



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE
MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA
SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MAURICIO ANTONIO SANTINI JUNIOR

MODELAGEM HIDRÁULICA/HIDROLÓGICA DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL COM A UTILIZAÇÃO DO SWMM INTEGRADO AO SIG: O
EXEMPLO DE ILHA SOLTEIRA-SP

Ilha Solteira

2018

MAURICIO ANTONIO SANTINI JUNIOR

MODELAGEM HIDRÁULICA/HIDROLÓGICA DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL COM A UTILIZAÇÃO DO SWMM INTEGRADO AO SIG: O
EXEMPLO DE ILHA SOLTEIRA-SP

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Especialidade: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Nascimento de Oliveira

Ilha Solteira

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S235m Santini Junior, Mauricio Antonio.
Modelagem hidráulica/hidrológica do escoamento superficial com a utilização do SWMM integrado ao SIG: o exemplo de Ilha Solteira-SP / Mauricio Antonio Santini Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
171 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2018

Orientador: Jefferson Nascimento de Oliveira
Inclui bibliografia

1. SWMM. 2. Hidrologia urbana. 3. SIG.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CIUB - 9999


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

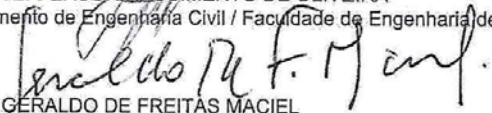
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELAGEM HIDROLÓGICA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL URBANO
COM A UTILIZAÇÃO DO SWMM INTEGRADO AO SIG: O EXEMPLO DE
ILHA SOLTEIRA-SP

AUTOR: MAURICIO ANTONIO SANTINI JÚNIOR

ORIENTADOR: JEFFERSON NASCIMENTO DE OLIVEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL,
área: RECURSOS HIDRICOS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JEFFERSON NASCIMENTO DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. GERALDO DE FREITAS MACIEL
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MARCIO BENEDITO BAPTISTA
Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos / Universidade Federal de Minas Gerais

Ilha Solteira, 06 de abril de 2018

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Mauricio Antonio Santini e Maisa Aparecida Gambin Santini, por todo suporte, educação e exemplo que me forneceram incondicionalmente e, também, pela construção dos alicerces de meus preceitos.

À minha namorada, Marina Carminatti, pelo apoio, incentivo e amor em toda minha caminhada, por me ajudar a crescer como indivíduo durante todos esses anos e por suportar as dificuldades da distância comigo.

Ao Professor Jefferson Nascimento, por me ensinar valiosas lições de vida e engenharia, por toda sua paternidade comigo e por todo seu apoio para as minhas decisões.

Ao meu irmão Arthur Santini, por mostrar a importância do trabalho e dedicação e à minha irmã, Marcele Santini, por me ensinar lições de persistência e bondade.

Ao grande companheiro de todas as horas Lucas Felizardo, por sempre mostrar-se disponível e disposto às demandas deste e outros trabalhos e pelas conversas durante todo esse tempo.

Aos professores Geraldo Maciel e Milton Dall'Áglio, que me ensinaram a beleza da engenharia e que a mesma é muito mais que arredondar o valor de pi para quatro.

Aos Companheiros de LH², onde tive a oportunidade de trabalhar todo esse tempo.

Aos meus amigos da faculdade, pelo apoio, palavras e risadas.

Aos meus alunos, que me ensinaram que ensinar é bom, porém, aprender com todos e principalmente humildade é muito mais importante.

“Do mesmo modo que o metal enferruja com a ociosidade e a água parada perde sua pureza, assim a inércia esgota a energia da mente.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

Desde o começo da formação dos conglomerados urbanos no Brasil, a drenagem urbana sempre teve uma abordagem sanitaria. Tal prática causa cada vez mais problemas como enchentes e eutrofização dos corpos d'água. Atualmente, os constantes problemas enfrentados pelas cidades retratam a forte situação de negligência em que se encontra este tema no país. Neste prisma, o presente projeto teve como objetivo propor um modelo Hidráulico/Hidrológico da rede de drenagem de Ilha Solteira, a fim de subsidiar decisões futuras de gestão da bacia urbana como um todo. A área de estudo foi a sub-bacia do córrego Sem Nome localizado na cidade de Ilha Solteira-SP. A base de dados utilizada foi obtida por meio de estudos disponibilizados pela prefeitura, ensaios de campo e a instalação de sondas e pluviógrafos na área de projeto. Além disso, foram usadas imagens de satélite obtidas por meio do Software Livre Google EarthPro. Foram utilizados os softwares ArcGis 10 e o Storm Water Management Model (SWMM) para estabelecer um modelo digital representativo da bacia, por meio das equações de Saint-Venant 1D e da onda cinemática. Foi realizada uma análise de sensibilidade, além da calibração e validação do sistema. Os cálculos desta pesquisa tiveram por base 31 eventos ocorridos durante o desenvolvimento da mesma, e o modelo foi avaliado sob o escopo de cinco indicadores estatísticos. Os resultados mostraram que o modelo elaborado teve desempenho satisfatório, com coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe médios de 0,69; indicador de concordância médio de 0,92; erro médio na vazão de pico equivalente à 21% e erro médio no tempo de pico igual a 2 minutos e 40 segundos.

Palavras-chave: SWMM. Hidrologia urbana. SIG.

ABSTRACT

Since the beginning of the formation of urban conglomerates in Brazil, the urban drainage has been taken a sanitary approach. This practice has caused more and more problems, such as flooding and eutrophication of streams. The constant problem faced by most cities is the strong neglect that lies in this country. In this perspective, the present work proposes a Hydraulic/hydrological model of the storm water network of Ilha Solteira, in order to support future subsidization of urban basin management as a whole. The study area was the sub-basin of the Sem Nome stream located in the city of Ilha Solteira-SP. The used database was obtained by city hall studies, field trials, probes and rain gauges installed in the project area; the satellite images were obtained by using the Free Software EarthPro., ArcGis 10 and Stormwater Management Model (SWMM), to establish a representative digital model of the basin using the Saint-Venant 1D equations and the kinematic waveform. Sensitivity, calibration and validity analyses of the system were performed, 31 events were captured and a model was evaluated by five statistic indicators. The results have shown that the elaborated model has presented a satisfactory performance with mean Nash-Sutcliffe efficiency coefficients of 0.69, index of agreement of 0,92, average error in peak flow equivalent to 21% and mean error with no peak time equal to 2 minutes and 40 seconds.

Keywords: SWMM. Urban hydrology. GIS.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- POPULAÇÃO URBANA E RURAL, 1950-2050.....	17
FIGURA 2 - EFEITO DA URBANIZAÇÃO DO VOLUME E VAZÃO DE PICO ESCOADA.	18
FIGURA 3 - CHUVA CONVECTIVA EM VÁRZEA GRANDE, MT.....	22
FIGURA 4 - DIFERENÇAS NOS PROCESSOS DE URBANIZAÇÃO A - CATANIA, ITÁLIA B - NOVA DELHI, ÍNDIA (ALTITUDE: 1KM) 24	
FIGURA 5 - EXEMPLO DE TELHADO VERDE EM SEOUL, COREIA DO SUL.....	25
FIGURA 6 - ARMAZENAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA NO ASFALTO, ILHA SOLTEIRA-SP.....	26
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO TÍPICA DE PAVIMENTO PERMEÁVEL (A) E POROSO (B).	27
FIGURA 8 - CONCEITUAÇÃO ATUAL DE DIMINUIÇÃO DE ÁREAS EFETIVAMENTE IMPERMEÁVEIS	29
FIGURA 9 - VOLUME DE CONTROLE PARA O DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DE SAINT-VENANT	31
FIGURA 10 - CONCEITUAÇÃO FÍSICA DO ESCOAMENTO EM BACIAS URBANAS	34
FIGURA 11 - PROBLEMAS TÍPICOS NA MODELAGEM DO ESCOAMENTO URBANO (A) - FLUXO NAS RUAS (B) - ALAGAMENTO EM BUEIROS E MEIO FIO.....	37
FIGURA 12 - MODELO CONCEITUAL DO ESCOAMENTO EM BACIAS URBANAS	38
FIGURA 13 - MODELO CONCEITUAL FUNDAMENTAL DO SWMM.....	40
FIGURA 14 - DIFERENÇAS DOS HIDROGRAMAS DE ACORDO COM O MOVIMENTO DA CHUVA.	43
FIGURA 15 - RESOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL EXIGIDA PARA PLUVIÓGRAFOS EM BACIAS URBANAS.....	44
FIGURA 16 - MODELO CONCEITUAL DA SUB-BACIA NO SWMM	45
FIGURA 17 - MODELO DE RESERVATÓRIO NÃO LINEAR DE UMA SUB-BACIA.....	45
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO DA DIVISÃO DAS BACIAS NO SWMM.....	47
FIGURA 19 - TIPOS DE ROTA PARA O ESCOAMENTO NO SWMM	48
FIGURA 20 - CORRELAÇÃO ESPACIAL DAS CARACTERÍSTICAS DE INFILTRAÇÃO DO SOLO.	53
FIGURA 21 - SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS (1) - BACIA NÃO URBANIZADA (2)(3) - BACIA URBANIZADA	55
FIGURA 22 - RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA E O ÍNDICE DE CONCORDÂNCIA	60
FIGURA 23 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO CÓRREGO SEM NOME	64
FIGURA 24 - LIMITES DA BACIA DO CÓRREGO SEM NOME ANTES (A) E DEPOIS (B) DA URBANIZAÇÃO	65
FIGURA 25 - TOPOGRAFIA DA BACIA DO CÓRREGO SEM NOME (CURVAS DE NÍVEL DE 1 EM 1M)	65
FIGURA 26 - LOCALIZAÇÃO E ESTADO ATUAL DO CÓRREGO SEM NOME.....	67
FIGURA 27 - ARVORES CAÍDAS SOBRE A MACRODRENAGEM E SITUAÇÃO DE ENTORNO	68
FIGURA 28 - ALAGAMENTO DAS LOMBOFAIXAS	68
FIGURA 29 - LOCALIZAÇÃO E ÁREA DE INFLUÊNCIA DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS.....	69
FIGURA 30 - LOCAÇÃO E INSTALAÇÃO DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS	70
FIGURA 31 - EQUIPAMENTOS INSTALADOS EM CAMPO A - PONTO 1 B- PONTO 2	71
FIGURA 32 - METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA LARGURA DA SUB-BACIA.....	74
FIGURA 33 - ENSAIO DE INFILTRÔMETRO DE DUPLO ANEL. A - APARATO NIVELADO B - APARATO ANTES DO INÍCIO C - TESTE EM EXECUÇÃO.....	76
FIGURA 34- ESQUEMA DE ENSAIO PARA A CALIBRAÇÃO DO PLUVIÓGRAFO	78
FIGURA 35- ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO TUBO DE MARIOTTE.....	79

FIGURA 36 - APARATO EXPERIMENTAL PARA VERIFICAÇÃO DO ADP.	80
FIGURA 37 - IMAGEM DE SATÉLITE DA SUB-BACIA	84
FIGURA 38 - DEFINIÇÃO DAS SUB-BACIAS DE PROJETO.	85
FIGURA 39 - DRENAGEM DA SUB-BACIA INSERIDA NO SWMM.....	86
FIGURA 40 - CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	87
FIGURA 41 - PORCENTAGEM DE ÁREA IMPERMEÁVEL POR SUB-BACIA	88
FIGURA 42 - EXEMPLOS DE BACIAS COM ALTO E BAIXO GRAU DE IMPERMEABILIZAÇÃO.	88
FIGURA 43 - DECLIVIDADES MÉDIAS DAS SUB-BACIAS	90
FIGURA 44 - PONTOS DE INFILTRAÇÃO AMOSTRADOS	91
FIGURA 45 - RESULTADO DOS TESTES DE INFILTRAÇÃO.	92
FIGURA 46 - CURVAS DE INFILTRAÇÃO OBTIDAS NOS DIVERSOS PONTOS.	93
FIGURA 47 - SEMIVARIOGRAMA DOS PARÂMETROS DE INFILTRAÇÃO	94
FIGURA 48 - CONSISTÊNCIA DOS DADOS DE CHUVA CAPTADOS	96
FIGURA 49 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO ADP	97
FIGURA 50 - RELAÇÃO VAZÃO/LÂMINA D'ÁGUA.	97
FIGURA 51 - CURVA-CHAVE DO EXUTÓRIO DA BACIA.....	98
FIGURA 52 - RESULTADO DAS ANÁLISES DA SENSIBILIDADE.....	100
FIGURA 53 - ÁRVORES TOMBADAS NO CANAL DE MACRODRENAGEM.	106
FIGURA 54 - COE E IC DOS EVENTOS DE CALIBRAÇÃO	108
FIGURA 55 - RMSE VERSUS VAZÃO MÁXIMA OBSERVADA - CALIBRAÇÃO	109
FIGURA 56 -ERRO DA VAZÃO DE PICO - CALIBRAÇÃO	109
FIGURA 57 - ERRO NO TEMPO DE PICO - CALIBRAÇÃO	110
FIGURA 58 - COE E IC DOS EVENTOS DE VALIDAÇÃO	112
FIGURA 59 - RMSE VERSUS VAZÃO MÁXIMA OBSERVADA - VALIDAÇÃO	113
FIGURA 60 - -ERRO DA VAZÃO DE PICO - VALIDAÇÃO	113
FIGURA 61 - -ERRO NO TEMPO DE PICO - VALIDAÇÃO	114
FIGURA 62 - DISPERSÃO E CORRELAÇÃO ENTRE O OBSERVADO E MODELADO	115
FIGURA 63 - SENSIBILIDADE ESPACIAL DO MODELO (EVENTO 12/04/2017)	117
FIGURA 64 - SENSIBILIDADE ESPACIAL DO MODELO (EVENTO 11/04/2017)	117
FIGURA 65 - ERROS RELATIVOS À PRECIPITAÇÃO.	119

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TIPOS DE MODULOS DISPONÍVEIS NO SWMM.....	40
TABELA 2 - MÉTODOS DE CÁLCULOS DE INFILTRAÇÃO UTILIZADO NO SWMM	52
TABELA 3 - SENSIBILIDADE DO HIDROGRAMA PARA OS PARÂMETROS DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	54
TABELA 4 - LIMITES DE CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS	58
TABELA 5 - COEFICIENTES DE EFICIÊNCIA ENCONTRADOS NA LITERATURA	59
TABELA 6 - PARÂMETROS DE INFILTRAÇÃO DA BACIA	91
TABELA 7 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO PLUVIÓGRAFO.....	95
TABELA 8 - VALORES TESTADO PARA A AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE.....	99
TABELA 9 - SENSIBILIDADE DOS MODELOS AOS PARÂMETROS ESTUDADOS	102
TABELA 10 - EVENTOS CAPTADOS.	103
TABELA 11 - VALORES DOS PARÂMETROS CALIBRADOS.....	104
TABELA 12 - INDICADORES DE EFICIÊNCIA PARA OS EVENTOS DE CALIBRAÇÃO.....	107
TABELA 13 - INDICADORES DE EFICIÊNCIA PARA OS EVENTOS DE VALIDAÇÃO.	111
TABELA 14 - ERROS DECORRENTES DA DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL	118
TABELA 15 - COMPARAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA E INTENSIDADE MÁXIMA.	118
TABELA 16 - INDICADORES ANALISADOS VIA ESPACIALIDADE.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS

ADP	ACOUSTIC DOPPLER PROFILE
AEI	ÁREAS EFETIVAMENTE IMPERMEÁVEIS
COE	COEFICIENTE DE EFICIENCIA DE NASH—SUTCLIFFE
EQP	ERRO NA VAZÃO DE PICO
ETP	ERRO NO TEMPO DE PICO
IC	ÍNDICE DE CONCORDÂNCIA
MDE	MODELO DIGITAL DE TERRENO
RMSE	RAIZ DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO
SIG	SISTEMA DE INFORMAÇÕES REOGRÁFICAS
SWMM	STORM WATER MANAGEMENT MODEL

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
2	OBJETIVO	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Hidrologia Urbana.....	17
3.1.1	Medidas de Precipitação	20
3.1.2	Escoamento Superficial	23
3.2	Modelos	29
3.2.1	Equação de Saint-Venant	30
3.2.2	Modelos de Escoamento	34
3.3	O Modelo “Storm Water Management Model” (SWMM)	38
3.3.1	Precipitação	42
3.3.2	Escoamento Superficial	44
3.3.3	Infiltração	51
3.3.4	Sensibilidade	53
3.4	Parâmetros Estatísticos e Calibração.....	56
3.4.1	Métodos de Calibração	61
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
4.1	Banco de Dados	63
4.2	Caracterização da Área de Estudo.....	64
4.3	Sistema de drenagem.....	66
4.4	Localização e Instalação dos postos de coleta.....	68
4.5	Elaboração do Modelo Digital.....	72
4.5.1	Inserção do Sistema no Software	72
4.5.2	Definição dos atributos dos componentes	72
4.6	Consistência dos Dados.....	77

4.6.1	<i>Aferição da instrumentação utilizada</i>	77
4.6.2	<i>Consistência dos Dados</i>	80
4.7	Simulação dos Eventos e Calibração do Modelo	81
4.7.1	<i>Sensibilidade do Modelo</i>	81
4.7.2	<i>Parâmetros Estatísticos considerados</i>	82
4.7.3	<i>Processo de Calibração e Validação</i>	82
4.8	Espacialidade das Precipitações	83
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
5.1	Obtenção da imagem de Satélite	84
5.2	Definição das Características das Sub-bacias	85
5.3	Validação da instrumentação	95
5.3.1	<i>Calibração e consistência dos Pluviógrafos</i>	95
5.3.2	<i>Calibração e consistência do ADP</i>	96
5.4	Análise da sensibilidade.	98
5.5	Calibração do Modelo	102
5.6	Eficiência do Modelo e Validação	107
5.7	Dependência Espacial	116
6	CONCLUSÃO	121
7	RECOMENDAÇÕES	123
7.1	Para a continuidade deste trabalho	123
7.2	Para os Órgãos mantenedores do sistema	123
8	COMENTÁRIOS FINAIS	125
	REFERÊNCIAS	127
	ANEXOS	138

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Ao longo do último século, a população, principalmente a urbana, sofreu um aumento exponencial (UNITED NATIONS, 2014). Com isso, houve também a alteração do uso do solo, o que alterou drasticamente o ciclo hidrológico e fez com que ocorresse um aumento do volume e vazão escoada nos cursos d'água (GUO, 2013), causando assim inundações.

A civilização, organizada em comunidades sedentárias como conhecemos hoje, é fruto da integração entre a comunidade e o uso das fontes de água, exemplos desta afirmação datam de muito tempo, como, por exemplo, os egípcios, que se desenvolveram ao longo do rio Nilo, ou os povos que habitaram a Mesopotâmia (do grego: região entre rios). O uso de Sistemas de drenagem tem sua gênese por volta de 3000 a.C. durante a civilização do Indus. Posteriormente, veio também os povos da Mesopotâmia e em torno de 2000 a.C os gregos, na Ilha de Creta, dispunham de um extenso sistema de drenagem. (LARRY,2001).

A drenagem urbana no Brasil teve seu início e evolução fundados em princípios higienistas, prezando por sistemas separadores absolutos e o rápido afastamento das águas pluviais; por isso, não raro, se ouvem relatos de problemas com inundações e enchentes nas cidades brasileiras.

O primeiro método de cálculo para drenagem urbana foi o método racional desenvolvido pelo engenheiro Irlandês Thomas Mulvaney (Mulvany, 1851), utilizado até hoje em muitos casos, apesar de ser um modelo superestimado e impreciso. Com o advento da computação, houve também uma sofisticação dos métodos de cálculo e muitos modelos foram desenvolvidos e validados com dados de campo, principalmente nos últimos 40 anos, atraindo o interesse de agências federais, e gerando assim softwares como o SWMM, HEC1, HEC2, STORM entre outros (LARRY,2001).

No Brasil, quase que a totalidade dos projetos é realizada utilizando o método racional ou equivalente, de modo que não há interesse de aprimoramento das técnicas. Basicamente, se preocupam com a vazão de pico

e o dimensionamento da canalização, sem se preocupar com impactos à jusante, carreamento de poluentes ou com a gestão da bacia como um todo (BAPTISTA; NASCIMENTO, 2002).

A prevenção de inundações em áreas urbanas vem se tornando uma questão cada vez mais importante, pois existe o aumento dos valores das propriedades, edifícios e outras estruturas na medida em que a ocupação se torna mais densa. Da mesma maneira que ocorre a valorização do entorno, a área torna-se cada vez mais propensa a sofrer esses desastres, com consequências que se potencializam. Os dados podem chegar, facilmente, à casa dos milhões de dólares (SCHMITT; THOMAS; ETTRICH, 2004). As perdas por ano podem superar a casa dos 40 bilhões de dólares. Em contrapartida, as mortes em decorrência desses eventos vêm se tornando cada vez menores, refletindo, mesmo que de maneira lenta, implementações bem-sucedidas de medidas de gerenciamento (JHA; BOOTH; BLOCH, 2012).

Dentre todos os desastres naturais, as inundações são os mais frequentes. Nos últimos 20 anos, a ocorrência desses eventos aumentou vertiginosamente. Somente em 2010, cerca de 178 milhões de pessoas foram atingidas por eventos dessa natureza. As inundações atingem conglomerados urbanos de toda magnitude: desde pequenos vilarejos, como os da Índia, até grandes metrópoles como Nova York e Bangkok (JHA; BOOTH; BLOCH, 2012).

Dados coletados entre 2008 e 2012 mostraram que 27,7% dos municípios brasileiros foram atingidos por inundação gradual, enquanto 28,3% por enxurradas bruscas (IBGE, 2013). Em 2011, inundações no Sudeste do Brasil, em especial no Rio de Janeiro e São Paulo, mataram cerca de 800 pessoas e mais de 100 mil pessoas foram desalojadas (JHA; BOOTH; BLOCH, 2012). Obviamente, cidades pequenas tendem a sofrer menos com esse tipo de desastre, porém não é um fenômeno raro. Em Ilha Solteira-SP, alagamentos são constantes, como o de maio de 2017 (FAGUNDES, 2017) e o de novembro de 2017 (FAGUNDES, 2018).

A fim de mitigar os efeitos adversos causados pelas inundações, é necessário quebrar o antigo paradigma da concepção simplista de sistemas de drenagem no Brasil. É imprescindível gerenciar e projetar a bacia como um todo,

com uma abordagem integrada e gestão de risco, e não mais galeria a galeria (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005). Para isso, a ampliação e desenvolvimento de técnicas em ambiente SIG, utilizando softwares já consagrados no mundo todo como o SWMM, é de fundamental importância para o avanço da visão sobre o tema.

