eventos observados, como a precipitação total, vazão de pico e os coeficientes de escoamento, intentado definir a condição de umidade do solo mais coerente para as características do evento e os dados parciais de chuva antecedente

A taxa de abstração inicial (λ), responsável por quantificar a parcela de precipitação que não gera escoamento superficial, é um ponto amplamente discutido pela literatura científica do assunto. O valor proposto pelo método tradicional é frequentemente considerado muito elevado e é alvo de testes que visam encontrar um valor mais adequado. Na presente pesquisa observou-se que conforme a resolução espacial aumenta o valor de λ diminui, embora a diferença entre os λ ajustados para o MDT LiDAR 30m e os λ ajustados para o MDT LiDAR 1m não seja tão significativa.

Entretanto, apesar do melhor desempenho da simulação utilizando λ ajustados, a abordagem distribuída apresentou a tendência de gerar menos escoamento e mais rapidamente, subestimando os valores observados de vazão de pico (Q_p) e volume (V), e antecipando o tempo de pico (t_p). Isso pode ser atrelado a limitações dos métodos originais CN e HUT, que representam muito simplificadamente o processo de transformação da chuva em vazão, não considerando explicitamente mecanismos como a infiltração, por exemplo.

Ainda em relação aos hidrogramas resultantes gerados, observou-se que o resultado absoluto foi muito superior ao utilizar-se o ajuste do λ para a resolução espacial mais alta (MDT LiDAR 1m) no lugar do ajuste feito através da resolução espacial mais baixa (MDT LiDAR 30m). Uma possível explicação para o resultado reside no fato de que com resoluções mais altas (MDT LiDAR 1m) há uma melhor representação dos caminhos de fluxo, declividade e sinuosidade da rede de drenagem, além disso, existe também o fato de os métodos originais do SCS-CN-HUT não representarem tão bem o armazenamento e outros processos que promovem a defasagem do escoamento, apresentando a tendência de antecipar o pico de vazão, que é compensado pelas resoluções mais finas ao retardar o escoamento.

De modo geral, as resoluções espaciais intermediárias (10m e 30m) representaram bem os hidrogramas resultantes, demandando menos tempo de processamento e espaço de armazenamento, entretanto, com o ajuste do λ através do MDT LiDAR 1m fica evidente o melhor desempenho da resolução mais alta, apesar de seu maior tempo de processamento e

espaço para armazenamento, impasse esse que pode ser corrigido com a otimização da rotina computacional.

6.2. RECOMENDAÇÕES

Assim como em qualquer modelo hidrológico, é importante ressaltar que existem limitações e pontos a serem corrigidos. A demora no processamento dos dados pode ser atribuída em parte a formulação do sistema computacional utilizado, *Hidropixel*, que foi inicialmente proposto para trabalhar com resoluções espaciais menores e, conseqüentemente, com uma menor quantidade de dados, tendo sido brevemente adaptado as necessidades desta pesquisa. Desse modo, recomenda-se a trabalhos futuros a revisão dos algoritmos utilizados, visando a otimização do cálculo computacional e o uso racional da memória em disco, tornando o sistema mais apto a lidar com grandes quantidades de dados.

Sugere-se reajustar o λ para todas as resoluções espaciais, deixando mais nítida a sua influência, além de testar o ajuste de outros parâmetros do método tradicional, como o CN, com a intenção de ajustar o volume dos hidrogramas resultantes, variável que mais apresentou diferenças em relação aos dados observados.

A utilização de dados de chuva-vazão mais recentes e melhor monitorados, que contenham dados de precipitação antecedente para garantir a escolha do AMC correto, assim como a aplicação do modelo distribuído para mais eventos observados de chuva-vazão e em outras bacias hidrográficas, variando inclusive a região do Brasil onde a bacia está localizada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDIN, S. J. H.; STEPHEN, H. Relating DEM spatial resolution and hyetograph temporal resolution to flood modeling accuracy. **WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS**, 2015.

AJMAL, M.; KIM, T.W. Quantifying Excess Stormwater Using SCS-CN-Based Rainfall Runoff Models and Different Curve Number Determination Methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 141, n. 3, p. 1-12, 2015.

ALVES, C. A. Estimativa da área impermeável dentro da bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio (Porto Alegre/RS) através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. 137 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

BALTAS, E. A.; DERVOS, N. A.; MIMIKOU, M. A. Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. **Hydrology and Earth System Science**, v. 11, p. 1825-1829, 2007.

BARBER, C. P.; SHORTRIDGE, A. LiDAR Elevation Data for Surface Hydrologic Modeling: **Resolution and Representation Issues**. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 32, n. 4, p. 401-410, 2005.

BECK, H. E.; JEU, R. A. M.; SCHELLEKENS, J.; VAN DIJK, A. I. J.; BRUIJNZEEL, L. A. Improving Curve Number Based Storm Runoff Estimates Using Soil Moisture Proxies. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1939-1404, 2009.

BEZAK, N.; HORVAT, A.; SRAJ, M. Analysis of flood events on Slovenian streams. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 63, n. 2, p. 134-144, 2015.

BUARQUE, D. C.; FAN, F. M.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 2, p. 91-103, 2009.

BURIN, C. W. Canalização do Arroio Dilúvio em Porto Alegre: Ambiente Projetado x Ambiente Construído. 155 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

BOSE, A. S. C.; SRIDHAR, P.; GIRIDHAR, M. V. S. S.; VISWANADH, G. K. Watershed delineation and stream network analysis using GIS. **International Journal of Watershed Engineering**. v. 1, n. 1, 2012.

BRANDALIZE, A. A. Perfilamento a Laser: comparação com métodos fotogramétricos. Curitiba. Paraná. 2002. Disponível em: <http://www.lidar.com.br/arquivos/brandalizeperf.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2018.

CANO, I. C. M. Impacto del algoritmo D_{∞} em la extracción automática de redes de drenaje a partir de modelos digitales de elevaciones. **Revista C & G**, v. 19, n. 1-2, p. 23-33, 2005.

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, 302p.