Neste escopo, o presente trabalho se insere propondo e desenvolvendo uma metodologia robusta e, ao mesmo tempo, inteligível aos agentes atuantes nesse setor, uma vez que utiliza softwares amplamente difundidos com vasta literatura disponível e amparados por fundamentação teórica compatível com o estado da arte atual da hidráulica e hidrologia.

2 OBJETIVO

Elaborar um modelo fisicamente compatível com os eventos de chuvas intensas da bacia urbana do Córrego Sem Nome em Ilha Solteira-SP, utilizando o SWMM com auxílio de ferramentas de SIG. E, estabelecer uma metodologia compreensível e de possível replicação aos agentes atuantes no setor.

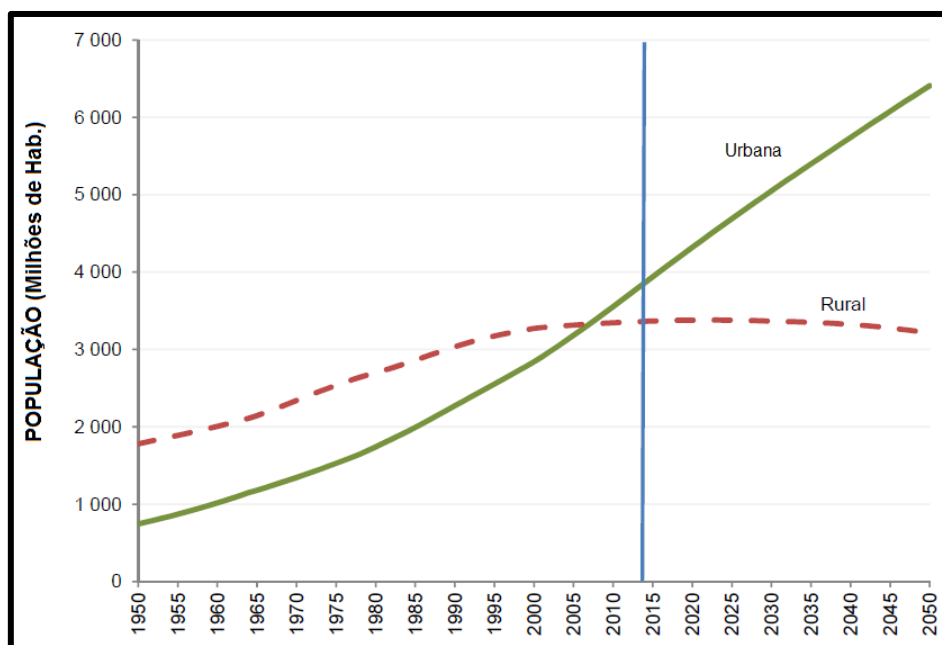
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Hidrologia Urbana

É notório que o processo de urbanização é um fenômeno que vêm aumentando, ininterruptamente, desde a revolução industrial. A Figura 1 ilustra a diferença entre as taxas de aumento da população rural e urbana, tal qual sua perspectiva. Atualmente, 54% de toda população mundial reside em áreas urbanas, número muito maior do que em 1950 (30%). A perspectiva para 2050 é que esse percentual chegue à 66% (UNITED NATIONS, 2014).

Essa mudança no panorama global causa diversas consequências que ainda não estão completamente compreendidas (WU, 2014). Uma delas é a modificação da qualidade e quantidade de água transportada em corpos d'água. A hidrologia urbana se insere neste panorama para entender, remediar e prevenir riscos ambientais.

Figura 1- População Urbana e Rural, 1950-2050

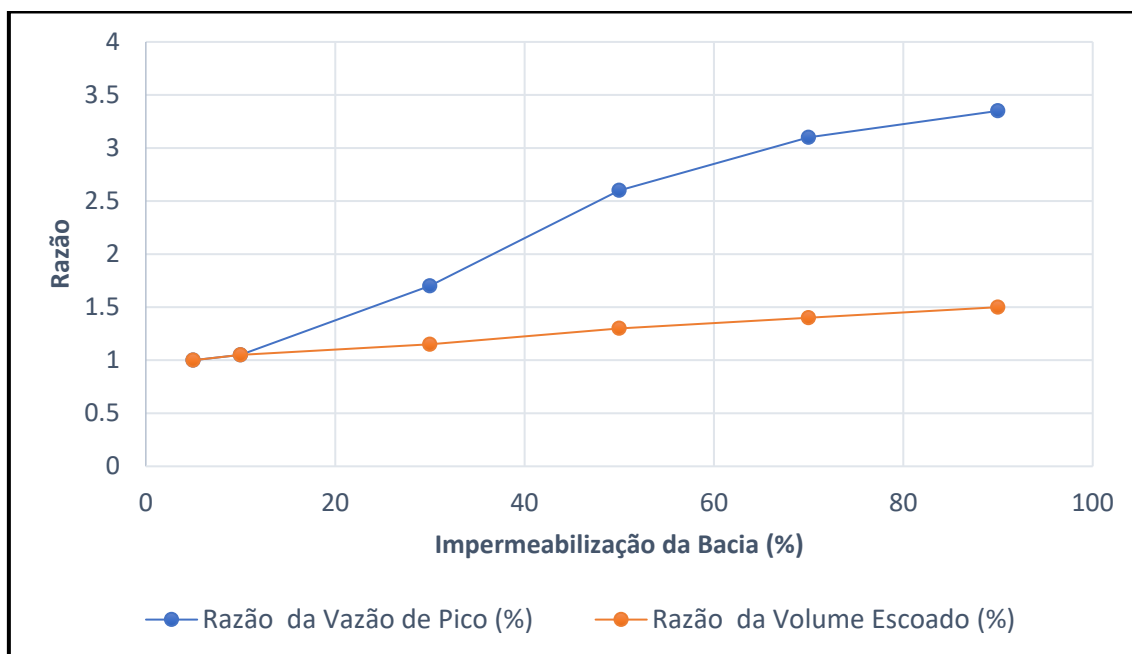


Fonte: (UNITED NATIONS, 2014)

O desenvolvimento de áreas urbanas é caracterizado por uma modificação abrupta na cobertura do solo, o que influencia, drasticamente, os ciclos hidrológicos, diminuindo o tempo de resposta, elevando os picos de vazão

e causando muitas vezes eventos de inundações em áreas urbanas. A Figura 2 ilustra o aumento do pico de vazão e volume escoado, em relação à porcentagem de área impermeabilizada da bacia.

Figura 2 - Efeito da urbanização do Volume e Vazão de Pico Escoada.



Fonte: (GUO, 2013) modificado

Os danos referentes às inundações são difíceis de serem calculados e apresentam diversas fontes de incertezas. São compostos por danos tangíveis (e.g. Danos Materiais, Serviços Adicionais) e intangíveis (e.g. Desvalorização, prejuízo à saúde humana) (MERZ *et al.* 2010). No começo do século XXI no Brasil, estimativas feitas de danos e prejuízos decorrentes de inundações giravam em torno de 1 a 2 bilhões de dólares, mostrando assim a relevância desse assunto (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005).

Os efeitos da urbanização nos corpos hídricos são vastos e amplamente conhecidos, ocasionados principalmente devido a duas fontes precursoras: o aumento da área impermeabilizada e o aumento da carga de poluentes devido às atividades humanas.

Muitos são os processos que provocam essas mudanças, tais quais: aumento da malha viária, ocupação das planícies de inundação, redução da capacidade de drenagem, canalização dos cursos d'água e mudanças do uso do solo para agricultura e outras atividades. (SHUSTER *et al.*, 2005).

Entre os principais efeitos destacam-se: (FLETCHER *et al*, 2013)

- Aumento do Volume escoado e diminuição do tempo de concentração da bacia, ocasionando vazões de grande magnitude com um tempo de resposta curto.
- Diminuição da infiltração, gerando o decréscimo do escoamento subsuperficial, e, por conseguinte, o escoamento de base nos rios perenes.
- Degradação dos corpos d'água e decréscimo na qualidade da água devido à lixiviação e transporte de cargas poluidoras produzidas na bacia.

Para manter o cerne deste trabalho, serão discutidos, com mais detalhes, os impactos referentes à impermeabilização. Para amenizar os efeitos da urbanização, têm sido estudadas, desde 1970 até os dias atuais, técnicas de baixo impacto com o intuito de conferir à bacia as características de seu estado natural, possibilitando a diminuição do seu volume escoado, aumento do tempo de resposta, recarga das reservas subterrâneas e redução das cargas de poluentes (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD,2005) (FLETCHER *et al*. 2014). Como exemplo, pode-se destacar os telhados verdes (HARPER *et al*. 2015) e os pavimentos permeáveis (SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007).

A maioria das técnicas de baixo impacto que protagonizam os estudos nos dias de hoje se caracterizam como controle de escoamento na fonte, ou seja, atuam na microdrenagem. Porém, atualmente, essas práticas estão sendo utilizadas para controlar problemas de macrodrenagem, como enchentes (LEE *et al*. 2012); isto é especialmente válido no Brasil, onde a drenagem urbana foi toda fundamentada em princípios “higienistas” e apresenta, hoje, infraestrutura completamente comprometida (CANHOLI. 2005).

No entanto, as técnicas de controle centralizado, como as bacias de retenção, também são importantes aliadas no combate aos efeitos nocivos da urbanização, sendo muito utilizadas pelos órgãos gestores da drenagem no Brasil. Contudo, essas técnicas, ainda com enfoque limitado, prezam quase sempre pelo amortecimento da vazão e subestimam seu potencial de controle de poluentes (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005).

Exemplos da redução da vazão de pico, assim como do aumento do tempo de resposta com a inserção de técnicas de baixo impacto não faltam na literatura. Martins (2016) obteve uma diminuição dos picos de vazão de 50% na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos-SP. Hood, Clausen e Warner (2007) constataram uma diminuição de até 60% do pico de vazão e um aumento significativo no tempo de resposta. Klenzendorf *et al.* (2015), em sua área de estudo em Austin, estado americano do Texas, concluiu que haveria uma redução de 72% das estruturas atingidas por inundação, caso houvesse o emprego de tais técnicas.

É importante pontuar que a mitigação causada por essas técnicas varia muito de acordo com o caso estudado, não sendo possível, portanto, estipular um valor base característico de redução de pico e aumento no tempo de resposta, de modo que áreas com desenvolvimento mais planejado, ou menos urbanizadas, são menos sensíveis a essas alterações. Chuvas muito intensas, com tempo de retorno muito elevado, também causam ineficiência das técnicas compensatórias.

3.1.1 Medidas de Precipitação

A maior parte das bacias urbanas apresenta pequenas dimensões (não ultrapassando a casa das centenas de quilômetros quadrados) e tempos de concentração muito curtos (devido à grande quantidade de área impermeável). Por esses dois motivos, as chuvas convectivas, que são chuvas com baixo tempo de duração, alta intensidade e abrangem pequenas áreas, figuram como protagonistas em um modelo chuva-vazão de bacias urbanas (FLETCHER *et al.*, 2013).

Porém, tal tipo de chuva requer uma resolução espacial e temporal muito mais detalhada do que quando se estuda grandes bacias, pois a sua variabilidade é muito maior do que outros tipos de precipitação, como as frontais. A Figura 3 ilustra esse fenômeno. Nota-se que a precipitação ocorre em um espaço muito pequeno, existindo, inclusive, lugares dentro da própria cidade em que não ocorre o evento.

Um valor base para a resolução da medida de chuva é de cerca de 3km e 5 minutos (BERNE *et al.*, 2004); porém, já se sabe que quanto mais densa for essa malha, melhores serão os resultados. Uma rede com resolução espacial de 1km e resolução temporal de 1 minuto apresenta boas perspectivas no âmbito da hidrologia urbana (RICO-RAMIREZ; LIGUORI; SCHELLART, 2015).

Devido a essa particularidade, a medida da chuva é um dos gargalos mais importantes no manejo de bacias urbanas, pois é a principal fonte de entrada do sistema e apresenta lacunas muito grandes de estimativas (NIEMCZYNOWICZ, 1999).

É necessária uma vasta rede de pluviógrafos para ter uma medição com a precisão necessária. Outro ponto de fundamental importância é a precisão das medições destes instrumentos. Lanza e Stagi (2009) estudaram diferentes tipos e marcas de pluviógrafos sob condições controladas em laboratório e verificaram que a maioria dos equipamentos oscila em uma margem de 5% de erro.

A maior fonte de erro nos pluviógrafos é provocada pelos fortes ventos que acompanham a chuva, que, por sua vez, provocam a curvatura das gotas precipitais. Tais erros podem variar de 2-10 %. Em áreas urbanas, o processo de medição sofre com outro problema: a existência de edificações que geram barreiras e interferem na medida exata (WMO, 2008).

Outra maneira de se estimar a precipitação é por meio dos radares. Esse método de medida vem sendo amplamente utilizado e estudado ao longo dos anos, porém, as medidas de radares sofrem com inúmeras fontes de erro, e é esse o principal objeto de estudo atualmente (FLETCHER *et al.*, 2013). As simulações feitas por pluviógrafos e radares apresentam discrepâncias quando confrontadas entre si (RICO-RAMIREZ; LIGUORI; SCHELLART, 2015).

Figura 3 - Chuva Convectiva em Várzea Grande, MT



Fonte: Moura (2017).

Atualmente, existe tecnologia satisfatória para uma boa representação da chuva por meio de radares, com espaços de tempo entre um e dois minutos, e erros de observação na casa de 10 a 20 % (WANG *et al.*, 2015). Porém, nem sempre essa prática vem acompanhada de baixo investimento e conhecimento técnico. E, mesmo com radares de alta resolução (1 km² e 5 minutos de resolução espacial), pode-se observar uma limitação na entrada dos dados, que gera hidrogramas não totalmente compatíveis, como foi o caso do trabalho realizado e reportado por Niemi *et al.* (2017).

Uma nova técnica que tem sido cada vez mais difundida é a medida de chuvas via Micro-ondas. O conceito fundamenta-se na atenuação dos sinais de micro-ondas entre o emissor e o receptor. Como exemplo, pode-se citar a influência da chuva no sistema LiDar (Sistema para veículos autónomos) diminuindo o alcance dos equipamentos (FILGUEIRA *et al.*, 2017). Esse processo teve seus primórdios na década de 60, mas ganhou força ultimamente com o aumento da rede de antenas de telefonia móvel (FENICIA *et al.*, 2012).

Uma grande vantagem deste tipo de medição é a continuidade do modelo, ou seja, não há pontos discretos, como no caso dos pluviógrafos; porém, essa técnica também apresenta muitas fontes de erros que ainda não estão completamente entendidos. É necessário mais estudo para ratificá-la como instrumento de medição de chuva.

3.1.2 Escoamento Superficial

As alterações antrópicas na bacia, principalmente o processo de impermeabilização e a construção de caminhos preferências para a passagem do fluxo, alteram drasticamente o comportamento do volume de água escoado. Como será discutido mais à frente na seção 3.2.2, a água percorre diferentes superfícies até chegar ao exutório, e é de fundamental importância estudar todos os estágios e particularidades desse processo. As duas principais subdivisões são os escoamentos no telhado e os escoamentos em superfícies pavimentadas, como ruas e estacionamentos.

O processo de urbanização naturalmente aumenta o coeficiente de deflúvio, (relação entre o volume precipitado sobre o volume escoado representado pela equação 1), em proporções que dependem da sustentabilidade do processo de ocupação da área e da densidade de construções. A Figura 4 ilustra a diferença que pode haver entre um processo e outro de urbanização em diferentes cidades.

$$C = \frac{Vol_{ESCOADO}}{Vol_{PRECIPITADO}} \quad (1)$$

Onde C é o coeficiente de deflúvio e Vol é o volume.

Figura 4 - Diferenças nos processos de Urbanização A - Catania, Itália B - Nova Delhi, Índia (Altitude: 1km)



Fonte: Elaboração do autor.

O escoamento no telhado é influenciado pela sua inclinação, sendo que quanto mais inclinado, menos água incide sobre ele. O coeficiente de deflúvio anual oscila em torno de 60 a 90% (RAGAB *et al.*, 2003a).

Atualmente, uma prática que tem sido alvo de inúmeros estudos é a utilização dos telhados verdes para aumentar a porção de área permeável. A Figura 5 mostra um exemplo. Lee, Lee e Han (2015) concluíram que para uma camada de 200 mm de solo, a diminuição do escoamento era de 42,8 a 60,8%, enquanto que para uma camada de 150 mm essa porcentagem caía para 13,8 a 34,4%. Carpenter *et al.* (2016) encontraram resultados mais otimistas, com a média de retenção de água igual a 95%, com um mínimo de 88%. Harper *et al.* (2015) obtiveram uma diminuição do escoamento de 40 (sem cultura plantada) a 60 % (com cultura plantada) em média.

Figura 5 - Exemplo de Telhado Verde em Seoul, Coreia do Sul



Fonte: (LEE; LEE; HAN, 2015)

Embora as diversas pesquisas apresentem divergências em relação aos coeficientes de deflúvio, é unânime a constatação de que quanto maior a intensidade da chuva e menos dias secos antecedentes, menor será a retenção de água, e, por conseguinte, a diminuição do escoamento.

É importante ressaltar que o emprego de telhados verdes não necessariamente apresenta melhora na qualidade da água escoada. De maneira geral, a qualidade da água não sofre melhora com o emprego desta técnica. Kohler e Schmidt (2003) constataram que os níveis de Cádmio, nitratos, fósforo e turbidez foram reduzidos entre 68 e 95%. Já Bliss, Neufeld e Ries (2009) notaram que os efeitos de first-flush (fenômeno que tende a diminuir sensivelmente a qualidade da água nos primeiros milímetros escoados) foram amenizados, em detrimento da piora de alguns indicativos.

Em Curitiba, estudos conduzidos por Budel (2014) indicaram que os parâmetros de potabilidade não foram suficientemente melhorados; em alguns casos foram até piorados em certos pontos, como em relação à turbidez e à presença de nitrogênio. Teixeira (2013) também não notou a melhora na qualidade da água, sendo que houve maior ocorrência de matéria orgânica nas amostras de Telhado verde.

O escoamento em superfícies pavimentadas, como ruas e estacionamentos, compreende uma parcela importante do escoamento superficial. É estimado que o coeficiente de deflúvio anual seja em torno de 70-

60%, sendo que, de toda água precipitada, cerca de 6-9% é infiltrada e 21-24% evaporada. (RAGAB *et al.*, 2003b) (RAMIER; BERTHIER; ANDRIEU, 2011).

Angrill *et al.* (2017) estudaram o coeficiente de deflúvio de diferentes tipos de superfícies urbanas, como estacionamentos convencionais e com diferentes tipos de materiais, além de calçadas. Os autores obtiveram valores de coeficiente de deflúvio de 40-90%. É importante ressaltar que tal estudo não desconsiderou a parte interceptada de pequenas árvores presentes na área de estudo.

Esses dados quebram o antigo paradigma de que essas superfícies, tratadas como impermeáveis, teriam o coeficiente de deflúvio igual a 100%, causando assim erros de superestimação. Como discutido no parágrafo anterior, três processos são responsáveis pela queda do coeficiente de deflúvio:

- Infiltração natural decorrente das micro-fissuras do pavimento;
- Evaporação, processo que decorre das microáreas de armazenamento do asfalto que se formam após um evento, conforme ilustra a Figura 6;
- Retenção de água por absorção ou adsorção do próprio material impermeável.

Figura 6 - Armazenamento de água de chuva no Asfalto, Ilha Solteira-SP

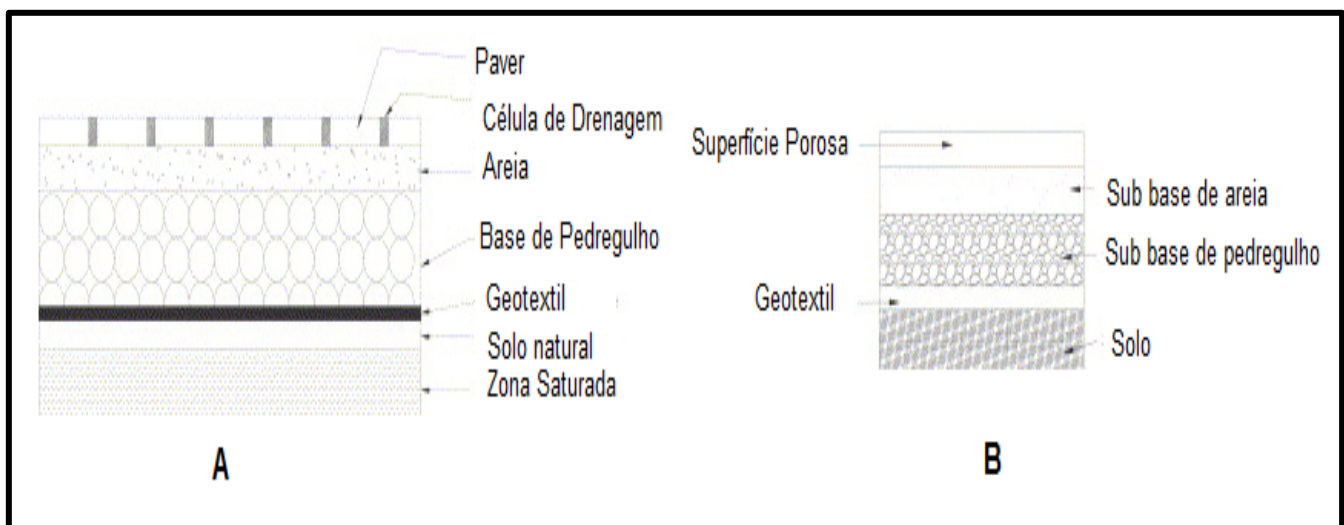


Fonte: Elaboração do autor.

Com o mesmo intuito dos telhados verdes, os pavimentos porosos ou permeáveis (Figura 7) têm sido cada vez mais estudados, e intitulados pela associação de proteção ambiental dos Estados Unidos como a melhor prática para atenuar os eventos de cheia. Em comparação com o uso do asfalto convencional, esse tipo de solução pode reduzir em até 42% a vazão de pico (SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007).

Porém, esse tipo de técnica compensatória sofre com uma grande limitação, que é o processo de colmatção, deposição de matéria mais fina (em geral silte), que preenche os poros da camada de solo e, por conseguinte, reduz a permeabilidade do mesmo. Estudos mostram que o processo de colmatção total ocorre em sete anos hidrológicos (KAMALI; DELKASH; TAJRISHY, 2017).

Figura 7 - Representação Típica de pavimento permeável (A) e poroso (B).



Fonte: (SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007)

Além de caracterizar as superfícies como impermeável ou permeável, a sua disposição espacial e qual área está conectada ao canal de drenagem figuram como importantes características na determinação da vazão final. Estudos mostram que as alterações na vazão do exutório devidas à urbanização são mais bem representadas por áreas que estão diretamente conectadas ao sistema de drenagem, denominadas de áreas efetivamente impermeáveis (AEI).