- CARVALHO, T. M., de. Parâmetros geomorfométricos para descrição do relevo da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Tupé, Manaus, Amazonas. In: SANTOS-SILVA, E. N. (Org.); SCUDELLER, V. V. (Org.). **BioTupé: Meio Físico, Diversidade Biológica e Sociocultural do Baixo Rio Negro, Amazônia Central**. Manaus: UEA Edições, v. 2, p. 3-17, 2009, 206 p.
- CHAPLOT, V.; DARBOUX, F.; BOURENNANE, H.; LEGUÉDOIS, S.; SILVEIRA, N.; PHACHOMPON, K. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. **Geomorphology**, v. 77, n. 1–2, p. 126-141, 2006.
- CHEN, Y.; WILSON, J. P.; ZHU, Q.; ZHOU, Q. Comparison of drainage-constrained methods for DEM generalization. **Computers & Geosciences**, v. 48, p. 41-49, 2012.
- CHOW, T. V.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Hidrología Aplicada**. Santafé de Bogota: McGraw-Hill Interamericana, 1994, 584 p.
- COLLINS, S. H.; MOON, G. C. Algorithms for Dense Digital Terrain Models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 47, n. 1, p. 71-76, 1981.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia: para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2013, 336p.
- COSTA, F. F. Abordagem distribuída para simulação chuva-vazão em pequenas bacias hidrográficas. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.
- DAVIES, H. N.; BELL, V. A. Assessment of methods for extracting low-resolution river networks from high-resolution digital data. **Hydrological Sciences Journal**, v. 54, n. 1, p. 17-27, 2007.
- DIAS, L. S. O.; ROCHA, G. A.; BARROS, E. U. A.; MAIA, P. P. H. Utilização do radar interferométrico para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Bahia Análise & Dados**. v. 14, n. 2, p. 265-271, 2004.
- DECÓ, E. Arroio Dilúvio. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 9 e 10, p. 111-115, 1959.
- DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS – DPI. Variáveis ambientais para modelagem de distribuição de espécies (AMBDATA). Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php>. Acessado em: 15/10/2016.
- DURAN-BARROSO, P.; GONZÁLEZ, J.; VALDÉS, J. B.; Improvement of the integration of Soil Moisture Accounting into the NRCS-CN model. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 809-819, 2016.
- ELGA, S.; JAN, B.; OKKE, B. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. **Journal of Hydrology**, v.529, p. 62-81, 2015.
- ESRI. Disponível em: <<http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>>. Acesso em: 09 ago 2017.

FAN, F.; COLLISCHONN, W.; SORRIBAS, M.; PONTES, P. Sobre o Início da Rede de Drenagem Definida a Partir dos Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 241–257, 2013

FANG, X.; THOMPSON, D. B.; CLEVELAND, T. G.; PRADHAN, P. Variations of Time of Concentration Estimates Using NRCS Velocity Method. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 314-322, 2007.

FARR, T. G.; KOBRICK, M. The Shuttle Radar Topography Mission. RTO SET SYMPOSIUM ON “SPACE-BASED OBSERVATION TECHNOLOGY”, Greece, **Anais...**, 2000.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAD, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. 3-33, 2007.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem Numérica de Terreno. In: CÂMARA, G. (Org.); DAVIS, C. (Org.); MONTEIRO, A. M. V. (Org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, p. 7-1 – 7-38, 2001.

FERNANDEZ, D. C. J. Avaliação de algoritmos e modelos digitais de elevação para extração automática de drenagem. 92 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, 2011.

FERREIRA, G. S.; MENEZES, D. B. **Relatório de análise socioeconômica da cidade de Porto Alegre**. FEE, 38p., Porto Alegre, 2017.

FUJIMOTO, N. S. V. M. Análise ambiental urbana da área metropolitana de Porto Alegre – RS: Sub-bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio. 240 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

GARCIA, M. J. L.; CAMARASA, A. M. Use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 1, n. 3-4, p. 187-195, 1999.

GERMANO, A. O. Estimativa de parâmetros hidrológicos em algumas bacias urbanas brasileira. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

GERSTENECKER, G.; LÄUFER, G.; STEINECK, D.; TIEDE, C.; WROBEL, B. Validation of Digital Elevation Models around Merapi Volcano, Java, Indonesia. **Natural Hazards and Earth System Sciences**. v.5, n. 6, p. 863-876, 2005.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010.

GLOBAL LAND COVER FALICITY. Disponível em: < <http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/ftp?id=14522>>.

- GREENE, R. G., CRUISE, J. F. Urban watershed modeling using geographic information system. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 121, n. 4, p. 318–325, 1995.
- GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; NARDI, F. A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall–runoff modelling in small ungauged basins. **Hydrological Sciences Journal**, v. 57, n. 7 p. 73 - 83, 2012.
- GUTIÉRREZ, C. P.; NIETO, A. I. M. **Teledetección: Nociones y Aplicaciones**. Universidad de Salamanca, 2006, 359p
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Banco de Dados: IBGE Países, 2016. Disponível em: <<https://paises.ibge.gov.br/#/pt/pais/brasil/info/populacao>>. Acesso em: 02 abr. 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2018. Banco de Dados: IBGE Cidades. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em 05 fev. 2018.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 05 fev. 2018.
- HASENACK, H.; WEBER, E.; MARCUZZO, S. (org.). **Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: Geologia, Solos, Drenagem, Vegetação e Ocupação**. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2008. 84 p. ISBN 978-85-7727-129-0.
- HIDROWEB. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=1080&TipoReg=7&MostraCon=false&CriaArq=false&TipoArq=1&SerieHist=true>> Acesso em: 05 fev. 2018.
- HÖFLE, B.; RUTZINGER, M. Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 55, n. 2, p. 1-29, 2011.
- JENA, S. K.; TIWARI, K. N.; PANDEY, A.; MISHRA, S. K. RS and Geographical Information System-Based Evaluation of Distributed and Composite Curve Number Techniques. **Journal of Hydrologic Engineering**. v. 17, n. 11, p. 1278-1286, 2012.
- JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.
- JUVÊNCIO, Irmão. A Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 6 e 7, p. 87-95, 1958.
- KIDD, C.; CHAPMAN, L. Urban climate station site selection through combined digital surface model and sun angle calculations. **Meteorological Applications**. v.20, n. 3, p. 379-384, 2013.
- KING, K. W.; BALOGH, J. C. Curve Numbers for Golf Course Watershed. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 5, n. 3, p. 987-996, 2008.