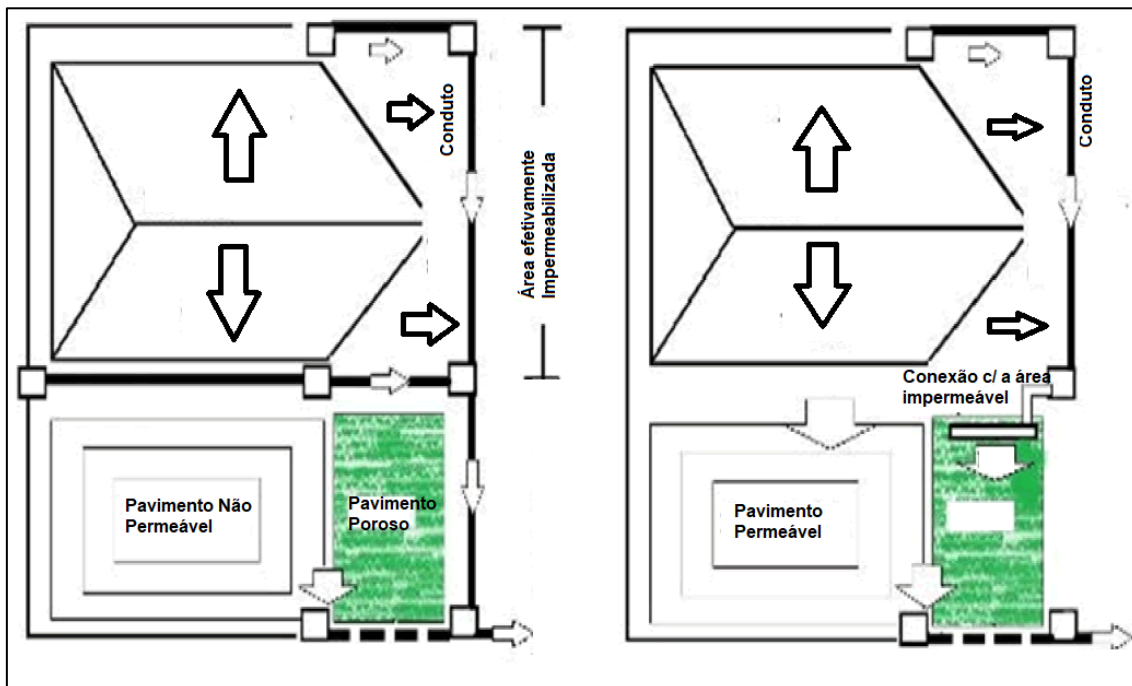
(SHUSTER *et al.*, 2005). Portanto, a melhora do manejo da bacia urbana não se dá apenas diminuindo as áreas impermeáveis, mas também as desconectando.

Porém, tal técnica necessita de elevada precisão dos bancos de dados e nem sempre é de fácil acesso e baixo custo. Pesquisas vêm sendo realizadas para aprimorar a avaliação destas áreas (ROY; SHUSTER, 2009) (EBRAHIMIAN; WILSON; GULLIVER, 2016) e, fundamentalmente, se resume a técnicas que utilizam análises estatísticas para calibração dos modelos e artifícios de sistema de informação geográfica (SIG), com imagens de alta resolução e modelo digital de elevação com alta precisão e vetores da rede de drenagem (HAN; BURIAN, 2009). Alguns exemplos dessas áreas são ruas, calçadas e estacionamentos que encaminham o fluxo direto para micro ou macrodrenagem.

A minimização das AEI é importante ferramenta no combate aos efeitos da urbanização na bacia. Políticas públicas que incentivam esse tipo de prática começam a ser pensadas em todo mundo (GUO, 2013) e, neste contexto, a utilização dos dispositivos de baixo impacto referidos no texto acima são protagonistas (SOHN; KIM; LI, 2015). A Figura 8 representa um novo conceito de micro drenagem de economias domésticas, diminuindo as AEI.

Estudos recentes (KONG *et al.*, 2017) têm mostrado que a diminuição das AEI reduz, significativamente, a vazão de pico; e que existem ainda muitas lacunas a serem preenchidas neste campo de estudo. Huber e Cannon (2002), em seu estudo desenvolvido na bacia experimental de Portland – EUA, concluíram que quase 50% da vazão de pico poderia ser reduzida com a desconexão das áreas impermeáveis. Sohn, Kim e Li (2015) estimaram, em aproximadamente 52%, a área que poderia ser desconectada na bacia estudada, o que mostra que o conceito de microdrenagem vigente em todo mundo está desatualizado, podendo este escopo ser um grande aliado para a resolução de problemas maiores de drenagem.

Figura 8 - Conceituação atual de diminuição de áreas efetivamente impermeáveis



Fonte: (GUO, 2013) adaptado.

3.2 Modelos

Um sistema real apresenta uma quantidade muito grande de situações demasiadamente complexas para serem representadas na íntegra. Por isso, os modelos são sistemas que visam considerar apenas as variáveis necessárias para a solução de um dado problema. As características primordiais de um sistema são (PORTO *et al*, 2002):

- A precisão, ou seja, o alinhamento com a situação real;
- A simplicidade, tanto quanto possível, inserindo no modelo apenas as variáveis essenciais;
- A robustez, que é a capacidade do modelo trabalhar com diferentes panoramas, no caso dos dados de calibração serem diferentes dos eventos posteriores;
- Transparência, ou seja, prover ao operador a flexibilidade de operação para eventuais testes para diversos cenários;

- Adequação: apresentar um layout e organização de informações de forma funcional e de fácil entendimento.

3.2.1 Equação de Saint-Venant

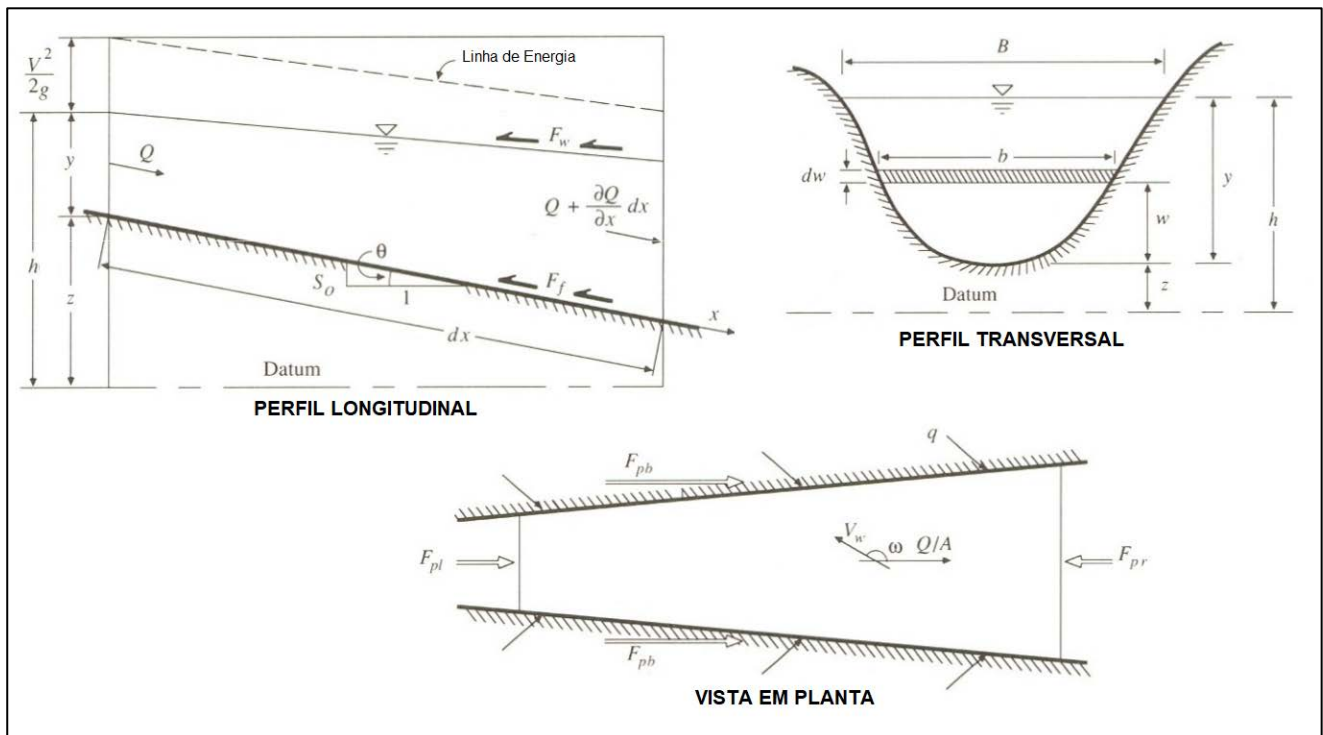
Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant (1797-1886) foi um dos grandes nomes da hidráulica, tendo como principais áreas de atuação a mecânica dos fluidos, hidrostática e hidrodinâmica. Diversos de seus trabalhos representaram marcos no entendimento e no avanço da hidráulica como a correta derivação das equações de Navier-Stokes para canais com superfícies livres.

A Equação de Saint-Venant em uma dimensão representa de maneira satisfatória grande parte dos fenômenos de escoamento em canais naturais, artificiais e galerias, daí sua importância para este trabalho. O desenvolvimento da equação parte de algumas hipóteses:

- I. O fluxo é unidimensional. Do ponto de vista teórico, o fluxo se dá em três dimensões, porém, em muitas situações cotidianas, as componentes estão primordialmente em uma dimensão;
- II. O fluxo varia de maneira gradual, de modo que a distribuição é predominantemente hidrostática e não há aceleração vertical;
- III. A declividade de fundo é pequena, de forma que a tangente do ângulo α se confunde com o valor do próprio α , sendo α a inclinação do fundo do canal.
- IV. Não há alteração da declividade de fundo ao longo do tempo;
- V. As equações de resistência de Manning e Chezy podem ser utilizadas para a obtenção da declividade da linha de energia;
- VI. O fluido é incompressível, sendo, portanto, a massa específica constante;
- VII. Sem contribuição de vazões laterais.

Consideraremos um Volume de controle como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Volume de Controle para o desenvolvimento da equação de Saint-Venant



Fonte: Elaboração do autor.

Na qual Q é a vazão, S_0 é a declividade de fundo, S_f a inclinação da linha de energia, V é a velocidade, F_f é a força de fricção e F_p a força de pressão.

Parte-se do teorema de transporte de Reynolds, que representa a variação de uma propriedade extensiva N ao longo de um volume de controle representado pela equação 2.

$$\frac{DN_{sist}}{Dt} = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\eta) dV + \int_{SC} (\rho\eta)\vec{v}_s \cdot \hat{n} dA \quad (2)$$

Onde η é a grandeza intensiva, V_s é a velocidade e \hat{n} o vetor normal.

Simplificando a equação 2 e utilizando a propriedade extensiva da massa, considerando-a sempre constante, obtêm-se a equação 3, denominada equação da conservação da massa.

$$0 = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{v}_s \cdot \hat{n} dA \quad (3)$$

Resolvendo e admitindo a massa específica constante (Hipótese VI) temos:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

Utilizando novamente o teorema de transporte de Reynolds (eq. 2), mas agora utilizando a grandeza extensiva quantidade de movimento, portanto a grandeza intensiva seria a velocidade, temos:

$$\sum \vec{F} = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v}_s dV + \int_{SC} \rho \vec{v}_s (\vec{v}_s \cdot \hat{n}) dA \quad (5)$$

Onde F são todas as forças atuantes no Volume de Controle.

Para o fluxo em canais abertos existem cinco diferentes forças atuando no volume de controle, são elas:

- F_g – Força peso da massa d'água (diretamente relacionada com a gravidade);
- F_p – Força de pressão (admite-se, neste caso, distribuição hidrostática, ou seja, triangular);
- F_f – Força de fricção (Atrito causado pelo fundo e bordas do canal);
- F_e – Força de expansão (Força oriunda da turbulência causada por mudanças bruscas na seção do canal) [Será desprezada nesta demonstração (Hipótese II)];
- F_w – Força cisalhante do vento (Será desprezada nesta análise, pois são mais importantes em longas superfícies expostas à interface água/ar, como em represas)

Portanto, resolvendo a equação 5 com as devidas simplificações e sendo:

$$\sum \vec{F} = F_g + F_p + F_f \quad (6)$$

Temos:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (7)$$

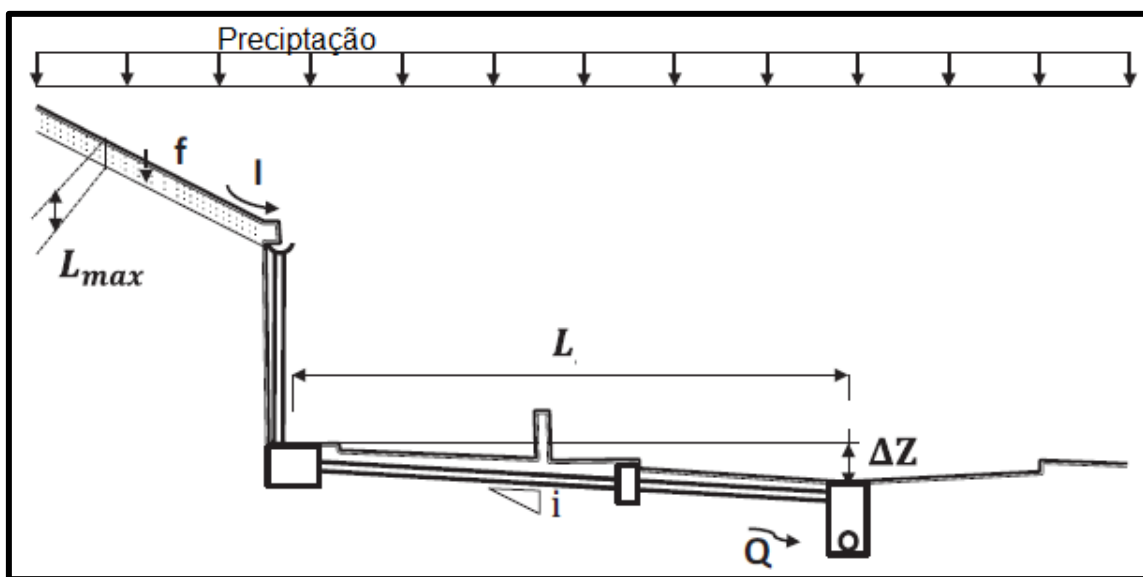
Portanto, as equações 4 e 7 constituem o alicerce da representação do fenômeno de escoamento em superfícies livres, podendo os termos da equação 7 serem entendidos como:

- $\frac{\partial Q}{\partial t}$ é a aceleração local, ou seja, a aceleração que aquele corpo está sofrendo em um local específico ao longo do tempo;
- $\frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x}$ é a aceleração convectiva, ou seja, é a aceleração que uma partícula ganha ou perde ao longo do seu caminho;
- $\frac{\partial y}{\partial x}$ é a parcela referente à diferença das forças de pressão no decorrer do volume de controle;
- S_0 é a representação da força motriz da gravidade, traduzida pelo peso do corpo d'água;
- S_f é a força de atrito, que representa a energia dissipada devido à resistência das bordas e do fundo (Podem ser representadas pelas equações de Manning e Chézy)

3.2.2 Modelos de Escoamento

O escoamento da água em áreas urbanas é totalmente diferente dos que ocorrem em bacias naturais, devido principalmente às alterações nos fluxos feitos pelo homem (Meios-fios, Galerias, telhados e calhas), gerando uma rede extremamente complexa de interações entre esses sistemas. A Figura 10 representa, de maneira simplificada, a dinâmica geral do escoamento da água em bacias urbanas. (LEANDRO; SCHUMANN; PFISTER, 2016)

Figura 10 - Conceituação física do escoamento em bacias urbanas



Fonte: (LEANDRO; SCHUMANN; PFISTER, 2016)

Nota-se, a partir da ilustração acima, que existem diferentes estágios do escoamento, que podem ser fragmentados e estudados em separado. É o caso do escoamento na superfície do telhado, na pista de rolamento, na área permeável das casas e nas galerias. No entanto, em geral, esses processos não seguem uma ordem cronológica; se confundindo no tempo e espaço, o que torna a modelagem do escoamento muito mais complexa.

As quedas bruscas nos caminhos, ocasionadas por obstruções, degraus, depressões, dentre outros, provocam mudanças em duas condições de contorno básicas dos modelos tradicionais: como a de pequenas declividades, pois as quedas livres fazem o fluxo atingir declividades máximas; e a de pressão hidrostática devida ao regime turbulento do escoamento e não paralelismo das

linhas de correntes (CEA; PUERTAS; VÁZQUEZ-CENDÓN, 2007). Esses bloqueios podem causar também perdas de cargas localizadas e mudanças na direção do fluxo (LEANDRO; SCHUMANN; PFISTER, 2016).

Os edifícios provocam ao escoamento caminhos preferenciais, porém, tais estruturas são difíceis de representar em um Modelo Digital de Terreno (MDE) contínuo; portanto, é rotineiro lançar mão de artifícios para representar tal situação como, por exemplo, aumentar o valor da rugosidade em locais de interesse, criando um platô no MDE referente ao edifício, ou, em uma simulação em duas dimensões, retirar ou considerar como bloco os edifícios. (VOJINOVIC *et al.*, 2011) (LEANDRO; SCHUMANN; PFISTER, 2016). Atualmente, algumas abordagens vêm sendo desenvolvidas para modelar esse tipo de escoamento (CHANG; WANG; CHEN, 2015).

Com o passar dos anos, os modelos de escoamento para retratar o fluxo da água em ambientes urbanos estão se tornando cada vez mais sofisticados, a fim de retratar com mais fidedignidade as complexidades já explicitadas acima. A abordagem mais simples, em termos hidráulicos, é considerar apenas o fluxo unidimensional nas galerias de águas pluviais, muitas vezes modelado via equação de Saint Venant, conforme visto na seção 0 (VOJINOVIC *et al.*, 2011) (CHANG; WANG; CHEN, 2015) (VOJINOVIC; TUTULIC, 2009), utilizando, para a aproximação do hidrograma de entrada nas galerias, métodos hidrológicos que veremos no decorrer do texto.

Para modelar de maneira mais fiel o escoamento superficial (telhado, calha, pista de rolamento, calçadas, micro drenagem do lote e refluxo da água em bueiros) foram, paulatinamente, surgindo novas abordagens de equacionamentos considerando duas dimensões, cada qual com um nível de aprimoramento e complexidade matemática, fundamentalmente representada pela equação de Navier-Stokes, simplificada pelo fato da dimensão em altura ser muito menor que a largura e comprimento, ou seja, equação de Saint Venant estendida para duas dimensões, que muitas vezes é denominada de Equação de fluxo de águas superficiais em 2D (SCHMITT; THOMAS; ETTRICH, 2004) (CHANG; WANG; CHEN, 2015)(HILDEN,2003). As simplificações destas equações são basicamente as mesmas das equações de Saint Venant, apresentadas na equação 8:

$$\frac{dH}{dt} + \frac{dE}{dx} + \frac{dG}{dy} = S \quad (8)$$

$$H = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + gh^2/2 \end{pmatrix}, S = \begin{pmatrix} 0 \\ ghS_{ox} \\ ghS_{ox} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ ghS_{fx} \\ ghS_{fx} \end{pmatrix}$$

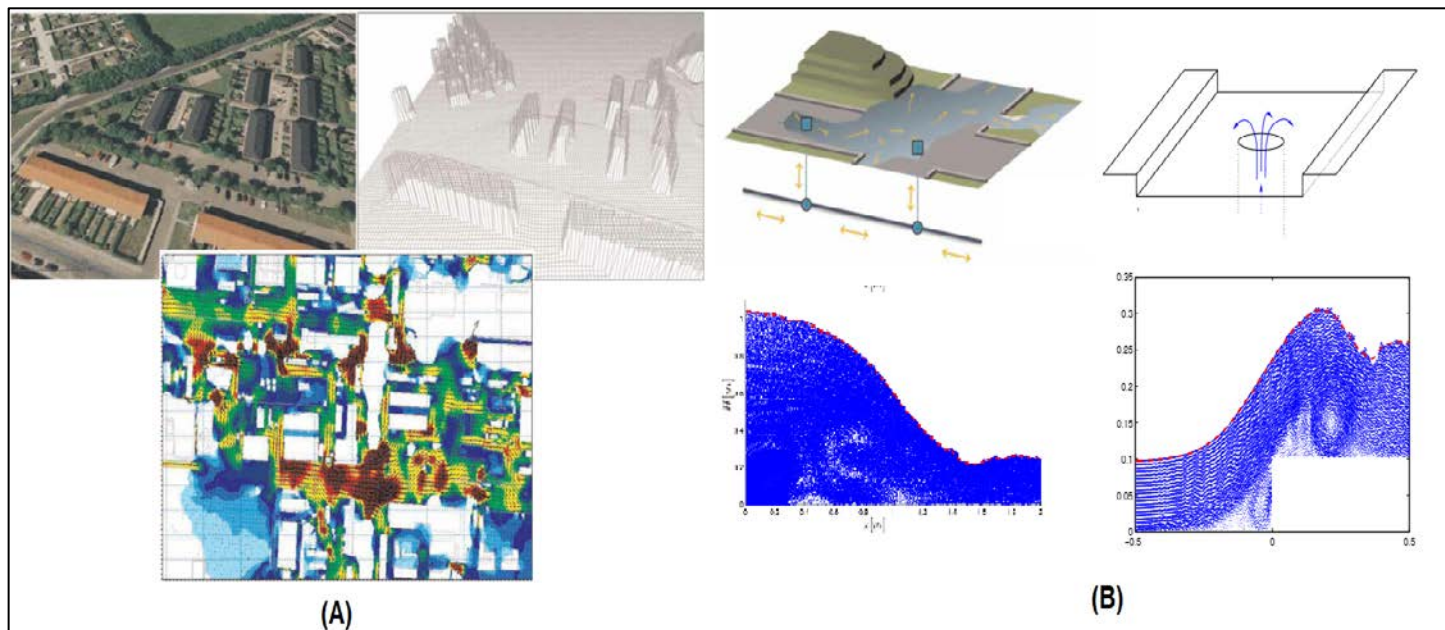
Em que h é a altura da lamina d'água, u e v são as componentes da velocidade nas direções x e y , S_o é a declividade de fundo e S_f é a declividade de linha de energia.

Nota-se que a equação 8 é muito semelhante à equação 7 quando apresentada no binômio velocidade e lâmina d' água. Obviamente que o maior número de incógnitas levará a métodos de soluções mais sofisticados.

Para a correta utilização dos modelos de equações mais avançados, a resolução na representação do relevo figura como importante ferramenta, sendo que, pequenas mudanças na resolução espacial do modelo digital de elevação levam a alterações significativas no resultado final (ALMEIDA; BATES; OZDEMIR, 2016). Atualmente, com a ajuda de técnicas como o LiDAR (FEWTRELL *et al.*, 2011) e a fotogrametria, avanços significativos tem sido implementados na obtenção desses moldes, principalmente em grandes cidades de países desenvolvidos (ABILY *et al.* 2016); porém, no Brasil e em outros países em desenvolvimento, tais práticas ainda não apresentam perspectivas para a integração e a inserção no estado de técnica.

Alguns exemplos de estudos que incorporam modelagens matemáticas mais sofisticadas a problemas de escoamento superficial de áreas urbanas são: Modelagem do escoamento na sub-bacia, considerando as interferências das construções (SALVAN *et al.*, 2016), em que se utiliza o modelo de Saint Venant 2D, e modelagem de alagamentos em bueiros e afogamento do meio fio (HILDEN, 2003), na qual foram utilizadas as equações verticais de Saint Venant 2D, ou seja, substituindo-se a dimensão y pela dimensão z e as equações de Navier Stokes 2D que não consideram as condições de contorno do modelo anterior. A Figura 11 ilustra os três casos descritos anteriormente.

Figura 11 - Problemas Típicos na Modelagem do Escoamento Urbano (A) - Fluxo nas Ruas (B) - Alagamento em bueiros e Meio Fio



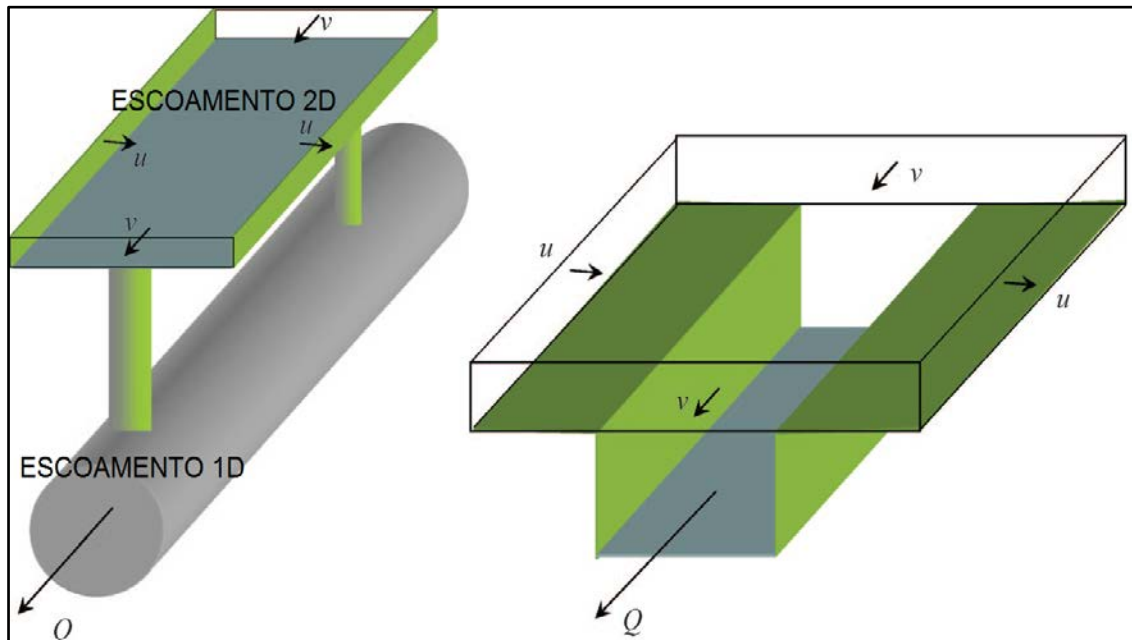
Fonte: Elaboração do autor.

É importante destacar que além dos modelos hidráulicos existem os modelos hidrológicos, que não consideram as equações padrões de conservação de massa e momento, porém buscam, por meio de uma série de parâmetros, representar as características e processos físicos da bacia (SANTOS, 2009). Dentre esses modelos, o modelo de Muskingum, proposto inicialmente por McCarthy em 1939 (TUCCI, 2009), é o mais amplamente utilizado. Tal método foi sofrendo aprimoramentos ao longo do tempo, a fim de corrigir erros conceituais no equacionamento. O modelo Muskingum-Cunge adicionou ao método a garantia da contribuição lateral (CUNGE, 1969), e o Muskingum-Cunge-Todini garantiu conservação da massa no sistema (TODINI, 2007). Outros modelos hidrológicos são amplamente utilizados na hidrologia urbana, como o hidrograma unitário e o modelo da onda cinemática.

É essencial discutir que esse último tipo de abordagem tem como único objetivo adquirir um hidrograma em algum ponto da área estudada e não faz uma avaliação discreta de todos os componentes físicos do sistema (sargetas, bueiros, áreas de alagamento).

A Figura 12 mostra, de maneira simplificada, qual a tendência atual para a representação do escoamento em áreas urbanas, com duas situações bem definidas (escoamento em 1D e 2D).

Figura 12 - Modelo Conceitual do escoamento em bacias urbanas



Fonte: Adaptado (VOJINOVIC; TUTULIC, 2009).

3.3 O Modelo “Storm Water Management Model” (SWMM)

Existem duas modalidades de softwares para sistemas de drenagem urbana: os comerciais e os livres, ou, “*open source*”. Como em qualquer outra modalidade de softwares de engenharia, a primeira classe apresenta mais recursos, interfaces gráficas intuitivas e são mais amplamente conhecidas no meio industrial. A segunda categoria se destaca no âmbito educacional e de pesquisa, uma vez que apresentam código fonte aberto, possibilitando alterações no processamento pelos pesquisadores, gerando assim avanços na modelagem física e matemática do problema, além de serem grátis, evitando gastos demasiadamente altos. (RIAÑO-BRICEÑO *et al.*, 2016).

Exemplos de softwares comerciais são o CivilStorm, InfoWorks CS, MOUSE, MIKE, PCSWMM, SewerCAD, SOBEK-Urban, MicroDrainag e SIMBA. Dentre os de código aberto se destacam CITY DRAIN® (ACHLEITNER;

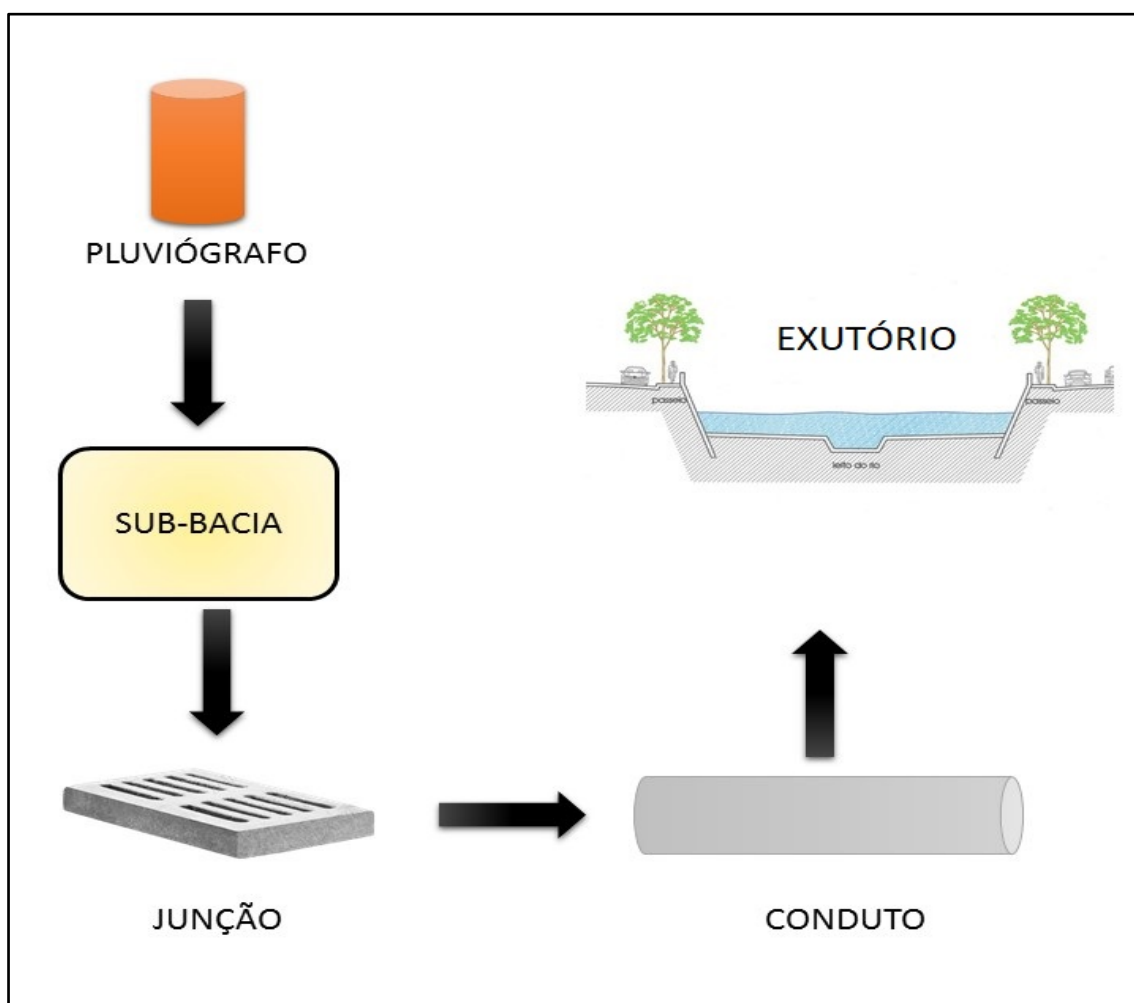
MÖDERL; RAUCH, 2007) e o SWMM, algoritmo desenvolvido pela agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, sendo o software aberto mais amplamente difundido no meio (ROSSMAN, 2015).

O CITY DRAIN® foi desenvolvido na plataforma Matlab/Simulink© e faz o cálculo da propagação do fluxo por meio de métodos hidrológicos e não hidráulicos, no caso, o método de Muskingum tradicional. Já o SWMM é escrito em linguagem C e introduz uma solução hidráulica no equacionamento do fluxo em condutos, modelada pela equação de Saint-Venant 1D e aplica o modelo da onda cinemática no escoamento da sub-bacia.

O SWMM é amplamente aplicado no contexto da hidrologia urbana, tendo diversas frentes de trabalho. O software é utilizado na análise de qualidade e quantidade de água (CAMBEZ; PINHO; DAVID, 2008), análise da eficiência de dispositivos de baixo impacto (CIPOLLA; MAGLIONICO; STOJKOV, 2016), análise de riscos para inundação (ZHU *et al.* 2016), sistema de decisão baseado em análise multi-objetos (RIAÑO-BRICEÑO *et al.* 2016), entre outros. É importante ressaltar que, além da grande gama de trabalhos, estes apresentam diversas evoluções no algoritmo do programa como, por exemplo, métodos de calibração alternativos (FORMIGA *et al.* 2016) e métodos de cálculos que possibilitam a utilização de dois processadores em paralelo (BURGER *et al.* 2014), o que faz com que o programa acompanhe o desenvolvimento acadêmico.

As partes fundamentais do modelo conceitual utilizado pelo SWMM estão ilustradas na Figura 13. Algumas funções adjacentes não estão expostas na figura, porém, o software é munido de vários outros tipos de ferramentas, todas explicitadas na Tabela 1.

Figura 13 - Modelo Conceitual Fundamental do SWMM



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 1 - Tipos de Módulos Disponíveis no SWMM

Categoria	Tipo de Módulo	Descrição
Hidrológicos	Pluviógrafo	Fonte dos dados de precipitação para as sub-bacias
	Sub-Bacias	Uma parcela do solo que recebe a precipitação e gera um escoamento superficial levando essa massa até o sistema de drenagem (Via Nó) ou para outra sub-bacia
	Aquíferos	Uma área sub-superficial que recebe da infiltração da sub-bacia acima e realiza troca de fluxos com um ou vários nós
	Acúmulo de neve	Neve acumulada nas sub-bacias

Categoria	Tipo de Módulo	Descrição
Hidráulicos	Hidrograma Unitário	Uma função de resposta que descreve a quantidade de fluxo em relação ao tempo que é gerado por meio de uma unidade de chuva
	Junção	Um ponto no sistema em que os condutos se juntam com volume de armazenamento insignificante (Bueiros, conexões)
	Exutório	O ponto final do sistema onde a água descarrega em um corpo receptor (outro sistema, unidade de tratamento de água, rio) com lamina d'água conhecida
	Divisor	Um ponto no sistema onde o afluente se divide em dois condutos por meio de uma função conhecida
	Unidades de armazenamento	Lagos, represas ou tanques destinados ao armazenamento da água
	Conduto	Um canal ou conduto que transporta água de um nó para o outro
	Bomba	Dispositivo que eleva a energia do sistema
	Regulador	Um estrangulador, orifício ou saída usado para direccionar e regular o fluxo entre dois nós do sistema de transporte.
Qualidade de Água	Poluente	Contaminante que pode acumular na sub-bacia e posteriormente lixiviado pela topografia ou ser introduzido diretamente no sistema
	Uso do solo	Uma classificação usada para determinar a função de acumulo de poluentes
Tratamento	Controle de LID*	Dispositivos de baixo impacto, como uma célula de bioretenção, pavimento poroso, usados para reduzir o escoamento superficial através do aumento da infiltração
	Função de Tratamento	Uma função definida pelo usuário que descreve como a concentração do poluente é reduzida em um nó como função de certas variáveis (Concentração, vazão, nível d'agua)

Categoria	Tipo de Módulo	Descrição
Objetos de dados	Curva	Uma função tabular que define a relação entre duas grandezas (Vazão e carga hidráulica da bomba, área da superfície e profundidade, etc.)
	Série Temporal	Uma função tabular que define como uma grandeza varia com o tempo (Precipitação, elevação, nível do exutório, etc)
	Padrão temporal	Um conjunto de fatores que se repete ao longo de um período de tempo (por exemplo, padrão horário diurno, padrão diário semanal, etc.)
	Regras de Controle	Funções que determinam quando determinadas ações de controle serão tomadas (Ligar ou desligar uma bomba, quando a lamina d'água estiver acima ou abaixo de um dado valor)

Fonte: (ROSSMAN; HUBER, 2016)

*LID: *Low impact Development*, em uma tradução literal desenvolvimento de baixo impacto.

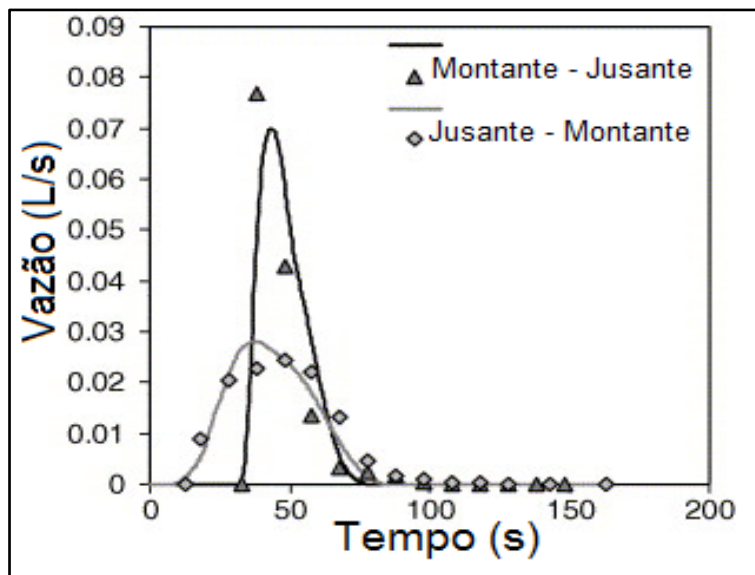
3.3.1 Precipitação

Como exposto na Tabela 1, o input de água do sistema é dado de forma discreta, podendo selecionar apenas uma estação pluviométrica por sub-bacia, se aproximando então de um método de Thiessen, porém, como dito na seção 3.1.1, é necessária uma alta variabilidade espacial para uma representação significativa, portanto, um artifício que pode ser utilizado é estabelecer pluviômetros intermediários para representar essa variação, atribuindo pesos relativos à distância dos pluviógrafos vizinhos.

Outro ponto importante, na caracterização da variação espacial da chuva, é ter uma rede de pluviógrafos bem distribuída espacialmente, capaz de conseguir captar o movimento da chuva. Tal informação é extremamente importante em bacias urbanas, sendo grande fonte de erro em modelos que não a consideram (NIEMCZYNOWICZ, 1988). É amplamente conhecido que se a precipitação se movimentar da montante para jusante isso causará um aumento

do pico do hidrograma (SINGH, 2002) (NUNES *et al.*, 2006). A Figura 14 ilustra a diferença de resposta da bacia em relação à variação espacial das chuvas.

Figura 14 - Diferenças dos Hidrogramas de acordo com o Movimento da Chuva.

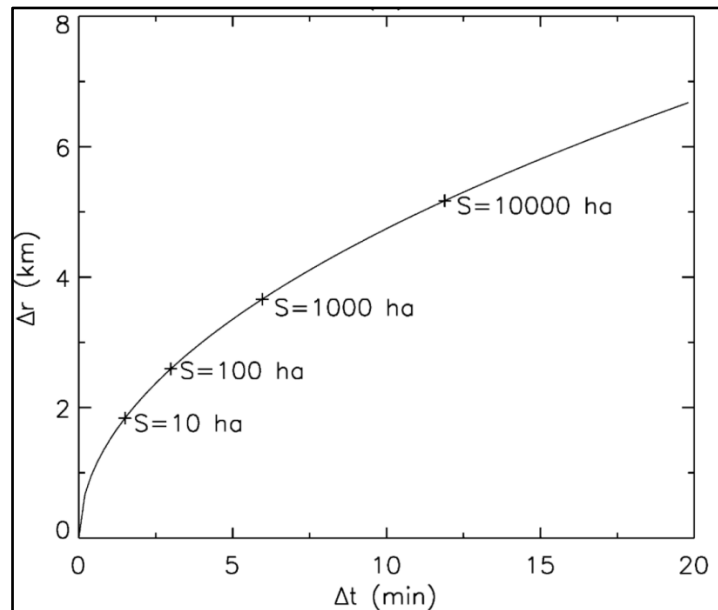


Fonte:(NUNES *et al.*, 2006)

É conhecida também a importância, mesmo em bacias urbanas muito pequenas, da existência de pluviógrafo dentro da mesma, já sendo noticiados erros significativos na simulação caso a fonte de dados seja externa à bacia (NIEMI *et al.*, 2017).

Berne *et al.* (2004) desenvolveram um trabalho em que o objetivo era encontrar uma resolução, tanto espacial como temporal, para as medições de chuva em bacias urbanas. Ficou constatado que o tamanho da bacia era inversamente proporcional à resolução exigida, como mostra a Figura 15

Figura 15 - Resolução Espaço temporal exigida para pluviógrafos em bacias urbanas



Fonte: (BERNE *et al.*, 2004)

Ochoa-Rodriguez *et al.* (2015) verificaram que a sensibilidade à resolução espacial da chuva é muito alta em bacias urbanas; e observaram uma leve diminuição quando a área é menor que 1 km². Outro ponto verificado foi a maior influência da resolução temporal em detrimento da resolução espacial. Os autores recomendam que para bacias urbanas não se tenha uma resolução inferior à 3km e 5 min.

A resolução da medida de precipitação adequada a uma bacia urbana ainda é um tema muito divergente na literatura, alguns estudos estão sendo desenvolvidos ultimamente; porém, ainda há muito que entender nesta área. De uma maneira geral, a recomendação para áreas de drenagem maiores que 100 ha (que é o caso da bacia em estudo) é a de que não sejam maiores que 1 km e 5 minutos. (CRISTIANO; VELDHUIS; GIESEN, 2017)

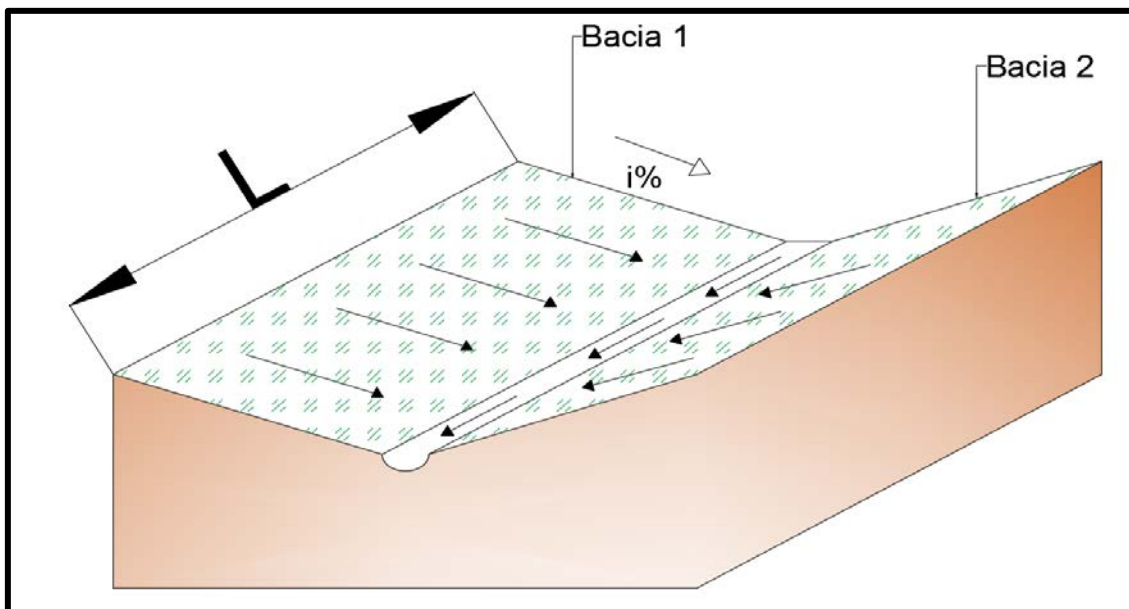
3.3.2 Escoamento Superficial

O SWMM considera uma bacia retangular com declividade i constante e largura L que drena sua água para um canal retangular central no meio da bacia

conforme a Figura 16. O método de cálculo do escoamento é dado por meio do Modelo de reservatório não-linear conforme mostra a Fonte: Elaboração do autor.