- LAL, M.; MISHRA, S. K.; PANDEY, A.; PANDEY, R. P.; MEENA, P. K.; CHAUDHARY, A.; JHA, R. K.; SHREEVASTAVA, A. K.; KUMAR, Y. Evaluation of the Soil Conservation Service curve number methodology using data from agricultural plots. **Hydrogeology Journal**, v. 25, p. 151-167, 2017.
- LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology**. CRC Press, 2005, 318p.
- LI, J.; WONG, D. W. S. Effects of DEM sources on hydrologic applications. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 34, n. 3, p. 251–261, 2010.
- LI, R.; TANG, Z.; LI, X.; WINTER, J. Drainage Structure Datasets and Effects on LiDAR-Derived Surface Flow Modeling. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v.2, p. 1136-1152, 2013.
- LIU, X.; PETERSON, J.; ZHANG, Z. High-Resolution DEM Generated from LiDAR Data for Water Resource Management. In: Zerger, A., Argent, R.M. (Eds.), INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION 'MODSIM05'. AUSTRALIA, MELBOURNE, p. 1402–1408, 2005.
- LOHMANN, P.; KOCH, A.; SCHAEFFER, M. Approaches to the Filtering of Laser Scanner Data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, p. 540-547, 2000.
- LUEDELING, E.; SIEBERT, S.; BUERKERT, A. Filling the voids in the SRTM elevation model – A TIN-based delta surface approach. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 62, n. 4, p. 283–294, 2007.
- MADERAL, E.N.; VALCARCEL, N.; DELGADO, J.; SEVILLA, C.; OJEDA, J. C. Automatic River Network Extraction From LiDAR Data. THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, XXIII ISPRS CONGRESS, v. XLI-B8, p. 365-372, 2016.
- McCUEN, R. H. Approach to Confidence Interval Estimation for Curve Numbers. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 7, n. 7, p. 43-48, 2002.
- McCUEN, R. H. Uncertainty Analyses of Watershed Time Parameters. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 5, p. 490-498, 2009.
- McCUEN, R. H. **Hydrologic analysis and design**. 2. ed. New Jersey: Pearson Education, 814 p., 1998.
- MOG, W.; CAMPOS, H. A.; PICCININI, L. S. Análise morfológica de espaços urbanos em bacias hidrográficas: um olhar sobre o entorno do Arroio Dilúvio em Porto Alegre. **Caderno Metropolitano**, São Paulo, v. 16, n.31, p. 221-239, 2014.
- MUKUL, M.; SRIVASTAVA, V.; MUKUL, M. Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. **Journal of Earth System Science**, v. 124, n. 6, p. 1343-1357, 2015.
- MURPHY, P. N. C.; OGILVIE, J.; MENG, F. R.; ARP, P. Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 12, p. 1747-1754, 2008

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA – Photojournal Disponível em <<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA18813>>. Acesso em: 09 ago 2017.

NATIONAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE – NRCS –. Disponível em: <<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/hydrology/?cid=stelprdb1043063>>. Acesso em: 27 jun 2017.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 28, p. 323–344, 1984.

OLIVEIRA, P. T. S. DE; SOBRINHO, T. A.; STEFFEN, J. L.; RODRIGUES, D. B. B. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, p. 819–825, 2010.

PAUDEL, M.; NELSON, E. J.; SCHARFFENBERG, W. Comparison of Lumped and Quase-Distributed Clark Runoff Models Using the SCS Number Equation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 10, p. 1098-1106, 2006.

PAULINO, P. F. Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, n. 2, p. 84-95, 2008.

PLANO DIRETOR DE DRENAGEM URBANA DE PORTO ALEGRE (3ª ETAPA) E ATUALIZAÇÃO E COMPLEMENTAÇÃO CADASTRAL, NO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE. DEP – Departamento de Esgotos Pluviais de Porto Alegre, 2014.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff Curve Number: Has it Reached Maturity? **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 1, n. 1, p. 11-19, 1996.

PORTO, R. L. Escoamento Superficial. In: TUCCI, C. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (Org.) **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, p. 107-165, 1995.

PRIESTNALL, G.; JAAFAR, J.; DUNCAN, A. Extracting urban features from LiDAR digital surface models, **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 24, p. 65-78, 2000.

PREFEITURA DE PORTO ALEGRE, 2013 Sistema Cartográfico do Município de Porto Alegre. Disponível em: <<http://datapoa.com.br/storage/f/2015-10-26T14%3A16%3A12.418Z/cartilha-mudanca-de-sistema-cartografico-v1-2.pdf>> Acesso em: 01 abr. 2018.

PREFEITURA DE PORTO ALEGRE, 2018a. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/smam/default.php?p_secao=157>. Acesso em: 05 fev. 2018.

- PREFEITURA DE PORTO ALEGRE, 2018b. História dos bairros de Porto Alegre. Disponível em: <
http://proweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/observatorio/usu_doc/historia_dos_bairros_de_porto_alegre.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2018.
- PROGRAMA DE REVITALIZAÇÃO DO ARROIO DILÚVIO: UM FUTURO POSSÍVEL. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 241-262, 2003.
- RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469– 3481, 2008.
- DA ROSA, A. S. Lomba do Pinheiro – Porto Alegre/RS: um bairro em transformação. Um olhar espacial ao período de 1960 a 2013. 176 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005.
- SCHNEIDER, L. E.; McCUEN, R. H. Statistical Guidelines for Curve Number Generation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 4, p. 282-290, 2005.
- SCHUMANN, G.; MATGEN, P.; CUTLER, M.E.J.; BLACK, A.; HOFFMANN, L.; PFISTER, L. Comparison of remotely sensed water stages from LiDAR, topographic contours and SRTM. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 63, p. 283-296, 2008.
- SILVEIRA, A. L. L. Contribution a L’Etude Hydrologique D’um Bassin Semi-Urbanise Dans Le Bresil Subtropical. 242 f. Tese (Doutorado em Géosciences) – Sciences de l’Eau dans l’Environnement Continental, Université Montpellier II, 1996.
- SILVEIRA, A. L. L.; DESBORDES, M. Modelo hidrológico deistribuído urbano com poucos parâmetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n. 1, p. 35 - 48, 1999.
- SILVEIRA, A. L. L. Impactos Hidrológicos da Urbanização em Porto Alegre. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. **Avaliação e Controle da Drenagem Urbana**, Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, p. 153-163, 2000.
- SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005.
- SILVEIRA, A. B. S., da. Análise da Bacia Hidrográfica do Rio Punaú - Rio Grande do Norte utilizando ferramentas de geoprocessamento. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SCHWANGHART, W.; GROOM, G.; HUH, N. J.; HECKRATH, G. Flow network derivation from a high resolution DEM in a low relief, agrarian landscape. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.38, n. 13, p. 1576-1586, 2013.

SHU, Z. H.; CHEN, L. D.; FANG, N. F.; QIN, D. F.; CAI, C. F. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. **Catena**, v. 77, p. 1-7, 2009.

SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 46-57, 2010.

SOULIS, K. X.; VALIANTZAS, J. D.; DERKAS, N. LONDRA, P.A. Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial área experimental watershed. **Hydrology and Earth System Science**, v. 13, n.5, p. 605-615, 2009.