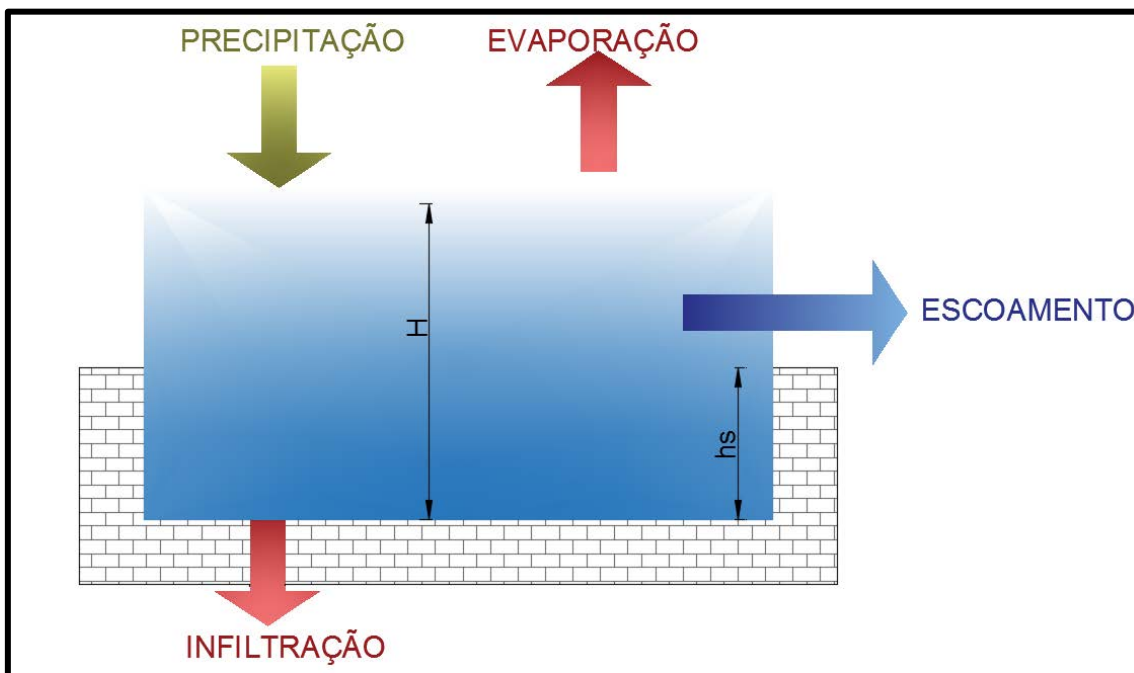
Figura 17.

Figura 16 - Modelo Conceitual da Sub-bacia no SWMM



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 17 - Modelo de reservatório não linear de uma Sub-Bacia



Fonte: Elaboração do autor.

No modelo conceitual da Fonte: Elaboração do autor.

Figura 17, a entrada do sistema é dada via precipitação (e degelo quando for o caso). As saídas são por evaporação e infiltração, a lâmina total de água é representada pela lâmina H e a água armazenada permanentemente na sub-bacia (poças, interceptação foliar e de elementos construtivos) é representada pela lâmina hs , toda água que está acima da profundidade hs é então escoada. Considerando o sistema com largura linear, temos, da conservação de massa, a equação diferencial 9:

$$\frac{dH}{dt} = p - e - i - q \quad (9)$$

Em que p é a taxa de precipitação, e a taxa evaporação, i a taxa infiltração e q a taxa de vazão escoada, todas com unidade (M/S). Assumindo da Figura 16 que a vazão da bacia é uniforme no canal retangular central, com largura L , altura d - ds e inclinação $i\%$, a equação de Manning pode ser usada para o domínio no volume conforme equação 10.

$$Q = \frac{1}{n} i\%^{1/2} R h^{2/3} A \quad (10)$$

Onde Q é a vazão, Rh é o Raio Hidráulico e A é a área e n é o coeficiente de rugosidade. Como L será sempre muito maior que $(H-hs)$, pode-se aproximar: $A=L \times (H-hs)$ e $Rh= H-hs$. Substituindo na equação 10 têm-se:

$$Q = \frac{1}{n} i\%^{1/2} \times L \times (H - hs)^{5/3} \quad (11)$$

Obtendo então a equação 11 modificando a unidade por vazão por área (dividindo pela área da bacia):

$$q = \frac{L \times i\%^{1/2}}{A \times n} \times (H - hs)^{5/3} = \alpha \times (H - hs)^{5/3} \quad , \text{ onde, } \alpha = \frac{L \times i\%^{1/2}}{A \times n} \quad (12)$$

Substituindo a equação 12 na equação 9:

$$\frac{dH}{dt} = p - e - i - \alpha \times (H - hs)^{5/3} \quad (13)$$

Da equação 13, os parâmetros p , e , i e h_s são parâmetros iniciais do projeto informado pelo operador; α pode ser calculado, de modo que possa ser calculada a lâmina H para todo passo de tempo, desde que H seja maior que h_s .

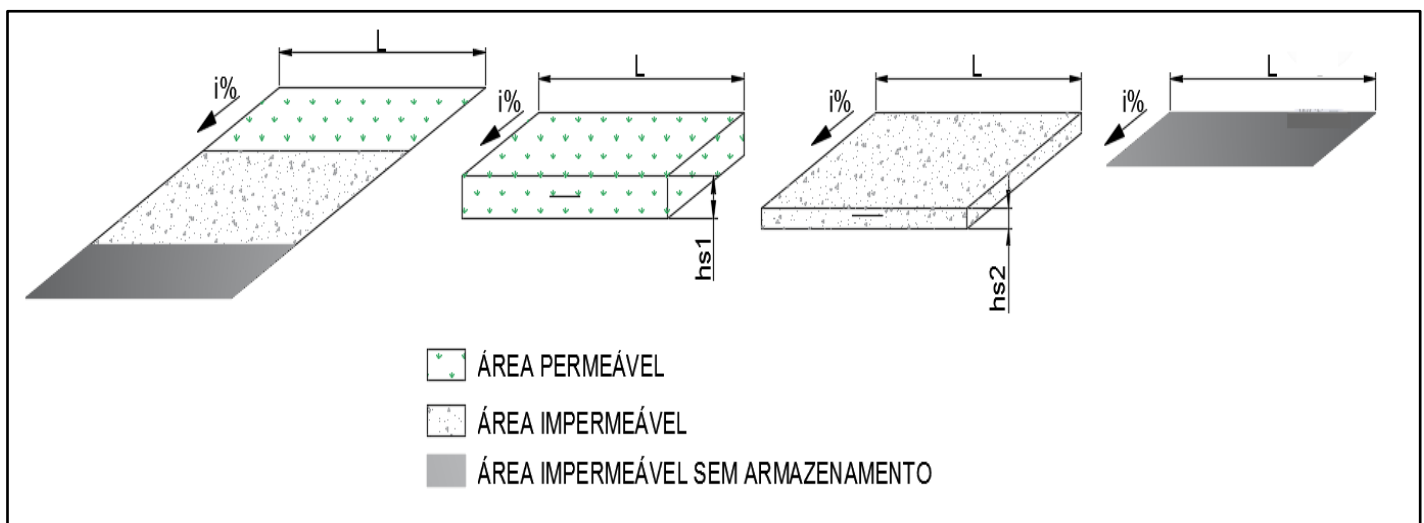
A sub-bacia será dividida em três áreas, nas quais será resolvida a equação 13 de maneira independente para cada passo de tempo; são elas: impermeável com armazenamento, impermeável sem armazenamento e permeável. O modelo considera a mesma precipitação para as três áreas; a taxa de infiltração para as áreas impermeáveis será sempre zero, poderão ser estipuladas diferentes alturas de armazenamento, e coeficiente de rugosidade, e a largura e inclinação serão as mesmas para as três divisões. A Figura 18 ilustra a conceituação da divisão da sub-bacia.

Como discutido na seção 3.1.2, a rota do fluxo é muito importante para a representação real do escoamento. Sendo assim, Huber (2001) adicionou ao modelo três situações (Fonte: Elaboração do autor.

Figura 19) em que o operador é capaz de definir a rota do escoamento:

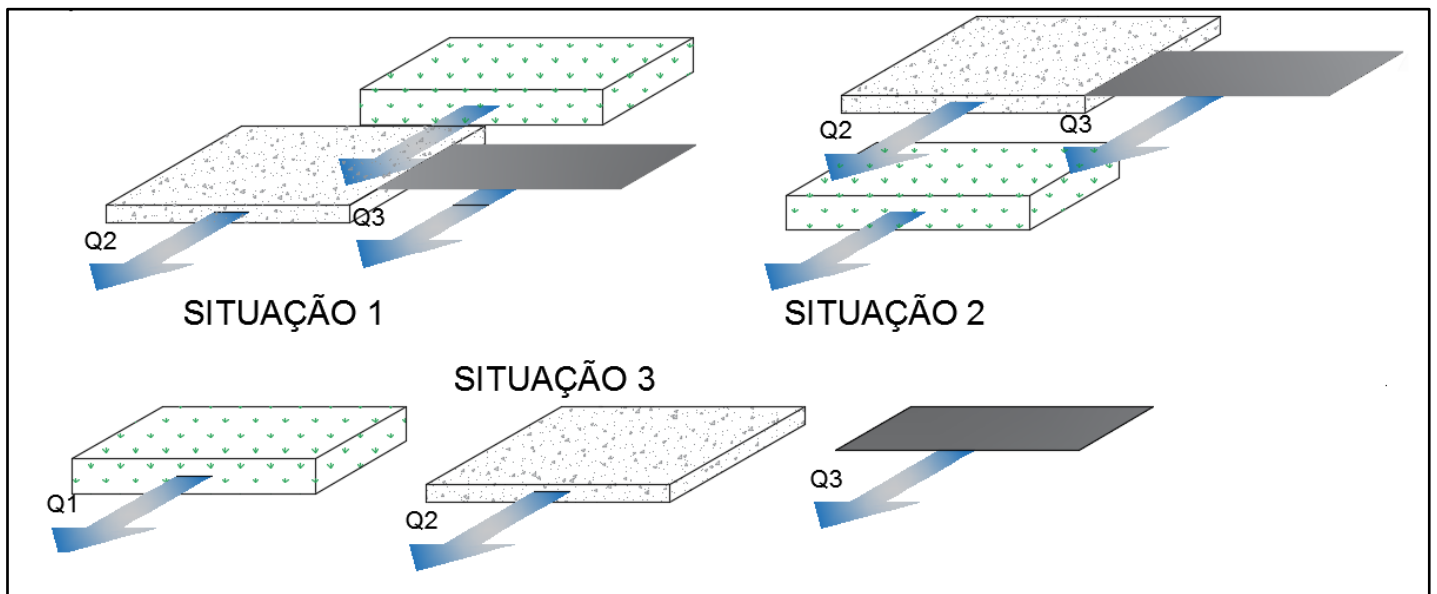
- Da área permeável para as áreas impermeáveis;
- Das áreas impermeáveis para as áreas permeáveis;
- As duas áreas escoando em paralelo.

Figura 18 - Representação da divisão das bacias no SWMM



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 19 - Tipos de Rota para o escoamento no SWMM



Fonte: Elaboração do autor.

O parâmetro largura da sub-bacia é de fundamental importância para adequar as características da bacia real ao modelo conceitual retangular, modificando o “*shape*” do hidrograma, ou seja, quanto mais estreita é a sub-bacia, maior o tempo de base da mesma (mantendo os outros parâmetros iguais).

Quando se utiliza esse modelo de escoamento para representar o escoamento superficial de uma bacia, é necessário transformar uma bacia heterogênea em seu equivalente retangular. Por muito tempo, a aproximação utilizada para transformar a bacia natural em seu equivalente retangular foi feita de maneira empírica, pela experiência dos operadores, muitas vezes sendo adotadas duas vezes o comprimento do canal (GUO e URNOBAS, 2009), porém estudos atuais apresentam uma metodologia mais sofisticada.

Guo e Urbonas (2009) desenvolveram uma abordagem que levava em consideração a energia potencial disponível para abstrair o valor da largura de uma bacia, como mostrado na equação 14:

$$L = C \times Y \quad (14)$$

Na qual L é a largura da bacia, C é a comprimento do canal principal (uma rua por exemplo) e Y é o fator de forma da bacia dada pela expressão 15.

$$Y = \frac{2X(1,5Z)(2K - X)}{(2K - 1)} \quad (15)$$

Em que X é definido como sendo a Área dividida pelo comprimento do canal principal ao quadrado (A/C^2); Z é a razão entre a maior área entre os dois lados do canal e a área total (A_m/A) e K é um valor entre 4 e 6 que, usualmente, é adotado como sendo 4.

Obviamente, a largura da bacia é um parâmetro subjetivo, que é suficientemente aproximado pela metodologia exposta anteriormente; porém não representa de maneira fiel a resposta da bacia, sendo, portanto, importante fator para a calibração.

A declividade adotada para a sub-bacia é a média das declividades presentes na mesma. O cálculo é feito por métodos computacionais que consideram uma malha em duas dimensões, calculando um valor para cada célula. Quando ocorre uma mudança visível na declividade da área, é oportuno considerar a sua discretização em duas sub-bacias, de modo que o efluente de uma seja o afluente da seguinte.

O coeficiente de rugosidade para este sistema não é uma variável fácil de determinar, como ocorre em canais bem definidos. O escoamento na superfície de áreas urbanizadas tem diversas características que dificultam a estimativa exata desse coeficiente como: transições entre regimes de escoamento, pequenas profundidades, vários tipos de solo, entre outros. Alguns estudos já foram realizados sobre o tema (ENGMAN, 1986; LARRY, 2001), contudo, não há consenso no meio científico de qual seja o mais adequado.

A rugosidade de superfícies uniformes, como asfalto, vegetação, telhados, entre outros, apresenta valores conhecidos que já foram calibrados em alguns trabalhos (KREBS *et al.*, 2014). No entanto, a sub-bacia é representada de maneira geral, de modo que não há diferenciação entre as superfícies; portanto, é necessário um valor de macro rugosidade, de difícil estimativa.

Destarte, o parâmetro de Manning é uma das principais lacunas a serem preenchidas na calibração, sendo os valores encontrados anteriormente na literatura importantes apenas para ter valores referência. Os valores padrões do software são 0,01 para áreas impermeáveis e 0,1 para áreas permeáveis; estes

valores são importantes para se ter a ordem de grandeza. Beling *et al.* (2011) encontraram valores de 0,02 a 0,05 para as áreas impermeáveis e de 0,16 à 0,45 para áreas permeáveis. Por outro lado, Temprano *et al* 2006 obtiveram valores de 0,015 e 0,40 respectivamente. Rosa, Clausen e Dietz (2015) calibraram os valores dos coeficientes de 0,011 a 0,015; e de 0,15 a 0,24. A literatura que abrange estudos sobre os valores desses parâmetros é extensa, porém, cada bacia estudada se apresenta de uma maneira.

De modo geral, o que se observa é que para estudos em bacias muito pequenas, em que se leva em consideração detalhes da superfície como a declividade de cada telhado e rota de cada lote residencial, o coeficiente de rugosidade tende a ser mais baixo; enquanto que em bacias com menos detalhamento ocorre um leve aumento neste parâmetro.

No SWMM, o armazenamento pode ser tratado como um parâmetro de calibração, ainda que pouco sensível, particularmente para ajustar os volumes de escoamento. Portanto, não se deve gastar muito tempo adquirindo valores exatos para esse parâmetro; é necessário apenas uma abstração inicial. É importante ressaltar o significado real deste parâmetro, que representa a quantidade de água perdida por evaporação e não por evaporação/infiltração; portanto, em uma área vegetada, a profundidade de armazenamento representará apenas a interceptação.

De maneira geral, a quantidade de água armazenada é uma função da declividade da bacia. Kidd (1978) propõe a equação 16 e Viessman e Lewis (2003) apresentam a equação 17:

$$hs = 0,303S^{0,49} \quad (16)$$

$$hs = 0,136 - 0,032S \quad (17)$$

Em que hs é a altura armazenada e S é a declividade da sub-bacia.

No entanto, alguns estudos que realizaram a análise com alta definição da superfície de drenagem encontraram valores diferentes de água armazenada para cada tipo de superfície; entretanto, não foi notada grande variabilidade dos resultados, que permaneceram na faixa de 1 à 10 mm. (KREBS *et al.*, 2014)

3.3.3 Infiltração

O processo de infiltração é extremamente complexo. Sua equação conceitual, a equação de Richards, é composta por uma equação diferencial parcial de solução muito trabalhosa e que requer muito processamento matemático. Foram estudadas diversas rotinas numéricas para sua solução, contudo, nenhuma apresentou baixa demanda de cálculos (; BARON; COUDIÈRE; SOCHALA, 2017; VAN DAM; FEDDES, 2000).

Destarte, ao longo do tempo, foram estabelecidos métodos mais simples que aproximam a solução, e representam o fenômeno de infiltração com precisão suficiente para diversos tipos de estudos, dentre eles, o proposto neste trabalho. Não existe um consenso em relação a qual seria o melhor método, sendo que, grande parte deles apresenta resultados satisfatórios (CHAHINIAN *et al.*, 2005). A Tabela 2 expõe a fundamentação dos quatro métodos disponíveis no SWMM para o cálculo de infiltração.

Muitas vezes, na aplicação dos modelos em hidrologia urbana, a parcela da infiltração é negligenciada devido à grande parcela de área impermeável e conseqüente baixa infiltração. Porém, alguns estudos indicam que a consideração da infiltração no modelo é de essencial importância, adequando melhor os resultados obtidos ao observado. (COURTY; RICO-RAMIREZ; PEDROZO-ACUNA, 2017).

Outra peculiaridade que deve ser estudada é a compactação do solo nas áreas permeáveis urbanas. Esta ponderação tem que ser feita, principalmente quando se fala em medidas não estruturais para controle de cheia. O uso do solo nas cidades faz com que, paulatinamente, o solo venha a se compactar e, em conseqüência, diminuir a sua capacidade de infiltração, o que foi constatado no trabalho realizado por Gregory *et al.* (2006) onde foi verificada uma diminuição significativa da taxa de infiltração, dependendo da quantidade de energia disponível.

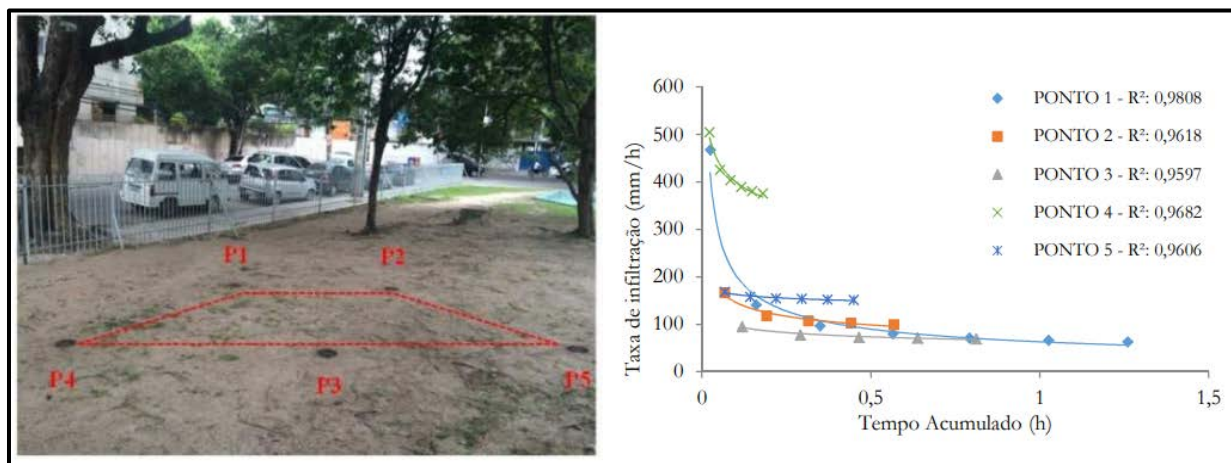
Tabela 2 - Métodos de cálculos de infiltração utilizado no SWMM

Método	Equação	Natureza	Parâmetros	Observações
Horton (1933)	$f_p(t) = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty})e^{-k_d t}$	Empírica	f_p =Taxa de Infiltração ; f_{∞} = Taxa de infiltração do solo saturado; f_0 =Taxa de Infiltração Máxima; K_d = Coeficiente de decaimento	A equação mais conhecida dentre os modelos de infiltração, possui vasta literatura sobre os parâmetros iniciais. É possível realizar ensaios de campo para adquirir os parâmetros
Akan e Houghtalen, 2003)	Idem Horton	Empírica	Idem Horton	Método de Horton Modificado para chuvas de baixa intensidade
Green-Ampt Method (1911)	$f_p(t) = K_s \left[1 + \frac{\psi_s \theta_d}{F} \right]$	Física	K_s =Condutividade Hidráulica; Ψ_s = Carga de Sucção; θ_d =Deficit de Umidade	Lança mão das leis da física (como a de Darcy e sucção capilar) para descrever o fenômeno.
Curve Number Method	$Q = \frac{P^2}{P + S_{max}}$	Empírica	Q = Altura de água escoada; P = Altura Precipitada; S_{max} = Capacidade de armazenamento do solo	Método muito conhecido, com ampla literatura. O método prevê a vazão escoada em detrimento do tipo de solo e precipitação

Fonte: Elaboração do autor.

A correlação espacial entre as características do solo é extremamente baixa, sua heterogeneidade e diversos fatores intervenientes implicam em uma mudança total das características do solo em uma pequena distância. Um exemplo claro desta baixa correlação foi o trabalho de Silva Junior *et al.* (2017) que, em testes de infiltrômetro de simples anel realizados a poucos metros de distância, não foi observada nenhuma semelhança entre os dados, conforme mostra a Figura 20.

Figura 20 - Correlação espacial das características de infiltração do Solo.



Fonte: (SILVA JUNIOR *et al.*, 2017)

A variabilidade do solo, assim como diversas representações de fenômenos naturais, pode ser representada por meio da distribuição estatística atrelada a sua coordenada. Neste escopo, a geociência pode agregar valor ao estudo da correlação espacial entre estas características, sendo, em diversos estudos, utilizadas técnicas de krigagem para a verificação da correlação espacial.

Vleira, Nlfisen e Blggar (1981) promoveram 1280 testes de infiltração em uma área de 55 metros de largura por 160 de comprimento e verificaram que a correlação espacial da infiltração naqueles pontos era de no máximo 100 metros. Loague e Gander (1990), por sua vez, executaram 157 testes de infiltração em uma bacia de 0.1 km², constatando também o alcance máximo da dependência espacial em torno de 100m.

3.3.4 Sensibilidade

A sensibilidade de cada parâmetro é um fator que deverá ser bem entendido, pois a calibração será função de cada uma dessas alterações. Vários autores fazem um resumo da sensibilidade de cada variável, ao mesmo tempo em que verificam a forma como cada variável se comporta.

Segundo Zaghloul (1983), a sensibilidade da infiltração é mais perceptível quanto menor a porção impermeável, variando mais o volume escoado do que o

pico de vazão. O mesmo efeito foi percebido na altura de armazenamento. Em relação à inclinação, notou-se um comportamento interessante: em áreas mais planas (declividades menores que 1%), a sensibilidade é muito maior do que em áreas menos planas. Comportamento semelhante foi constatado por KREBS *et al.*, 2014. O valor da rugosidade, assim como o comprimento da bacia, influem muito na forma do hidrograma. Foi constatado também que a porcentagem de área impermeável é um parâmetro extremamente sensível, principalmente em relação ao volume escoado e ao pico do hidrograma.

Tabela 3 - Sensibilidade do Hidrograma para os parâmetros do escoamento superficial.

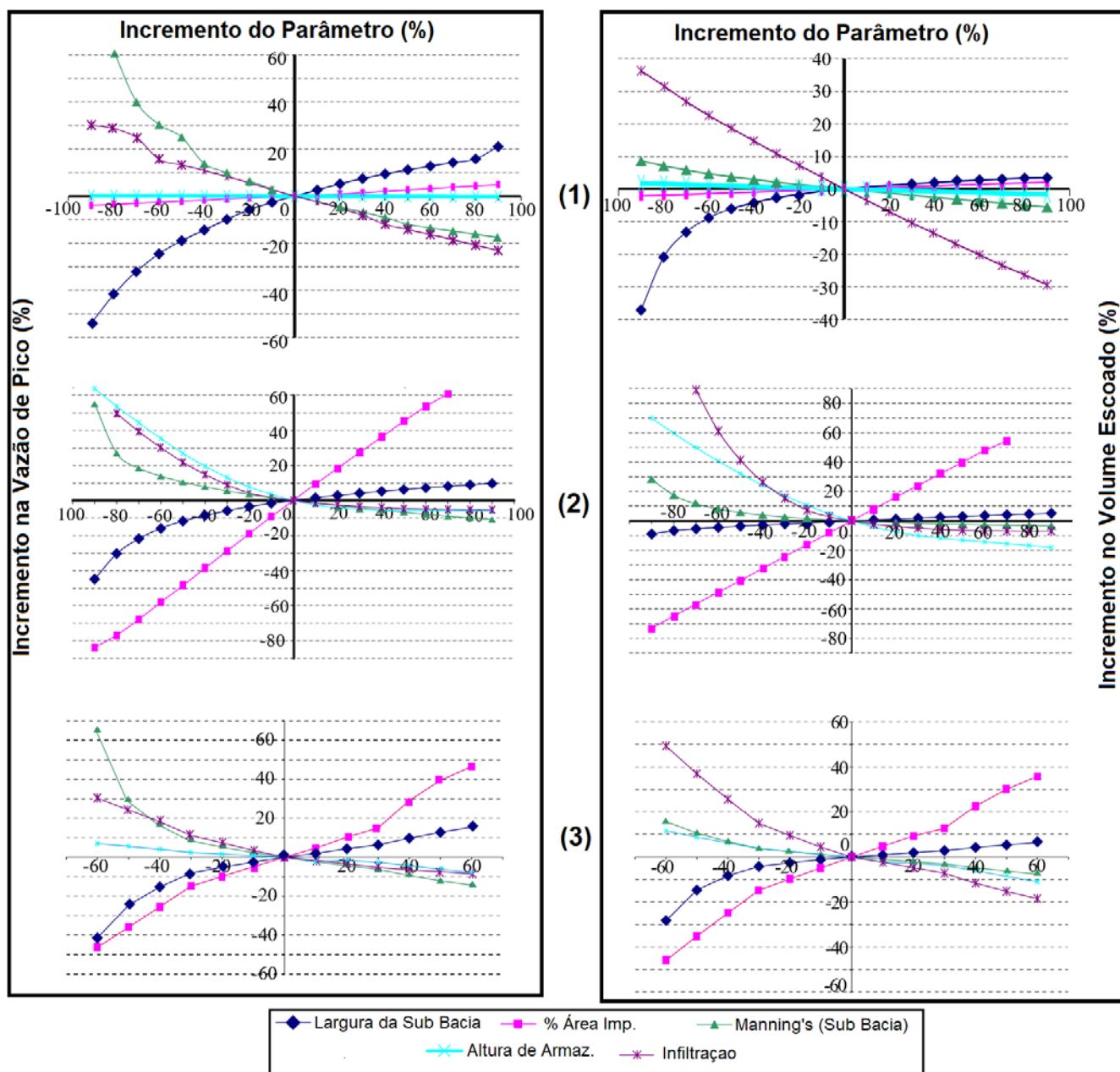
<i>Parâmetro</i>	Efeito no Hidrograma	Efeito do Aumento no volume escoado	Efeito do Aumento no pico de vazão	Observações
Área	Significante	Aumenta	Aumenta	O efeito diminui à medida em que a bacia vai ficando mais permeável
Impermeabilidade	Significante	Aumenta	Aumenta	O efeito diminui quando a área permeável tem baixa capacidade de infiltração
Largura	Afeta o Formato	Diminui	Aumenta	Para qualquer tipo de tempestade, o aumento na largura produz picos maiores e mais adiantados. O volume só será modificado em áreas onde a bacia é muito estreita e o tempo de contato longo fizer com que haja mais infiltração.
Inclinação	Afeta o Formato	Diminui	Aumenta	Funciona de maneira análoga à largura, mas com menor sensibilidade.
Rugosidade	Afeta o Formato	Aumenta	Diminui	Efeito inverso ao da largura
Armazenamento	Moderado	Diminui	Diminui	O efeito deste parâmetro só é significativo em chuvas de baixo volume

Fonte: (ROSSMAN; HUBER, 2016)

Beling *et al.* (2011) testaram a sensibilidade dos parâmetros de três sub-bacias Peri-urbanas no sul do Brasil e constataram que para bacias mais urbanizadas o parâmetro mais importante, tanto no pico quanto no volume escoado, é a parcela de área impermeável. Outros parâmetros que causaram grande mudança foram o coeficiente de Manning da sub-bacia e a largura. Um

dados discrepantes encontrados nesse trabalho foi a grande sensibilidade da altura de armazenamento em uma das bacias, fato que não costuma ocorrer. Os autores explicaram que provavelmente foi um comportamento decorrente da grande declividade da bacia. A Figura 21 ilustra os resultados desse trabalho.

Figura 21 - Sensibilidade dos Parâmetros (1) - Bacia não urbanizada (2)(3) - Bacia Urbanizada



Fonte: (BELING *et al.*, 2011)

É interessante destacar que a sensibilidade dos parâmetros varia de acordo com a bacia estudada; portanto, da Figura 21, é importante perceber

quais são os parâmetros que causam maior modificação e em qual intervalo de incremento estão os valores obtidos neste exemplo. Outro fator importante é a diferença das sensibilidades entre bacias muito ou pouco urbanizadas.

Os parâmetros hidráulicos dos condutos, como declividade, largura, rugosidade e comprimento são menos sensíveis do que os parâmetros das sub-bacias, sendo o coeficiente de Manning a variável mais sensível (PETERSON; WICKS, 2006).

3.4 Parâmetros Estatísticos e Calibração

Um modelo pode ser baseado em qualquer conceituação teórica e condições de contorno, porém, necessita-se estimar a confiabilidade do que foi proposto. Para isso, lança-se mão de técnicas estatísticas a fim de quantificar a representatividade do modelo.

A avaliação da compatibilidade dos modelos hidrológicos é realizada de acordo com a comparação entre o que foi observado e o que foi simulado, quaisquer sejam os dados de interesse, vazão ou concentração de contaminantes. Basicamente, dois tipos de avaliação podem ser empregados no julgamento do correto ajuste de um modelo: a avaliação visual e a utilização de parâmetros estatísticos; como a primeira apresenta alto grau de subjetividade, a segunda avaliação é mais aconselhável (JAIN; SUDHEER, 2008).

Diferentemente de modelos lineares, o coeficiente de correlação R^2 não é um bom indexador de avaliação para modelos hidrológicos, pois a alta variabilidade dos dados faz com que ele não represente bem o comportamento hidrológico (MCCUEN; KNIGHT; CUTTER, 2006). Os principais parâmetros estatísticos utilizados para a avaliação de um modelo hidrológico são os seguintes:

- Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe;
- Índice de concordância;
- Índice de Correlação de Pearson

- Erro Médio

O coeficiente mais conhecido para avaliação da concordância dos modelos hidrológicos foi criado proposto por Nash e Sutcliffe (1970), a equação 18 apresenta o cálculo do coeficiente. Seus valores variam de menos infinito até 1, sendo 1 a correlação exata entre o modelado e observado. Uma eficiência inferior à zero indica que o valor médio das séries temporais observadas teria sido um melhor preditor do que o modelo.

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - \bar{Q})^2} \quad (18)$$

Onde \hat{Q} é a vazão observada, Q a vazão simulada e \bar{Q} a vazão média observada.

Este indexador não é completamente eficiente, pois muitas vezes o mesmo mascara certos erros do modelo, causando superestimação para vazões mais altas e subestimação para vazões menores (KRAUSE; BOYLE; BÄSE, 2005). Jain e Sudheer (2008) verificaram também o mesmo comportamento.

O índice de concordância foi proposto inicialmente por Willmot (1981), variando de 0 a 1, de modo que 1 representa a total adequabilidade do modelo. A equação 19 apresenta o cálculo deste índice.

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Q_i - \bar{Q}| + |\hat{Q}_i - \bar{Q}|)^2} \quad (19)$$

No qual \hat{Q} é a vazão observada, Q a vazão simulada e \bar{Q} a vazão média observada.

Os coeficientes de correlação, tanto o padrão quanto o de Pearson, não são bons indicadores. Porém, ainda são indicativos da precisão do modelo e são usados em alguns trabalhos como instrumentos de validação, sempre com ressalvas (LEGATES; MCCABE, 1999).

Todos os parâmetros anteriores são coeficientes adimensionais; porém, é necessário estabelecer uma metodologia para avaliar a magnitude dos erros. Neste contexto, os mais adequados são o erro médio absoluto, que mede a magnitude média dos erros de um conjunto de previsões (equação 20), e a raiz

do erro quadrático médio, que é a raiz quadrada da média das diferenças quadradas entre o previsto e observado (equação 21):

$$MAE = \frac{\sum |\hat{Q}_i - Q_i|}{n} \quad (20)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{n}} \quad (21)$$

Onde \hat{Q} é a vazão observada, Q a vazão simulada e n é a quantidade de dados observados.

Quando se fala em parâmetros estatísticos, tende-se a comparar a representatividade dos coeficientes com o tradicional R^2 ; porém, a ordem de escala dos indexadores é diferente (principalmente o coeficiente de eficiência e o índice de correlação).

Definir limites de aceitabilidade do modelo depende do propósito, aplicação e condições de contorno do problema. Ritter e Muñoz-carpena (2013) propõem valores limites de classificação do modelo segundo a Tabela 4.

Tabela 4 - Limites de Classificação dos modelos

Performance	COE
Muito Boa	≥ 0.90
Boa	0.80-0.90
Aceitável	0.80-0.65
Insatisfatória	< 0.65

Fonte: (RITTER; MUÑOZ-CARPENA, 2013)

Muitos autores como Dongquan *et al.* (2009) e Santhi *et al.* (2001) estabeleceram o limite de aceitabilidade para modelos hidrológicos em um coeficiente de eficiência de 0.5. Outros autores estabeleceram limites mais baixos ou mais altos. Como dito anteriormente, não há consenso, pois cada modelo hidrológico representa uma situação diferente, com tamanhos de bacias completamente diferentes e resoluções espaciais também diferentes. A Tabela 5 apresenta o coeficiente de eficiência obtido em diversos trabalhos feitos em áreas urbanas ou semi-urbanas utilizando o modelo SWMM; todos os trabalhos classificaram o modelo produzido como, no mínimo, satisfatório.

Tabela 5 - Coeficientes de eficiência encontrados na literatura

Autor	Área (ha)	Uso e Ocupação	Nº de Eventos	COE
Dongquan et al. (2009)	13.5	Urbana	1	0.86-0.82
Tan et al. (2008)	560	Semi-Urbana	66	0.19-0.93
Muschalla et al. (2008)	335	Urbana	1	0.75
Bennis e Crobeddu (2007)	177	Urbana	3	0.64-0.72
Bennis e Crobeddu (2007)	23.3	Urbana	3	0.91-0.95
Hailegeorgis e Alfredsen (2018)	21.25	Urbana	Vários	0.65-0.94
Krebs et al. (2014)	5.9	Urbana	17	0.88 (média)
Krebs et al. (2014)	6.6	Urbana	14	0.97 (média)
Krebs et al. (2014)	12.6	Urbana	12	0.8 (média)
Petrucci e Bonhomme (2014)	230	Urbana	6	0.6-0.84 (média)
Niemi et al. (2017)	33.5	Urbana	5	0.53-0.79
Tobio, Maniquiz-redillas e Kim (2014)	0.3	Urbana	10	0.83
Shinma (2011)	1010	Semi-Urbana	10	0.84 (média)
Formiga et al. (2016)	495	Semi-Urbana	3	0.84-0.99

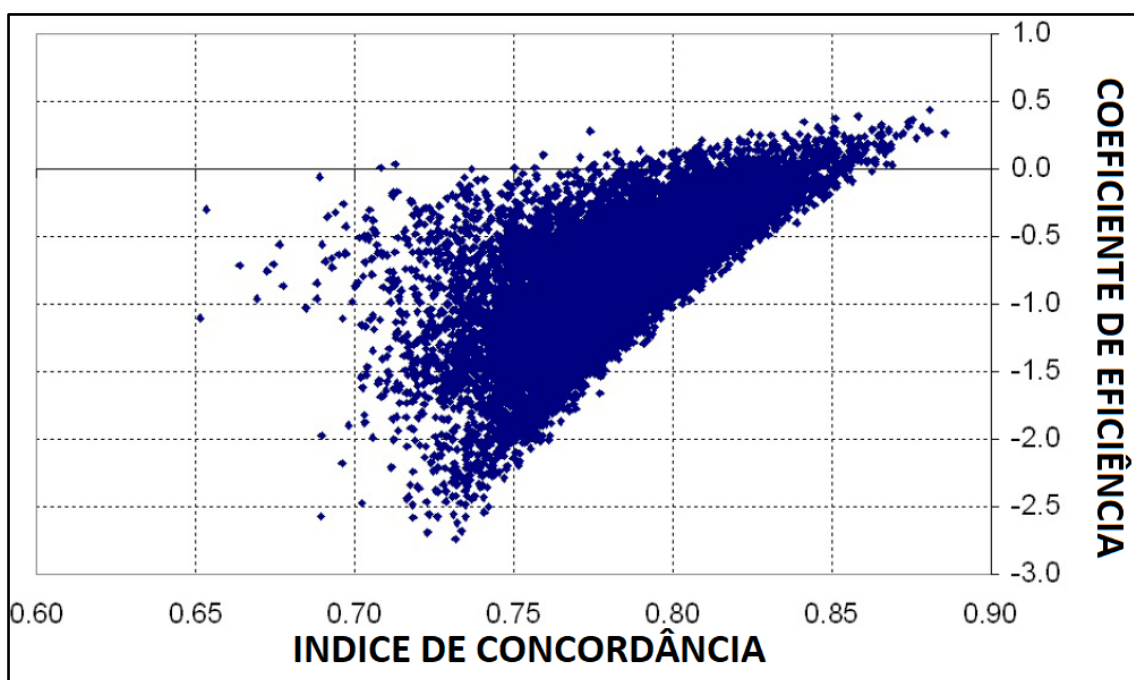
Fonte: Elaboração do autor.

Dos trabalhos envolvendo modelagem em SWMM, percebe-se que, de maneira geral, quando se tem uma bacia muito pequena (com menos de 30 ha), também se tem alto refinamento dos dados como, por exemplo, modelo digital de terreno na casa sub-centimétrica e avaliação das áreas indiretamente conectadas. Este alto refinamento leva, naturalmente, a ajustes melhores.

Outro ponto a ser considerado é a quantidade de eventos calibrados. Nota-se que quanto menos eventos utilizados para calibrar/validar, mais se obtêm coeficientes desejáveis, isto porque a resposta da bacia é diferente ao longo do tempo, e difere também devido às mudanças sazonais (e.g. crescimento de gramíneas, saturação do solo, entre outras) e às características da chuva, como intensidade e duração. Estes fatores fazem com que modelos calibrados com poucos eventos possam ser facilmente mascarados e não representem a resposta global da bacia, mas apenas algumas situações específicas.

O parâmetro estatístico índice de concordância não é amplamente usado como o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe. Em termos comparativos, o índice de concordância tende a gerar números mais altos do que o coeficiente de eficiência, conforme estudaram KRAUSE; BOYLE; BÄSE (2005). A Figura 22 indica a relação dos parâmetros citados acima. Percebe-se que a borda inferior é bem delineada, porém, existe grande dispersão no restante dos dados. Portanto, é inviável estabelecer qualquer equação para representar a conversão, ainda que o índice de correlação seja quase sempre maior que o coeficiente de eficiência.

Figura 22 - Relação Entre o Coeficiente de Eficiência e o Índice de Concordância



Fonte: (KRAUSE; BOYLE; BÄSE, 2005).

Outros índices importantes para serem estudados são os erros na vazão de pico, no volume escoado e no tempo de pico. A adequação da vazão e tempo de pico é importante, visto que se trata de hidrologia urbana e tais parâmetros são ocasionadores de uma grande gama de problemas. O volume escoado é importante para verificar a representatividade do balanço hídrico do modelo. Tais erros são calculados conforme equações 22, 23 e 24 a seguir.

$$E_p(\%) = \frac{|\hat{Q}_p - Q_p|}{\hat{Q}_p} \cdot 100 \quad (22)$$

$$E_t = \hat{T}_p - T_p \quad (23)$$

$$E_v(\%) = \frac{|\hat{V}_e - V_e|}{\hat{V}_e} \cdot 100 \quad (24)$$

Nas quais \hat{Q}_p é a vazão de pico observada, Q_p a vazão de pico modelada, E_p a vazão de pico (em porcentagem), \hat{T}_p é o tempo de pico observado, T_p é o tempo de pico simulado, E_t é o erro do tempo de pico (em minutos), \hat{V}_e o volume escoado observado, V_e o volume escoado modelado e E_v o erro do volume escoado (em porcentagem).

3.4.1 Métodos de Calibração

Fundamentalmente, existem dois métodos para se proceder a calibração: o da tentativa e erro, e os métodos automáticos. O primeiro é limitado por um número pequeno de tentativas, porém, o operador de calibração pode utilizar o sentido físico dos parâmetros para melhor adequar o modelo; já na calibração automática, é necessário um algoritmo que tem como objetivo minimizar ou maximizar uma dada função, dependendo do número de variáveis (REFSGAARD; STORM, 1990).

O objetivo de uma calibração é variar os parâmetros de interesse a fim de encontrar o valor de uma dada função que gere a melhor adequabilidade do modelo. Geralmente, essa função é dotada de um ou mais parâmetros estatísticos (funções objeto, ou multiobjeto).

Atualmente, o maior esforço na área da calibração automática está em aperfeiçoar e avaliar o desempenho de métodos para aproximar as variáveis a serem calibradas (BARCO; WONG; STENSTROM, 2008; DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1994; SHINMA, 2011). Com o avanço do processamento, os métodos de calibração podem se sofisticar; atualmente, utiliza-se muito o conceito de calibração multiobjeto, em que se tenta aproximar, simultaneamente, o erro no volume escoado, na vazão de pico e na forma do hidrograma.

Outro fator que deve ser considerado é o número de eventos a serem calibrados. Em modelos que analisam poucos eventos, a tendência é conseguir uma correlação maior, pois não é avaliado sobre uma perspectiva ampla, o que torna o modelo menos estável na validação e, por consequência, menos representativo (GAMERITH; GRUBER; MUSCHALLA, 2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Banco de Dados

O banco de dados para esse projeto foi dividido entre os dados necessários para a elaboração do modelo digital, como grau de impermeabilização, topografia, entre outros; e os dados obtidos nos eventos chuvosos, que basicamente são os valores de precipitação e vazão.

As plantas topográficas e o levantamento de galerias existentes foram cedidos pela prefeitura de Ilha Solteira. No decorrer do trabalho, foram feitas campanhas de campo para obter mais informações, como cotas e localização de bocas de lobo, diâmetros da tubulação, entre outros dados para melhorar o modelo.

As imagens de satélite foram obtidas por meio do Software Google Earth Pro. As cenas captadas foram georreferenciadas no Software ArcGis. Conseguiu-se com essa técnica a obtenção de uma imagem com resolução sub-métrica de 40 cm.

Os dados de precipitação foram adquiridos por três pluviógrafos distribuídos espacialmente, a fim de garantir uma malha adequada para o estudo de uma bacia urbana, de modo que a resolução dos equipamentos está discriminada abaixo.

- Pluviógrafo 1 – Resolução de lâmina precipitada de 0,2 mm e resolução temporal de 1s.
- Pluviógrafo 2 – Resolução de lâmina precipitada de 0,254 mm e resolução temporal de 1 minuto.
- Pluviógrafo 3 - Resolução de lâmina precipitada de 0,3 mm e resolução temporal de 5 minutos.

Os dados de vazão e nível d'água para posterior calibração foram obtidos por meio do Acoustic Doppler Profile (ADP) SonTek-IQ Plus, que foi instalado em um canal fechado de convergência de tubulações, para obter, assim, a curva chave para este ponto, que será de grande interesse para trabalhos subsequentes. É importante ressaltar que o ADP tem resolução temporal de 2 minutos para os dados de vazão e nível captados.

4.2 Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido no noroeste paulista, na cidade de Ilha Solteira. O clima é classificado como tropical semi-úmido, segundo classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013), e é marcado por chuvas intensas no verão e estiagem no inverno. A temperatura média anual é de 23,6° e o índice pluviométrico é de 1.300 mm anuais.