SOULIS, K.; VALIANTZAS, J. D. Identification of the SCS-CN Parameter Spatial Distribution Using Rainfall-Runoff Data in Heterogeneous Watersheds. **Water Resource Management**, v. 27, p. 1737-1749, 2013.

SOUSA, T. M. I. **Avaliação da qualidade em redes de drenagem processadas a partir de modelos digitais de elevação**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

SOUSA, T. M. I.; PAZ, A. R. How to evaluate the quality of coarse-resolution DEM-derived drainage networks. **Hydrological Processes**, v.31, n. 19, p. 3379-3395, 2017.

TARBOTON, D. G.; AMES, D. P. Advances in the mapping of flow from digital elevation data, WORLD WATER AND ENVIRONMENTAL RESOURCES CONGRESS, Orlando, Florida, 2001.

TAROLLI, P.; ARROWSMITH, J. R.; VIVONI, E. R. Understanding earth surface processes from remotely sensed digital terrain models. **Geomorphology**, v. 113, n. 1-2, p. 1-3, 2009.

TASSI, R.; ALLASIA, D. G.; MELLER, A.; MIRANDA, T. C.; HOLZ, J.; SILVEIRA, A. L. L. Determinação do Parâmetro CN para Sub-Bacias Urbanas do Arroio Dilúvio – Porto Alegre/RS. **I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste**. Curitiba – PR. **Anais...** p. 1-13, 2006.

TATSCH, J. D.; PAZ, A.; COLLISCHONN, W.; ROCHA, H. R. Comparação entre dois procedimentos de *upscaling* de redes de drenagem. In: **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, INPE. **Anais...** p. 4897-4904, 2009.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 5-27, 2002.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS, 678 p., 2003.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas - Saneamento para todos**. Brasília, Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, 197 p., 2005.

TUCCI, C. E. M. (Ed.); NASCIMENTO, N. O. (Ed.); LA LAINA PORTO R. (Ed.); VIEIRA, V. P. P. B. (Ed.); MASCARENHAS, F. C. B. (Org.); CANALI, G. V. (Org.); CABRAL, J. J. S. P. C. (Org.); BAPTISTA, M. B. (Org.); MONTENEGRO, S. M. G. L. (Org.). **Hidráulica Aplicada**. 2. ed., ABRH, 2011.

TURCOTTE, R.; ROUSSEAU, F. A. N.; MASSICOTTE, S.; VILLENEUVE, J-P. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. **Journal of Hydrology**, v. 240, n. 3-4, p. 225-242, 2001.

USDA - United States Department of Agriculture. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. TR-55, 2. ed., 1986.

USGS – United States Geological Survey. Disponível em: < <https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 09 ago 2017.

VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D.; MENDES, J. N.; LIMA, D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission 90 m data. **Computers and Geosciences**, v. 32, n. 8, p. 1169-1181, 2006.

VAN ZYL, J. J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): A Breakthrough in Remote Sensing of Topography. **Acta Astronautica**, v. 48, n. 5, p. 559-565, 2001.

VOGT, J. V.; COLOMBO, R.; BERTOLO, F. Deriving drainage network and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. **Geomorphology**, v. 53, p. 281-298, 2003.

WOODWARD, D. E.; HAWKINS, R. H.; JIANG, R.; HJELMFELT, A. T. Jr.; VAN MULLEM, J. A.; QUAN, D. Q. Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. WORLD WATER & ENVIRONMENTAL RESOURCES CONGRESS, 2003

WOODROW, K.; LINDSAY, J. B.; BERG, A. A. Evaluating DEM conditioning techniques, elevation source data, and grid resolution for field-scale hydrological parameter extraction. **Journal of Hydrology**, v. 540, p. 1022–1029, 2016.

YANG, P.; AMES, D. P.; FONSECA, A.; ANDERSON, D. SHRESTHA, R. GLENN, N. F.; CAO, Y. What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results? **Environmental Modelling & Software**, v. 58, p. 48–57, 2014.

YUAN, Y.; NIE, W.; McCUTCHEON, S. C.; TAGUAS, E. V. Initial abstraction and curve for semiarid watersheds in Southeastern Arizona. **Hydrological Processes**. v. 28, n. 3, p. 774-783, 2012.

ZANARDI, R. P.; SCHNEIDER, A. H.; SALOMONI, C. S.; MALLMANN, D. S.; SALOMONI, T. R.; REISS, M. L. L.; ROCHA, R. S.; IESCHECK, A. L.; TAVARES, M. M.; PEIXOTO, E. B. A.; TÁVORA, F. C.; MARTINSKI, P.; SKROCH, J. Análise da Qualidade dos Modelos Digitais de Terreno e de Superfície do Município de Porto Alegre. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2014, Gramado, RS, Brasil. **Anais XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia**. Rio de Janeiro, RJ: SBC, 2014.

ZANDBERGEN, P. Applications of Shuttle Radar Topography Mission Elevation Data. **Geography Compass**, v. 2, n. 5, p. 1404-1431, 2008.