A área de estudo é a sub-bacia do Córrego Sem Nome (Figura 23), definida pela seção localizada a 7740803m norte e 465037m leste, sendo este corpo d'água dotado da maior sub-bacia urbana do município de Ilha Solteira – SP, com área de aproximadamente 1.78 km². Os tipos de solos encontrados na região de Ilha Solteira são: PVA10 (Argissolos Vermelho-Amarelos) e LV39 (Latosolos Vermelhos) (SANTIN, 2010)

Figura 23 - Localização da Bacia do Córrego sem Nome

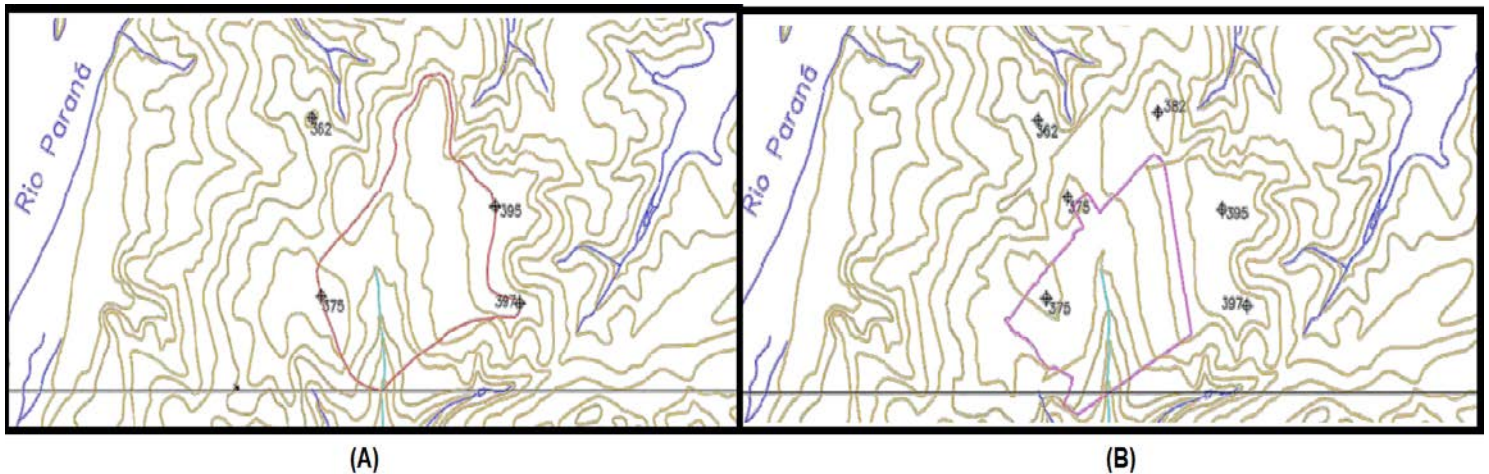


Fonte: Elaboração do autor.

O relevo da região é constituído, principalmente, de colinas médias e colinas amplas. Com a criação do núcleo urbano de ilha solteira, houve a

modificação da topografia da região, alterando assim os divisores topográficos da bacia em estudo como se nota na Figura 24.

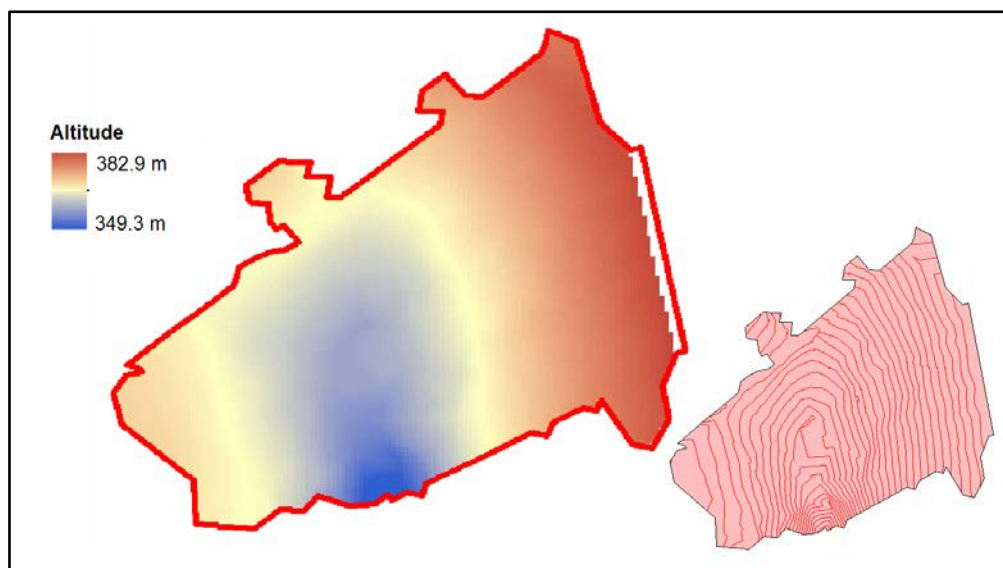
Figura 24 - Limites da bacia do Córrego sem Nome antes (A) e depois (B) da urbanização



Fonte: Modificado (SANTIM, 2010)

Em relação ao relevo da sub-bacia urbana, destaca-se a baixa declividade do terreno, com valores entre 0,5% e 5%, com a maior parte das áreas não tendo declividade maior que 3%, sendo a parte mais íngreme perto do exutório. A parte leste da bacia apresenta declividade um pouco mais acentuada que a parte oeste.

Figura 25 - Topografia da Bacia do Córrego Sem Nome (Curvas de nível de 1 em 1m)



Fonte: Elaboração do autor.

4.3 Sistema de drenagem

A drenagem do escoamento da bacia se dá, primordialmente, pelas galerias de drenagem construídas pela prefeitura. O banco de dados acerca da bacia foi disponibilizado; porém, confrontando o projeto com visitas em campo, notaram-se incongruências, principalmente nas dimensões das galerias.

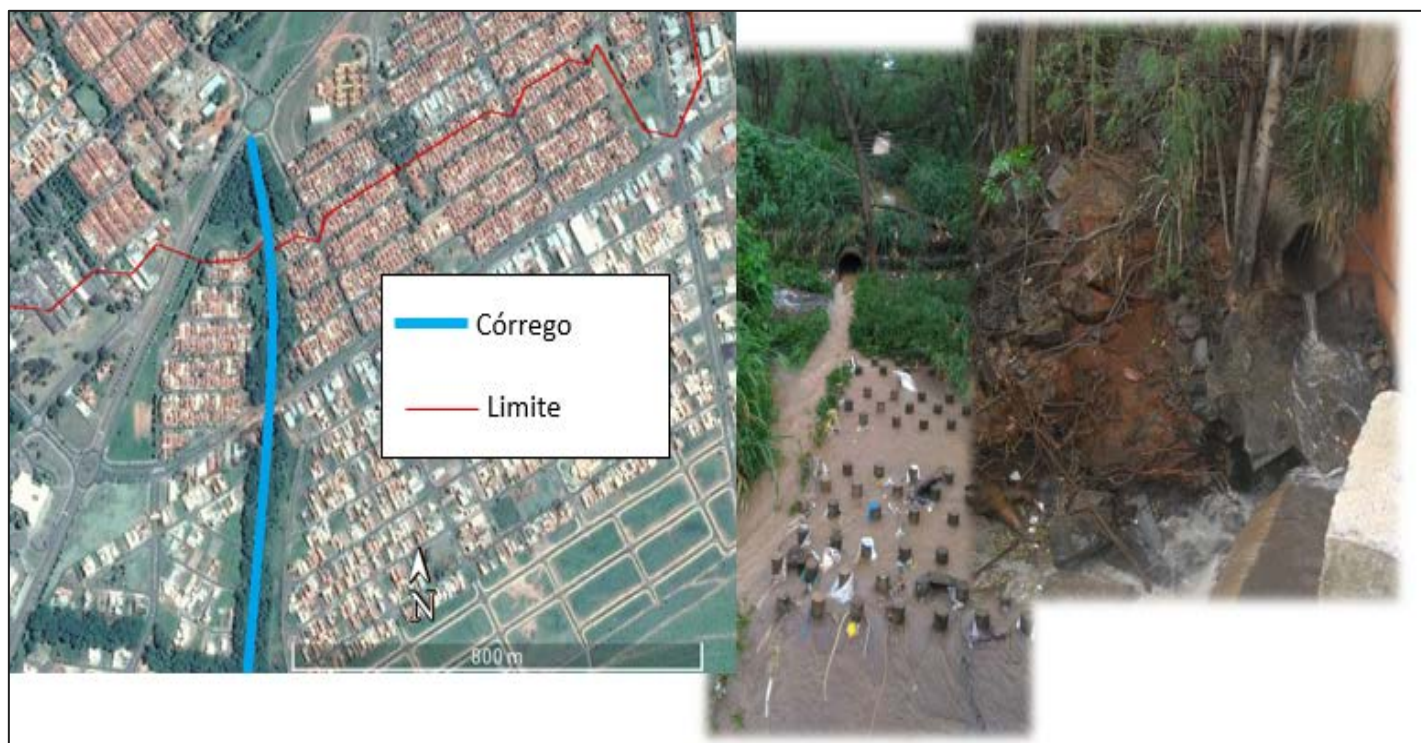
Devido ao fato de ser difícil a obtenção das dimensões das galerias existentes, confiou-se no projeto, exceto para os pontos em que se conseguiu verificar diferença entre o projeto e o executado. As plantas de drenagem estavam divididas em três partes, conforme foi sendo melhorado o sistema na cidade, são elas:

- Estágio 1 – Onde constam as galerias do centro urbano da cidade como as do bairro jardim aeroporto (2º Maior centro urbano de Ilha Solteira-SP)
- Estágio 2 – Onde consta o projeto de drenagem do Bairro Jardim Mirim, um conglomerado que se desenvolveu a Leste da bacia, depois da construção do centro urbano.
- Estágio 3 – Onde consta o sistema de drenagem da Avenida Atlântica, uma grande avenida que corta a cidade e a bacia.

As plantas estão expostas no Anexo D.

Além das galerias, existe o canal principal, onde se dava a drenagem antes do processo de urbanização. Já foram projetadas e construídas no canal seções bem definidas; porém, atualmente, o mesmo se encontra em estágio avançado de degradação. A Figura 26 ilustra algumas partes do canal e sua localização.

Figura 26 - Localização e Estado Atual do Córrego sem nome



Fonte: Elaboração do autor.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, houve uma queda de árvores na estrutura do canal e verificou-se pequena interferência quando se veiculavam lâminas maiores. Outro ponto importante foi a altura das gramíneas durante todo tempo de projeto; foi realizada a poda pela prefeitura apenas uma vez, sendo que, ao final do projeto, as plantações chegavam a mais de um metro. A Figura 27 mostra as árvores caídas e a altura das gramíneas ao fim do projeto.

Outro ponto a ser destacado na rede de drenagem estudada é a constante interferência com sujeira em várias bocas de o lobo, o que reduz a sua capacidade de engolimento. Outro problema relacionado ao tema são as lombofaixas que estão instaladas na avenida principal, que sofrem com sérios e constantes problemas de alagamento devido a capacidade de engolimento reduzido da mesma. A Figura 27 e a Fonte: Elaboração do autor.

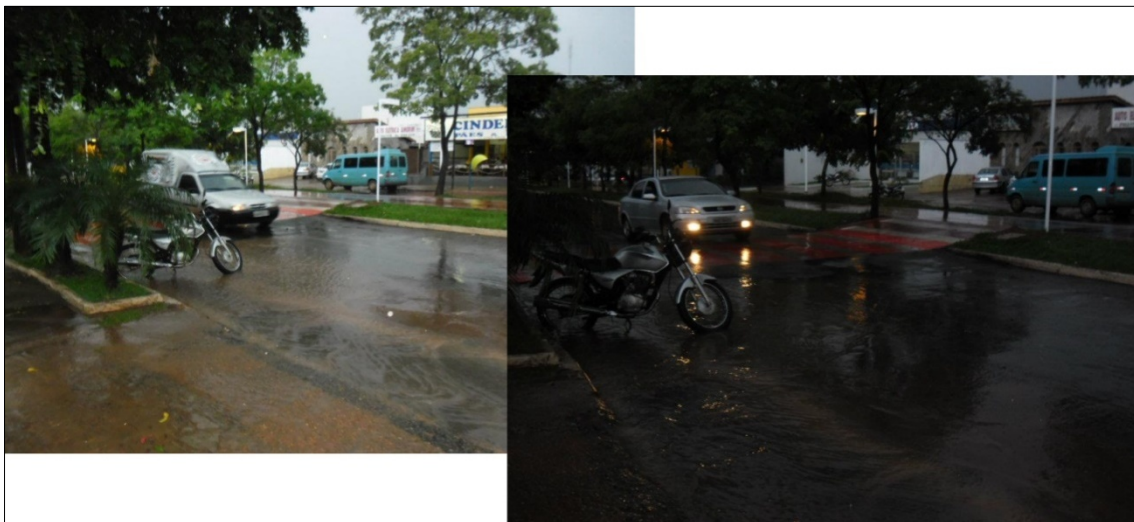
Figura 28 ilustram tais situações.

Figura 27 - Árvores Caídas sobre a macrodrenagem e situação de entorno



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 28 - Alagamento das Lombofaixas



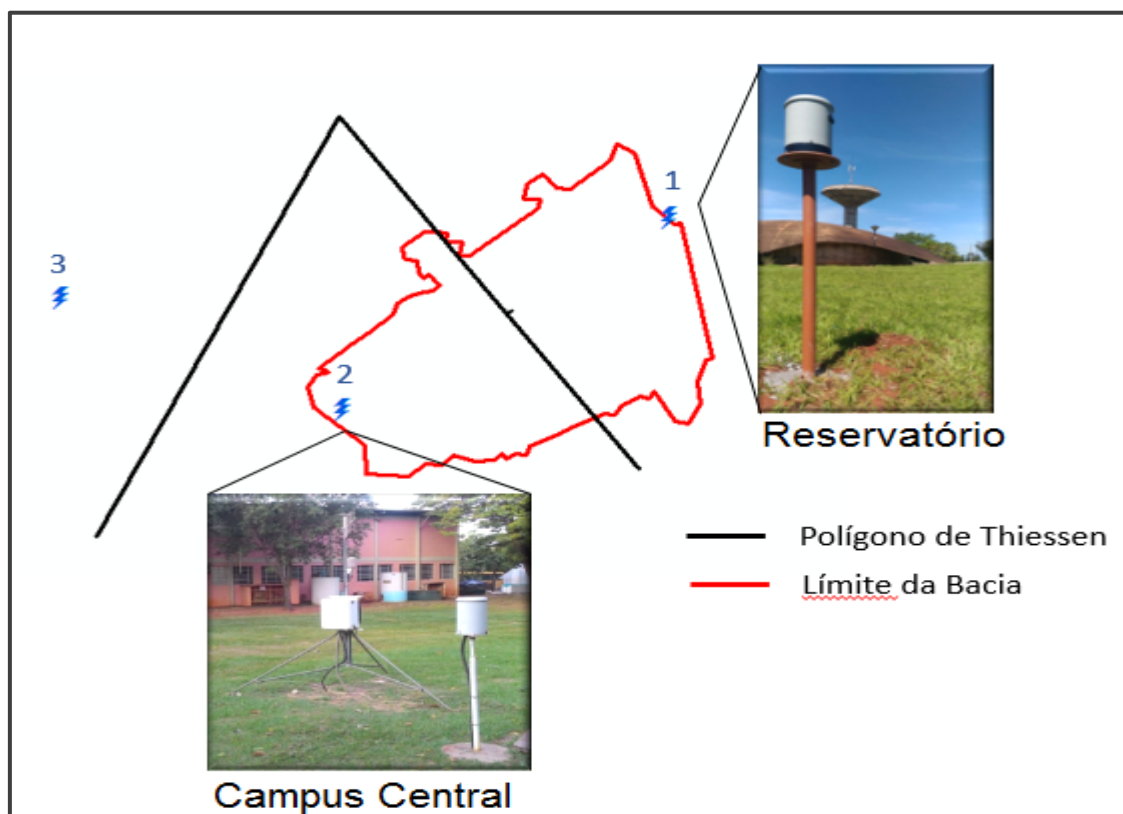
Fonte: (RODRIGUES, 2018)

4.4 Localização e Instalação dos postos de coleta

Fundamentalmente, foi definida a localização dos postos de medição de chuva (pluviométrico) e de vazão (fluviométrico), onde foram instalados os pluviógrafos ou ADP. Um dos pontos de coleta de chuva já estava definido e

instalado (pluviógrafo 3), sendo o seu mantenedor o Laboratório de Hidráulica e Irrigação. Os demais foram escolhidos com o intuito de atender as necessidades do projeto e foram locados em duas extremidades da bacia estudada conforme a Figura 29.

Figura 29 - Localização e Área de Influência dos postos Pluviométricos



Fonte: Elaboração do autor.

Nota-se que o pluviógrafo 3 não tem interferência na bacia estudada, sendo o mesmo usado apenas para aferição das chuvas medidas e posterior análise da espacialidade da chuva. Outro dado importante é a distância entre os pluviógrafos 1 e 2 que é de 1,76 km.

Foi escolhida a metodologia de Thiessen para divisão da área de influência devido à pequena área da bacia e a forma plana da mesma, não ocorrendo a influência da altitude na intensidade e volume precipitado.

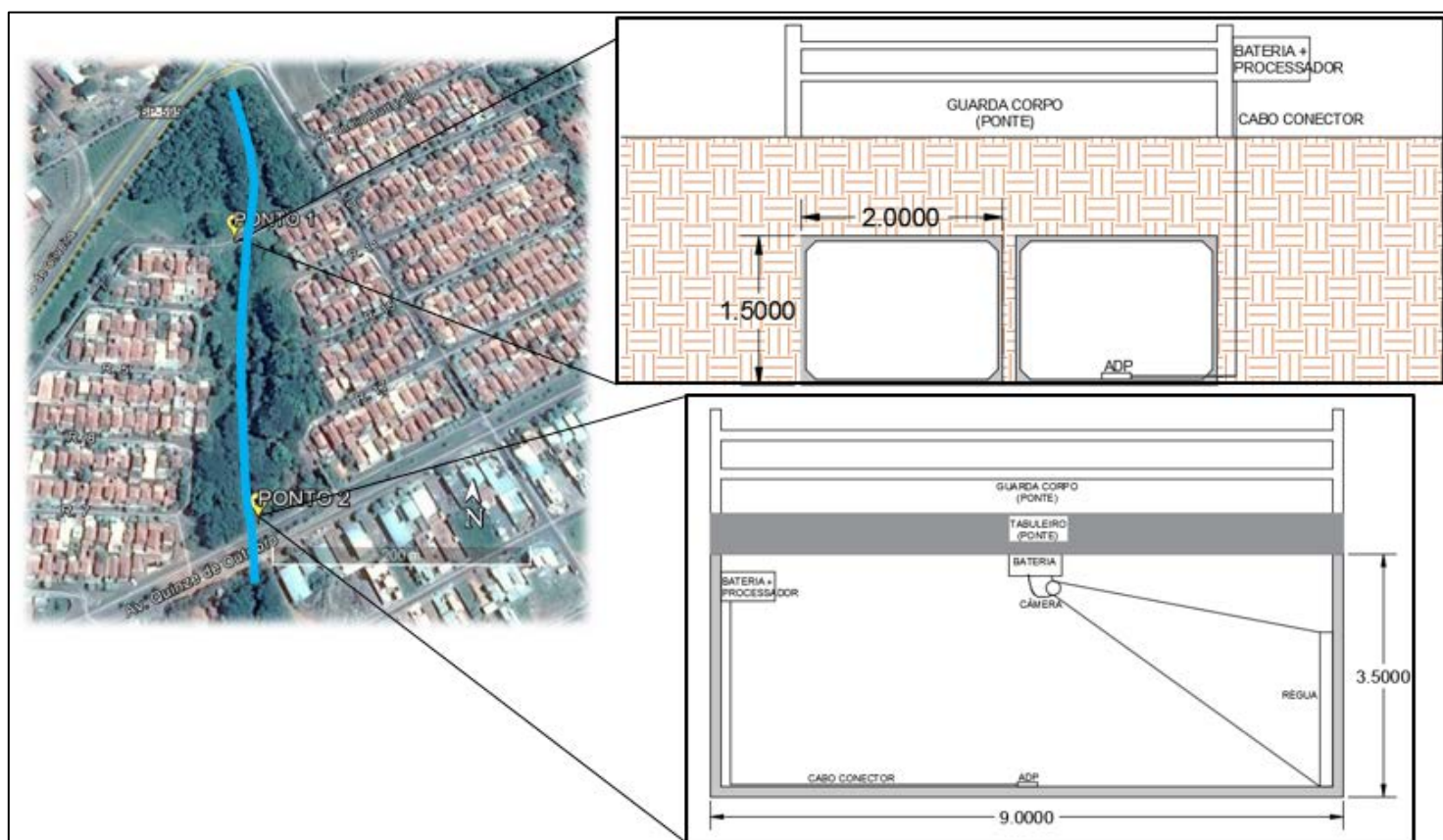
Para a medição de vazão, foi escolhido um ponto em uma galeria retangular dupla (2m x 1,5m) que possibilitasse a leitura da vazão de forma correta sem muitas interferências. Também foi instalado o aparato necessário para a colocação do ADP em outro local do córrego, localizado à jusante do

ponto um. A imagem ilustrativa, com a localização e esquema de instalação, está exposta na Figura 30. A Fonte: Elaboração do autor.

Figura 31 mostra os equipamentos já instalados em campo.

O ADP precisa estar ligado a um processador e a um fornecedor de energia. Foi utilizada uma bateria de 12 W, e para isso foi confeccionada uma caixa em metal para acondicionar corretamente esses equipamentos, além de uma proteção por tubos de PVC para evitar vibrações excessivas e para proteger o cabo.

Figura 30 - Localização e Instalação dos postos Fluviométricos



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 31 - Equipamentos Instalados em Campo A - Ponto 1 B- Ponto 2



Fonte: Elaboração do autor.

Os dados foram coletados com resoluções temporais distintas, 1 segundo e 1 minuto para os pluviógrafos e 2 minutos para o ADP. A fim de padronizar as medições, foi feita uma rotina para compatibilizar os passos de tempo dos pluviógrafos para 2 minutos.

É interessante ressaltar que tanto a resolução temporal (2 min), quanto a espacial (1,76 km) estão de acordo, e apresentam, inclusive, até valores menores, do que os valores sugeridos por Berne, (2004) na Figura 15 para uma área de 171 ha. Ochoa-Rodriguez *et al.* (2015) sugerem que para áreas maiores que 100 ha, se tenha uma resolução espacial de 1 Km.

4.5 Elaboração do Modelo Digital

4.5.1 Inserção do Sistema no Software

Primeiramente, com o auxílio da rede de drenagem presente em anexo e das cotas topográficas fornecidas pela prefeitura, foram estabelecidas as sub-bacias influentes em cada boca de lobo. O critério utilizado para o traçado foi o método expedito de se considerar uma área de influência de 45 graus a partir da esquina da quadra.

Com as sub-bacias devidamente divididas, o próximo passo foi a inserção delas no Software com suas respectivas conexões com as galerias ou com outra sub-bacia, formando assim a rede completa de micro e macrodrenagem. O sentido dos escoamentos foi definido de acordo com a planta topográfica e alguns indicativos de plantas fornecidas pela prefeitura.

4.5.2 Definição dos atributos dos componentes

Para a correta execução da simulação no SWMM é necessário obter características dos canais e das sub-bacias. Esse procedimento foi realizado em grande parte em ambiente SIG.