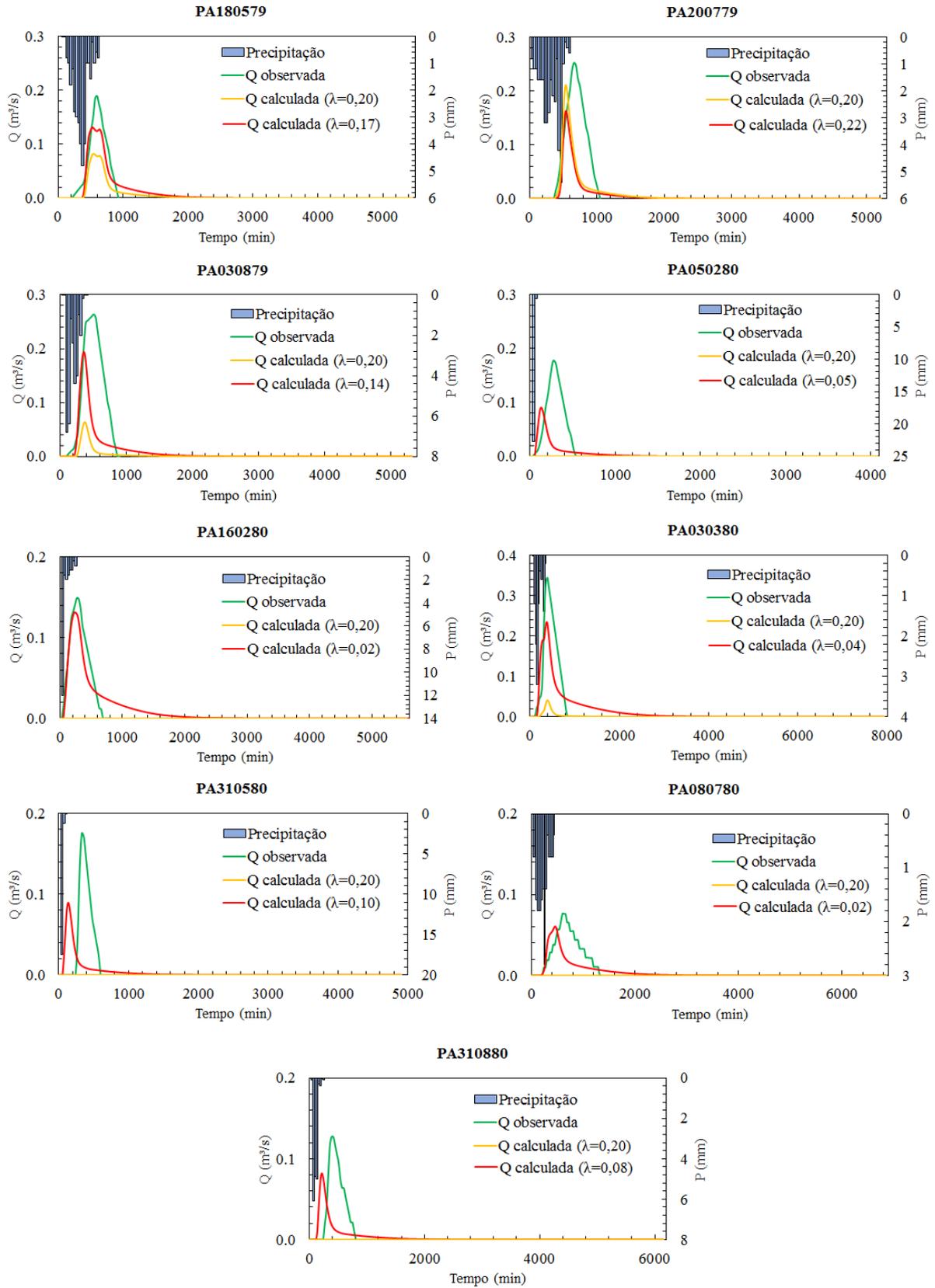
ZHI, X.; ZHONG, L. A Progressive Quality Control to Improve the Accuracy of LiDAR Data Processing. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science**, v. 37, p. 421-425, 2008.

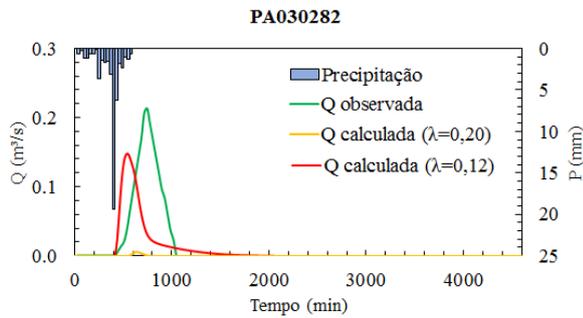
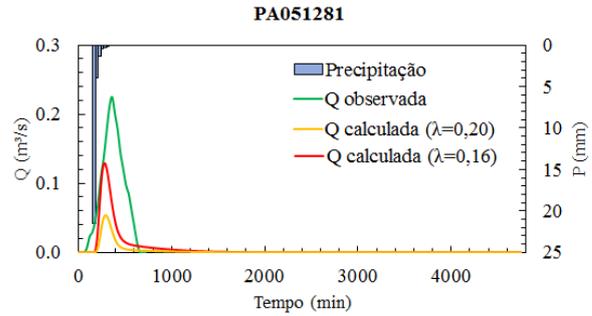
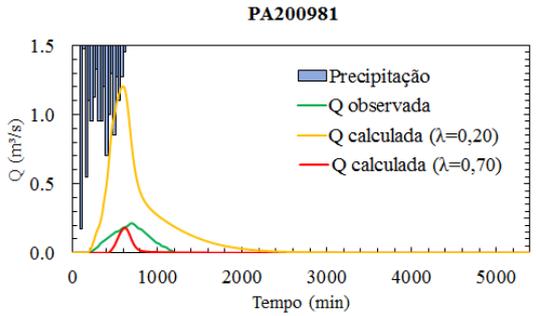
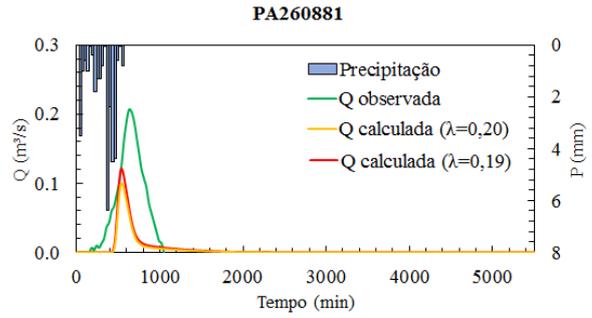
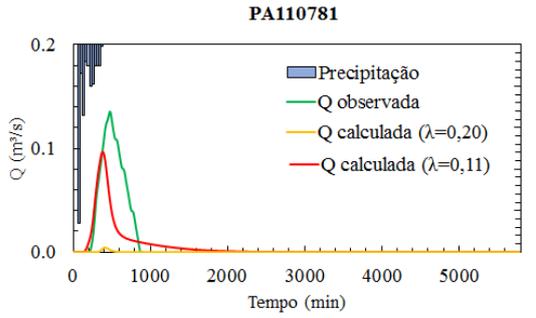
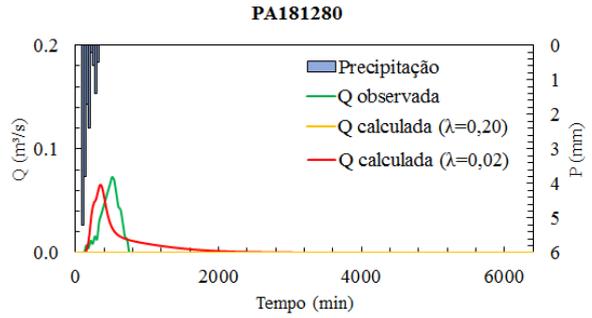
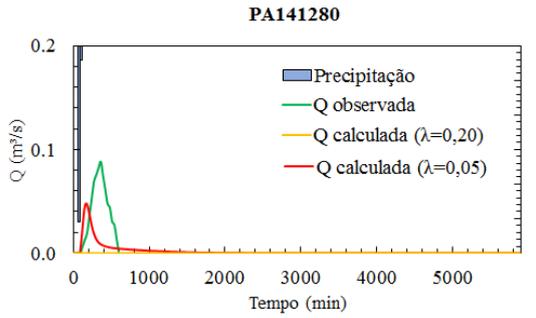
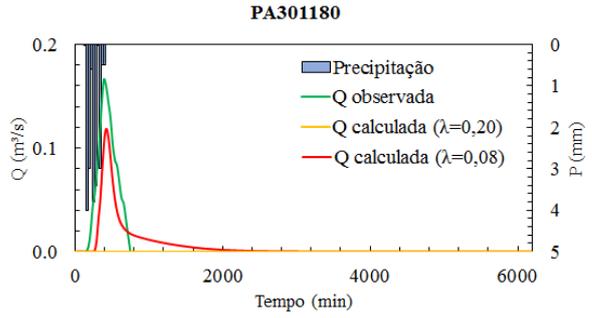
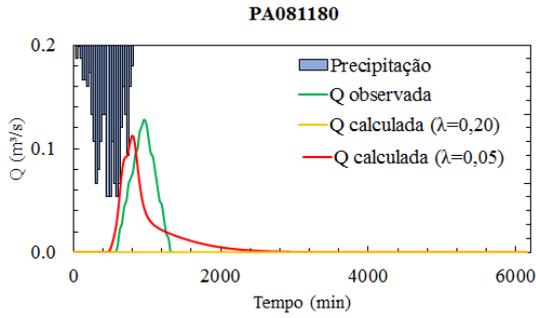
ZHOU, Q.; CHEN, Y. Generalization of DEM for terrain analysis using a compound method. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, p. 38-45, 2011.

ZUAZO, V.; GIRONÁS, J.; NIEMANN, J. D.; Assessing the impact of travel time formulations on the performance of spatially distributed travel time methods applied to hillslopes. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1315-1327, 2014.

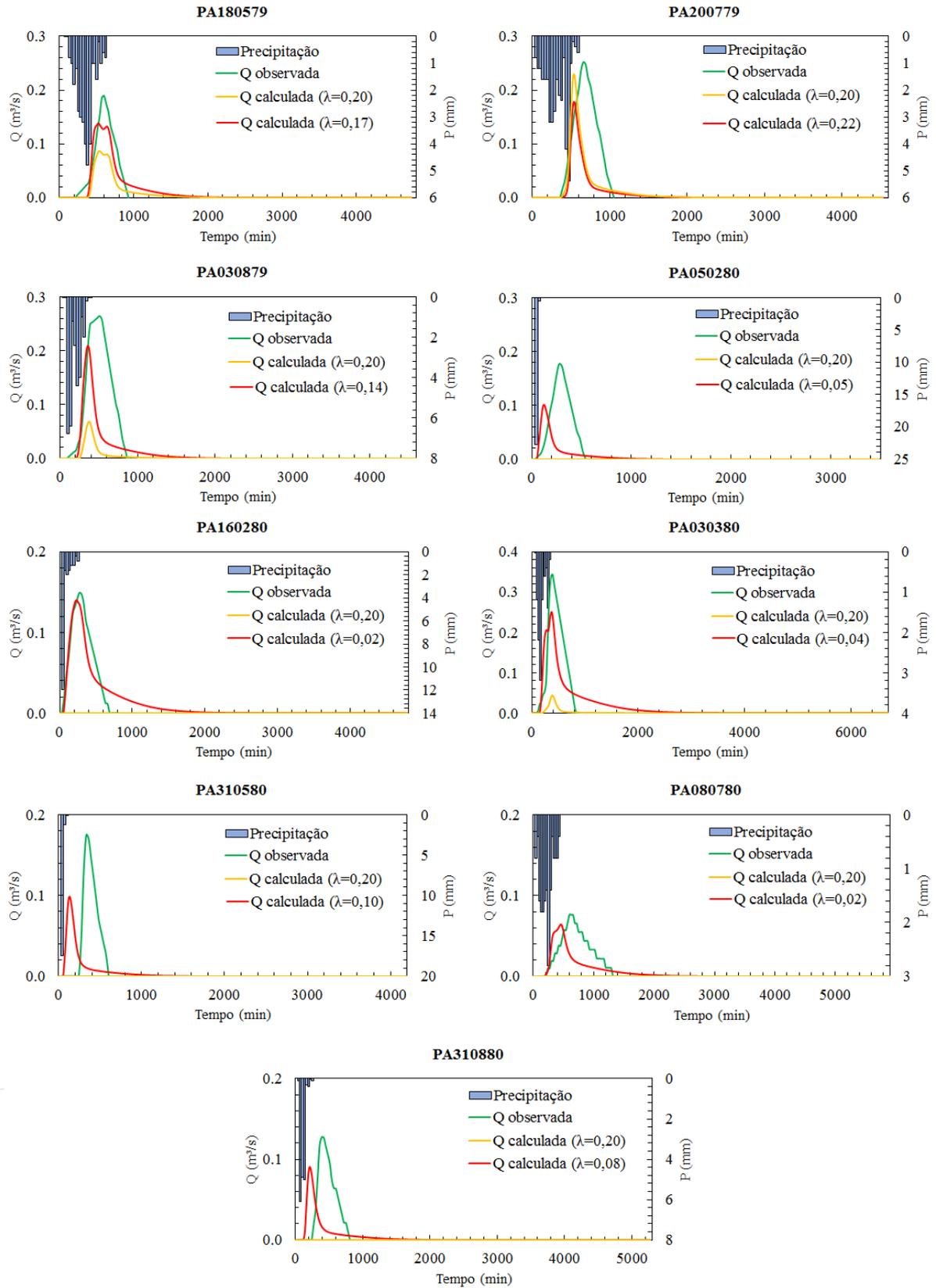
APÊNDICE A
Vazões observadas *versus* vazões calculadas

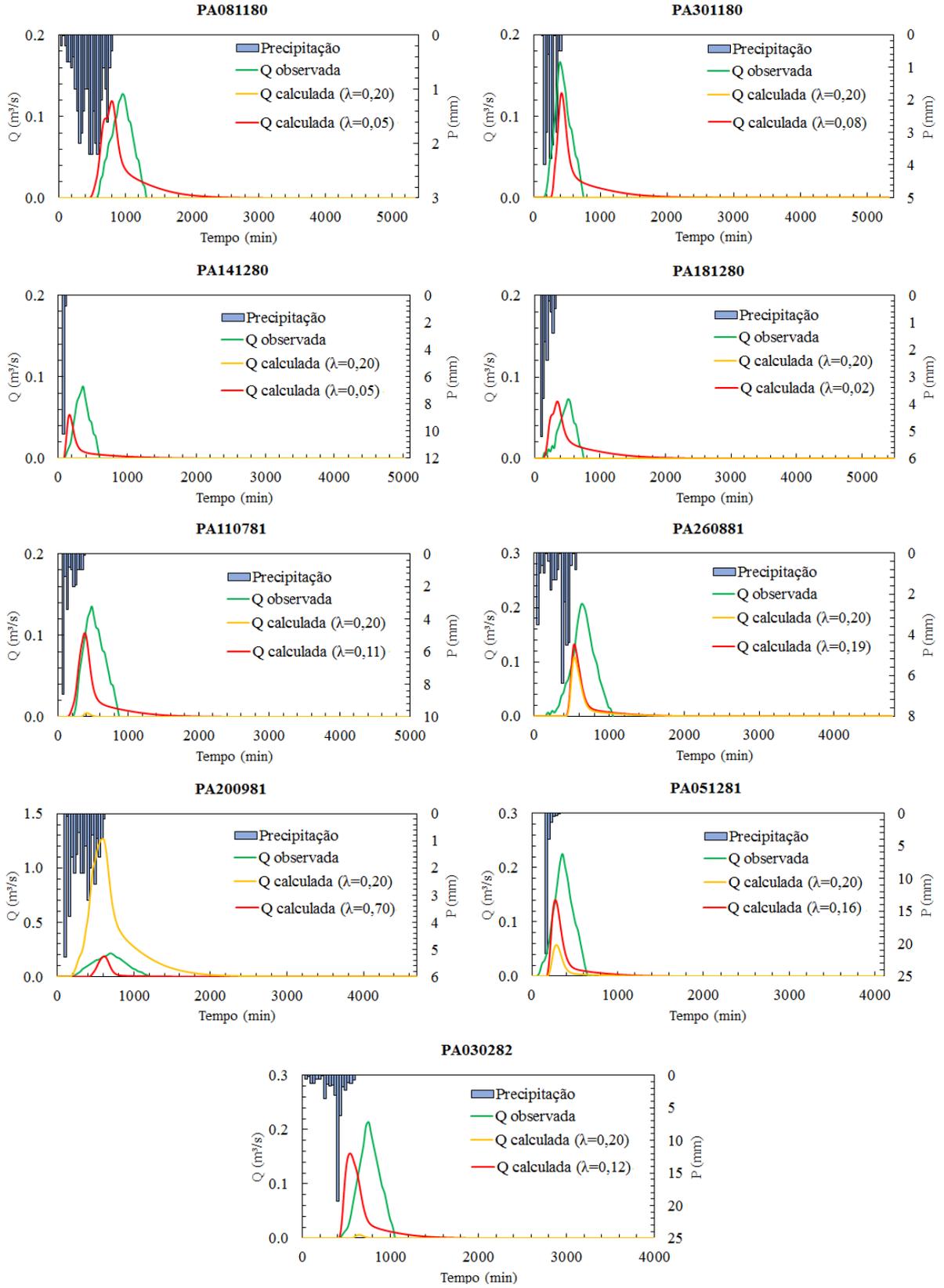
MDT LiDAR 1m



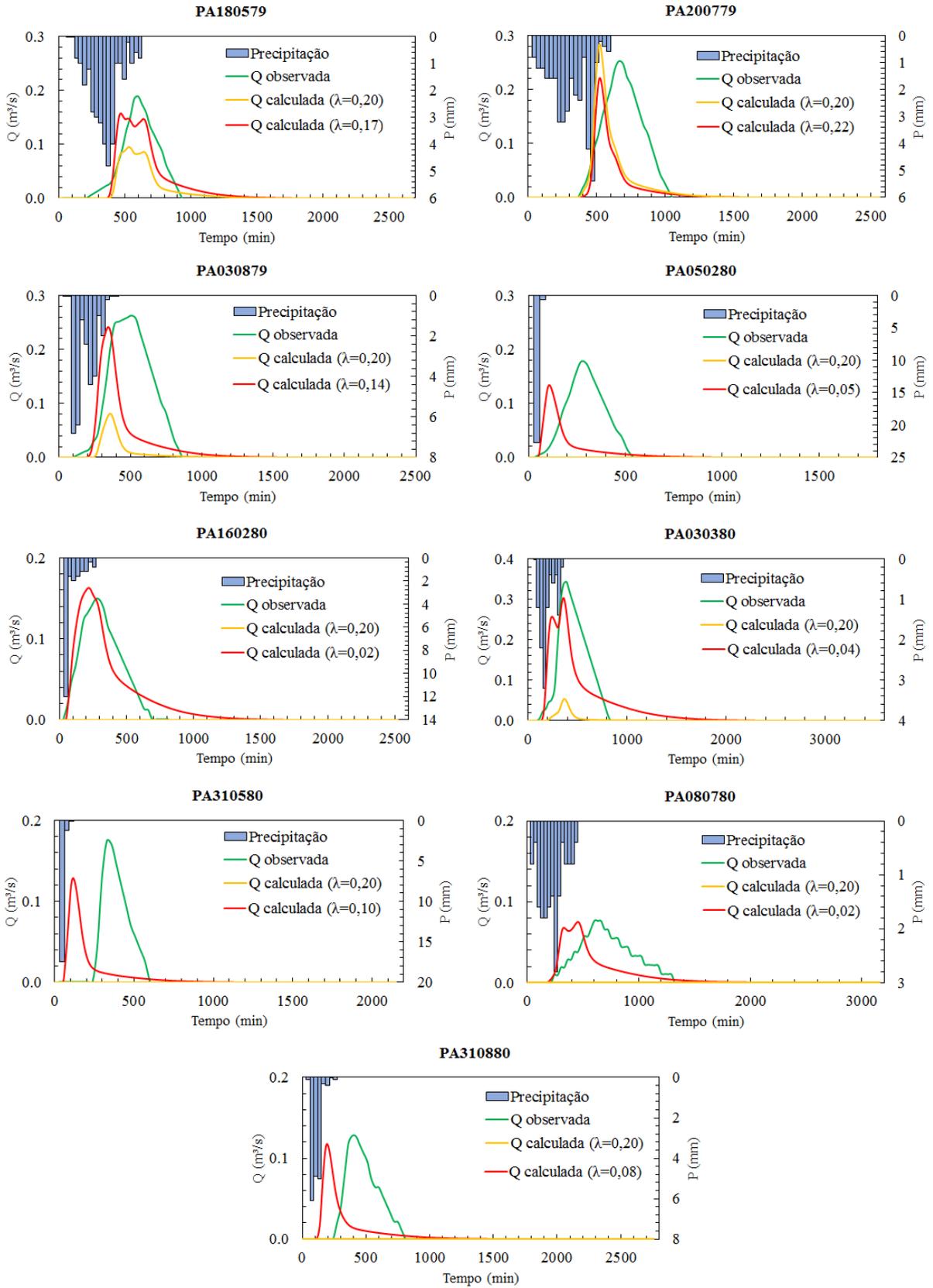


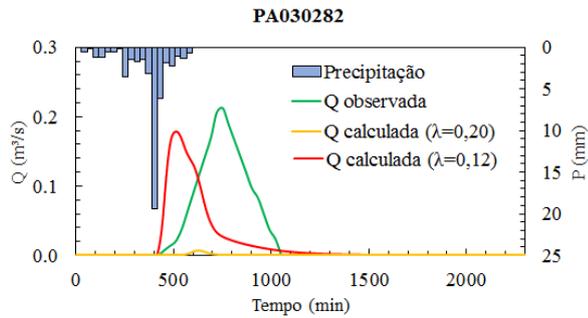
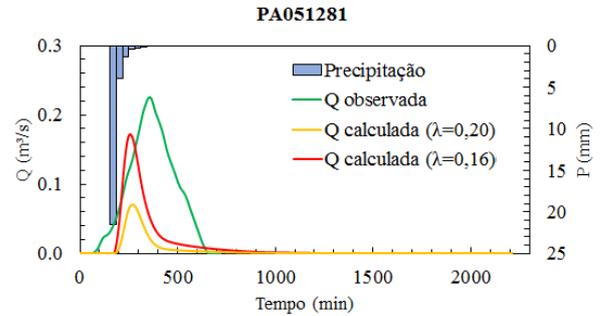
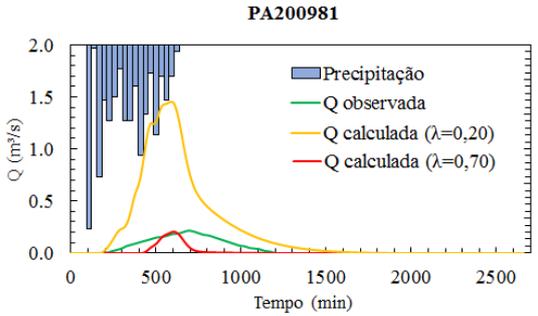
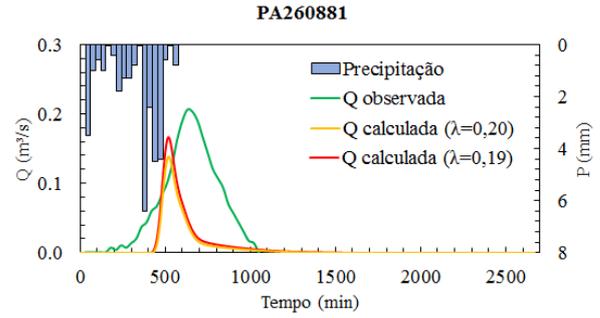
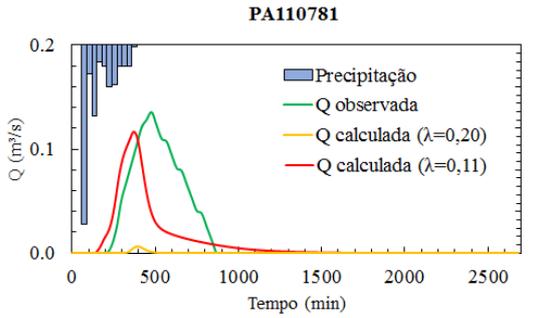
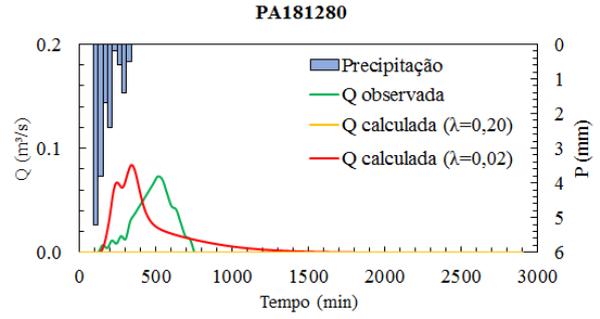
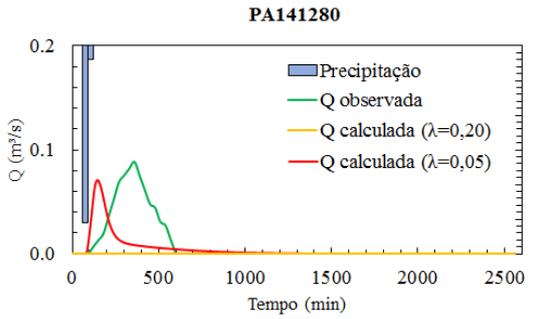
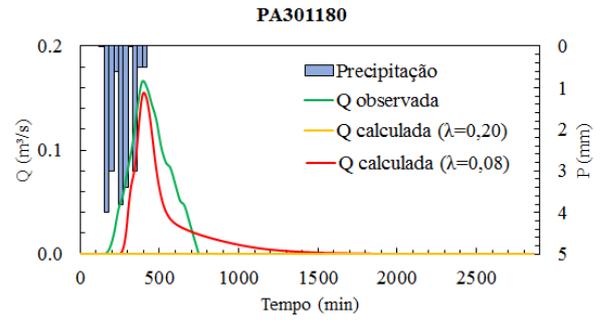
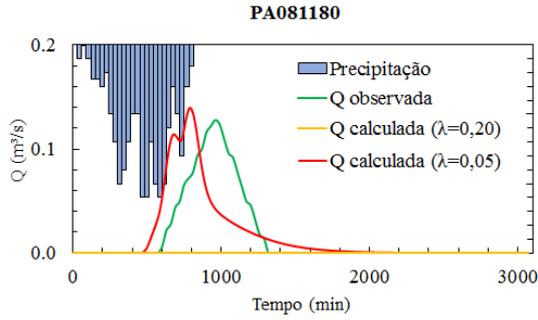
• MDT LiDAR 2m





• MDT LiDAR 10m





● MDE SRTM 30m