Para os canais, as informações necessárias são os comprimentos, as inclinações e a rugosidade do canal. A rugosidade é um parâmetro de calibração que vai variar com o decorrer do trabalho; o comprimento foi obtido com a medida simples em ambiente SIG, enquanto que a inclinação foi definida por meio das cotas topográficas do terreno, considerando a profundidade da galeria sempre constante. Tal aproximação foi feita, pois não se dispunha de informação das profundidades das galerias, e, também, por se tratar de uma prática corriqueira no projeto e execução de obras de drenagem.

Conforme exposto na seção 3.3.2, as informações necessárias para caracterizar a sub-bacia no modelo são: inclinação, rugosidade da parte permeável e impermeável, porcentagem de área impermeável, altura de armazenamento, largura, área, e os parâmetros de infiltração do solo. Esses parâmetros foram obtidos por, técnicas de geoprocessamento, ensaios de campo e literatura. As técnicas de obtenção de cada parâmetro serão discriminadas abaixo. É importante ressaltar que os valores obtidos serão flutuantes, pois haverá a calibração do modelo, de forma que as técnicas de obtenção dos valores são importantes para se ter uma boa primeira aproximação.

- Rugosidade da parcela impermeável e permeável, e altura de armazenamento.

Conforme discutido na revisão bibliográfica, esses três parâmetros são de difícil obtenção, servindo muito bem como parâmetros de calibração do modelo. Portanto, foram utilizados valores que outros autores encontraram em seus respectivos trabalhos (conforme seção 3.3.2), não só para a definição do valor de partida, mas também para o limite superior e inferior de variação. A rugosidade desempenha papel muito mais importante do que a altura de armazenamento na resposta do sistema; destarte, foi tomado especial cuidado com esses parâmetros.

- Área

Seguindo a mesma lógica da obtenção dos comprimentos das galerias, a área de cada bacia é facilmente obtida em ambiente SIG, onde, depois de delimitada e migrada para o *Software*, o mesmo as calcula via rotinas já implementadas no próprio sistema.

- Largura

Para a obtenção da largura da bacia, foi utilizada a metodologia proposta por Guo e Urbonas (2009) e explicitada pelas equações 14 e 15:

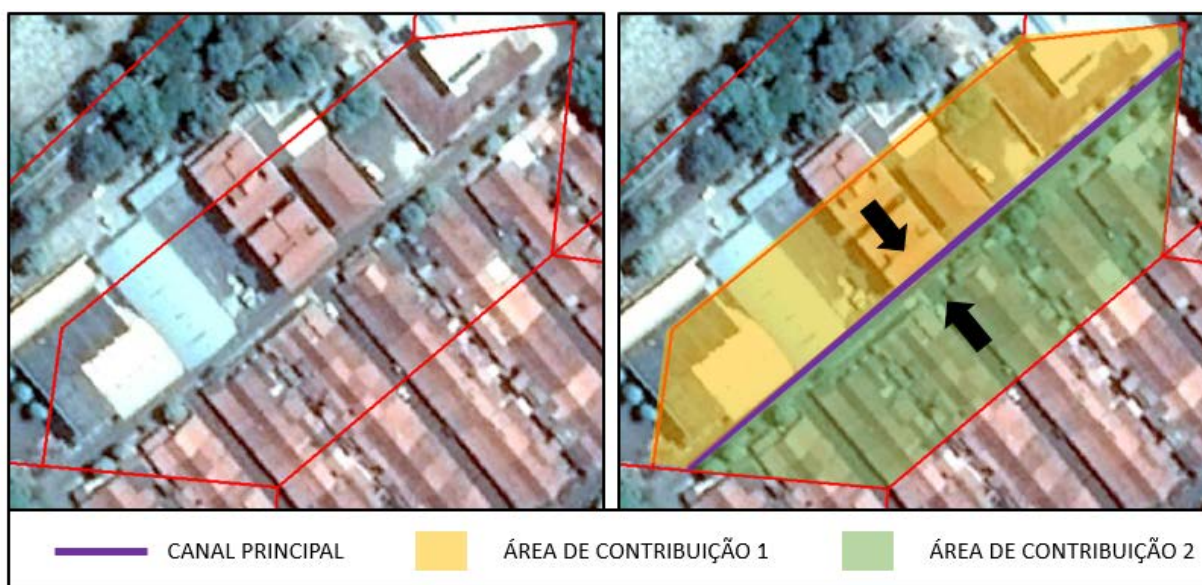
$$L = C \times Y \quad (14)$$

$$Y = \frac{2X(1,5Z)(2K - X)}{(2K - 1)} \quad (15)$$

Onde L é a largura da bacia, C é a comprimento do canal principal, Y é o fator de forma da bacia, X é definido como sendo a Área dividido pelo comprimento do canal principal ao quadrado (A/C^2); Z é a razão entre a maior área entre os dois lados do canal e a área total (A_m/A) e K é um valor entre 4 e 6 que, usualmente, é adotado como sendo 4.

Para a utilização desta metodologia, é necessário definir o canal principal da sub-bacia e a divisão entre as áreas que contribuem para o canal principal. Para isso, foi considerado o canal principal como sendo a via pavimentada e as áreas de contribuição a parcela da quadra adjacente à rua, conforme ilustra a Figura 32.

Figura 32 - Metodologia para a determinação da largura da sub-bacia



Fonte: Elaboração do autor.

- Infiltração

Dentre todas as alternativas possíveis de cálculo de infiltração expostas na Tabela 2, foi escolhido realizar o cálculo via fórmula de Horton, que é a equação mais conhecida dentre os modelos de infiltração e possui vasta literatura sobre os parâmetros iniciais.

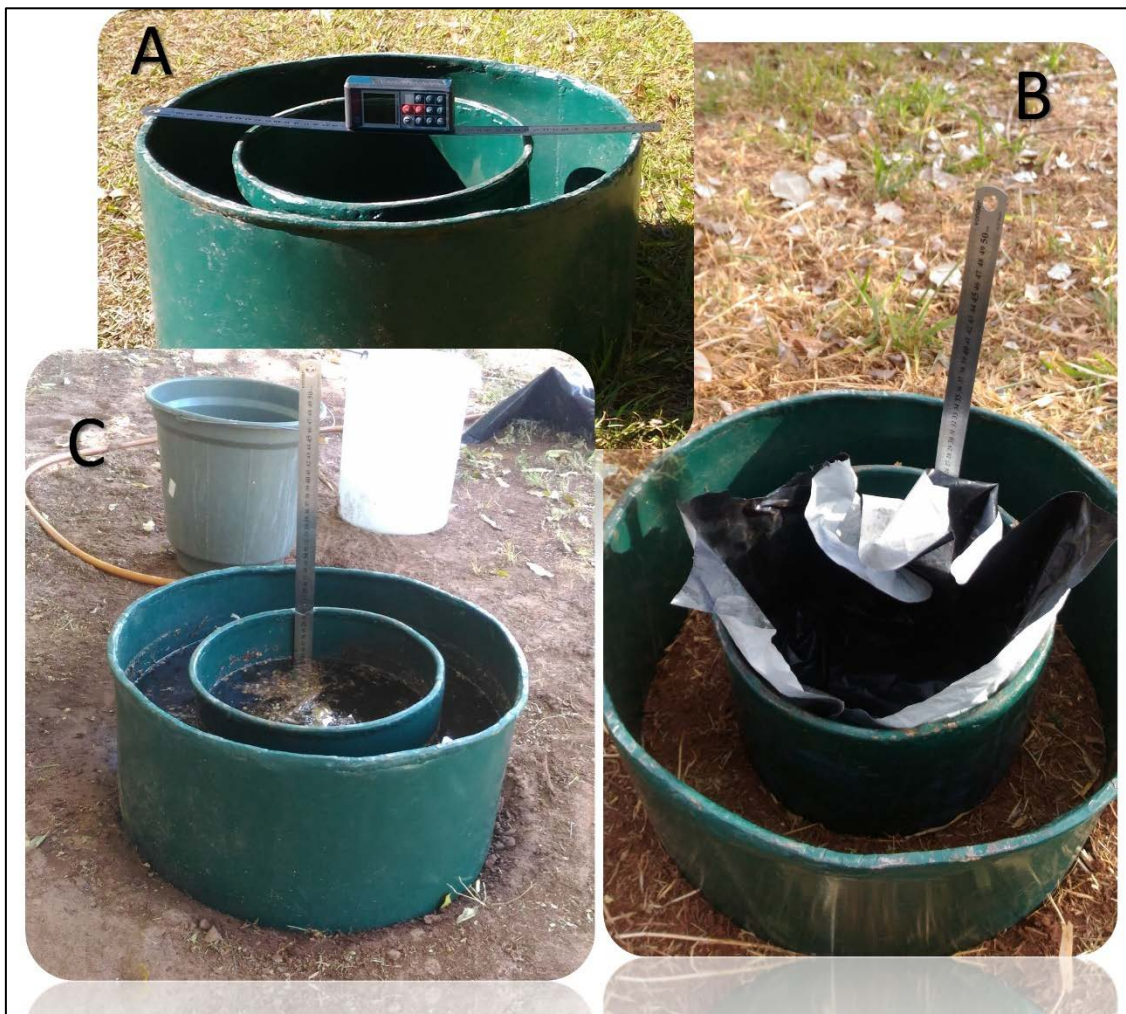
Por meio de Setzer e Porto (1979), o tipo de solo da sub-bacia foi determinado como sendo solo tipo ABq (Arenito Bauru), composto por 30% do grupo hidrológico A, 55% do grupo B, 10% do grupo C e 5% do grupo D. Com base na composição do solo, pôde-se chegar aos valores dos parâmetros da fórmula de Horton por meio de ponderação, sendo de 202 para o coeficiente f_0 , 15,5 para o f_c e 2 para a constante de decaimento k .

Foram realizados diversos testes de infiltrômetro de duplo anel ao longo de toda a bacia, a fim de verificar a concordância dos valores da literatura com os encontrados na bacia.

Para isso, foi utilizado aparato experimental consistido de dois anéis metálicos de diâmetros equivalentes a 31 e 51 cm, além de outros equipamentos auxiliares, como balde, régua e lona plástica. Os anéis foram cravados no solo até uma profundidade de aproximadamente 15 cm, em seguida, houve a fixação da régua no anel interno e proteção do solo com lona plástica para não ocorrer infiltração antes do início do ensaio. Por fim, colocou-se água durante todo o teste, entre 12 e 20 cm, para manter a carga hidráulica próxima, e efetuou-se a leitura da lâmina. A Figura 33 ilustra o ensaio realizado.

Com as leituras de nível d'água e tempo, pode-se calcular a taxa de infiltração ao longo do tempo e, posteriormente, ajustar a curva de Horton e definir os parâmetros de taxa de infiltração inicial, saturada e constante de decaimento, via minimização do erro médio quadrático.

Figura 33 - Ensaio de Infiltrômetro de Duplo Anel. A - Aparato Nivelado B - Aparato Antes do início C - Teste em Execução



Fonte: Elaboração do autor.

- Porcentagem de área impermeável

A porcentagem de área impermeável foi obtida por meio da classificação supervisionada da imagem de satélite obtida, em etapa anterior, em duas parcelas: a impermeável e a permeável. A técnica consiste em treinar o Software em SIG com amostras de áreas dos dois tipos e por meio da similaridade das frequências de ondas refletidas por essas superfícies. Verifica-se se o pixel referente àquela localidade tem resposta mais similar com a parcela impermeável ou permeável.

Com todos os pixels classificados, é necessário obter a parcela da sub-bacia que pertence à parcela impermeável, portanto, o segundo passo é a realização

da estatística por zona. Após o processo classificatório, os pixels recebem valores distintos (0 caso sejam permeáveis e 1 se forem impermeáveis), a estatística por zona realiza a média de todos esses valores no polígono da sub-bacia obtendo assim a parcela de área impermeável.

- Declividade

Para a obtenção da declividade de cada sub-bacia, foi elaborado o mapa de declividade do terreno, via levantamento topográfico, por rotinas no próprio Software e convertido em uma nuvem de pontos em que cada pixel da imagem representa um valor de declividade naquele ponto. Feito isso, foi realizada uma análise de estatística por zona, idêntica à realizada para a obtenção da parcela impermeável em que foi obtido o valor médio da declividade para cada sub-bacia.

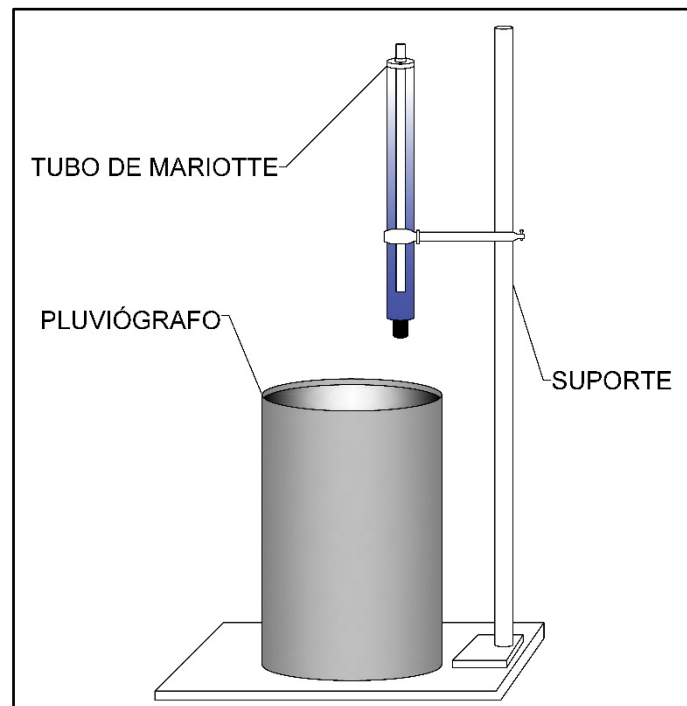
4.6 Consistência dos Dados.

Como a zona urbana é uma área dinâmica, com interferências constantes, tanto antrópicas quanto naturais, é necessário validar as informações obtidas pela instrumentação para descartar qualquer erro sistemático de medição.

4.6.1 Aferição da instrumentação utilizada

Para o pluviógrafo, foi montado um aparato, conforme a Figura 34, contendo o aparelho a ser corroborado e um tubo de Mariotte com um suporte.

Figura 34- Esquema de Ensaio para a Calibração do Pluviógrafo



Fonte: Elaboração do autor.

O tubo de Mariotte é um dispositivo destinado a garantir uma vazão constante mediante uma carga de fluido (H) também constante. Tal condição é alcançada, pois o tubo é completamente vedado, tendo apenas uma mangueira que garanta a passagem do ar até determinada altura. A Figura 35 ilustra o instrumento com detalhes.

O primeiro procedimento foi a determinação da massa específica da água. Para isso foi utilizada a equação 25.

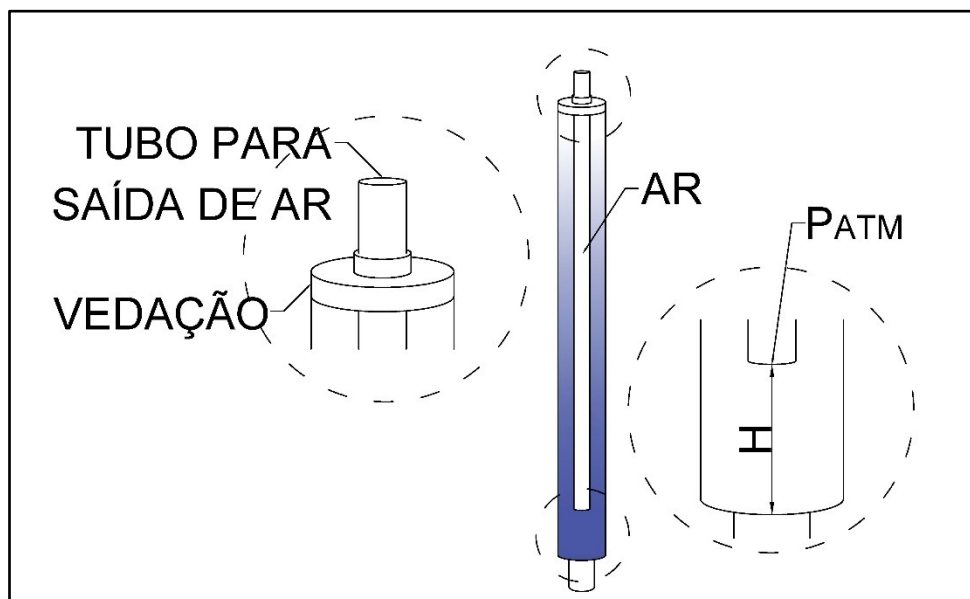
$$\rho = \frac{dm}{dVol} = \frac{\Delta m}{\Delta Vol} \quad (25)$$

Em que ρ é a massa específica, m é a massa e Vol é o volume. Foi então medido o Volume de água com o auxílio de um balão volumétrico, que foi pesado posteriormente. Feito isso, foi então determinada a vazão do frasco de Mariotte pelo método gravimétrico representado pela equação 26.

$$Q = \frac{\Delta m}{\Delta t \times \rho} \quad (26)$$

Na qual ρ é a massa específica, m é a massa, t é o tempo e Q é a vazão.

Figura 35- Esquema de funcionamento do Tubo de Mariotte.



Fonte: Elaboração do autor.

Por fim, foi calculado o tempo de batelada teórico, conforme demonstrado abaixo, sabendo que uma batelada é referente a 0,2 mm de chuva, e que o diâmetro do pluviógrafo é 200 mm.

$$Vol_{1mm} = \text{Área} \times h = \pi \times R^2 \times h = \pi \times 0,1^2 \times 0,001$$

$$Vol_{1mm} = 3,14 \cdot 10^{-5} m^3 = 31,4 \text{ ml}$$

$$Vol_{Batelada} = \frac{Vol_{1mm}}{5} = 6,28 \text{ ml}$$

$$Q = \frac{dvol}{dt} \text{ (Como a vazão é constante)} \rightarrow Q = \frac{\Delta vol}{\Delta t} \rightarrow \Delta t = \frac{\Delta vol}{Q}$$

$$\Delta t_{1mm}(s) = \frac{Vol_{1mm}}{Q} = \frac{6,28(ml)}{Q(\frac{ml}{s})}$$

$$\Delta t_{Batelada}(s) = \frac{Vol_{1mm}}{Q} = \frac{31,4(ml)}{Q(\frac{ml}{s})}$$

O ADP utilizado foi verificado por meio de um módulo hidráulico com dimensões de 20 cm de largura e 39 de altura. Uma vazão conhecida e, anteriormente, calculada via método gravimétrico (Medição do volume e tempo), veiculava no canal e o equipamento instalado com o suporte no fundo do canal realizava as medições. Os dados foram recolhidos pelo Software IQ da mesma

distribuidora do ADP e então comparados com as vazões conhecidas. A Figura 36 ilustra o teste em andamento.

Figura 36 - Aparato experimental para verificação do ADP.



Fonte: Elaboração do autor.

4.6.2 *Consistência dos Dados*

Os dados de chuva dos três pluviógrafos foram confrontados entre si e foi verificada a correlação entre eles. Devido à pequena distância, é esperado forte correlação dos dados medidos nos três pluviógrafos.

A consistência dos dados coletados pelo ADP foi verificada via elaboração da curva-chave. Como o aparelho foi instalado em um trecho de canal sem interferências de montante ou jusante, espera-se que a relação entre lâmina d' água e a vazão se dê conforme regime permanente uniforme, conforme a equação 27. Portanto, foi então ajustado o valor da constante K e verificada a correlação entre a curva teórica e os dados obtidos.

$$Q = \frac{B^{5/3} \cdot y^{5/3} \cdot K}{(B + y)^{2/3}} \quad (27)$$

Onde Q é a Vazão, em m^3/s , B a base do Canal, y a altura da lâmina d'água em metros e K uma constante que engloba as características de rugosidade e declividade do canal.

4.7 Simulação dos Eventos e Calibração do Modelo

Com os dados captados de eventos reais foi então compatibilizado a resolução espacial dos pluviógrafos e simulados no SWMM, com isso foi migrado o resultado para uma tabela onde foram avaliados os diversos parâmetros de adequação do hidrograma.

4.7.1 Sensibilidade do Modelo

Com a bacia já inserida no modelo SWMM, foram estipulados os parâmetros base conforme a seção 4.5.2, assim como os limites superiores e inferiores de estudo, seguindo o que se encontrou na literatura para não serem verificados valores absurdos.

Foram variados os parâmetros um a um, mantendo-se fixos os outros parâmetros e, então, foi realizada a análise da sensibilidade do modelo em questão para quatro diferentes indicadores:

- Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe;
- Erro do Volume Escorado;
- Erro da Vazão de Pico;
- Erro no Tempo de Pico.

4.7.2 Parâmetros Estatísticos considerados

Para a adequação do modelo, foram considerados os seguintes parâmetros conforme a seção 3.4:

- Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe;
- Índice de concordância;
- Erro Médio;
- Erro da Vazão de Pico;
- Erro no Tempo de Pico.

A discussão a cerca da escolha desses indicadores será feita a diante.

Como se trata de um córrego com vazão de base muito pequena, o período de estiagem não apresenta valores de vazão que possam ser captados pelo equipamento; portanto, foi determinado que os indicadores fossem calculados evento por evento, com isso, pode-se obter uma avaliação multi-evento não contínua.

4.7.3 Processo de Calibração e Validação

Para Calibração foram utilizados um total de 18 eventos entre as datas de 28 de outubro de 2017 e 26 de dezembro de 2017. A validação foi realizada, levando em consideração 13 eventos entre as datas de 11 de abril de 2017 e 20 de maio de 2017. Os eventos considerados representam uma variedade grande de volume escoado, intensidade e tempo de duração.

A calibração foi realizada pelo método manual. A literatura ou dados de campo forneceram os parâmetros bases, conforme seção 4.5.2, e então foi realizada a simulação e os resultados foram migrados para a tabela dos indicadores propostos. De posse dos dados, foram variados, um a um, os parâmetros pertinentes conforme resultado da análise de sensibilidade (seção 4.7.1).

Foi avaliada a média dos indicadores para os eventos estudados, sendo feito o tratamento de *outliers*, considerando o método de Grubs, no qual se excluíram os valores com significância menor que 10%; tal procedimento foi feito, pois, devido à grande quantidade de eventos, e foi verificada a ocorrência de alguns eventos que não representavam a resposta da bacia.

Os parâmetros finais escolhidos foram os que apresentaram melhor adequação considerando os cinco indicadores propostos. A validação foi conduzida simulando os eventos pertinentes com os parâmetros obtidos na etapa anterior.

4.8 Espacialidade das Precipitações

Foi realizada a análise das chuvas captadas quanto à diferença do captado entre os dois pluviógrafos considerados na bacia. Tal procedimento serviu para verificar a adequação da resolução espacial adotada.

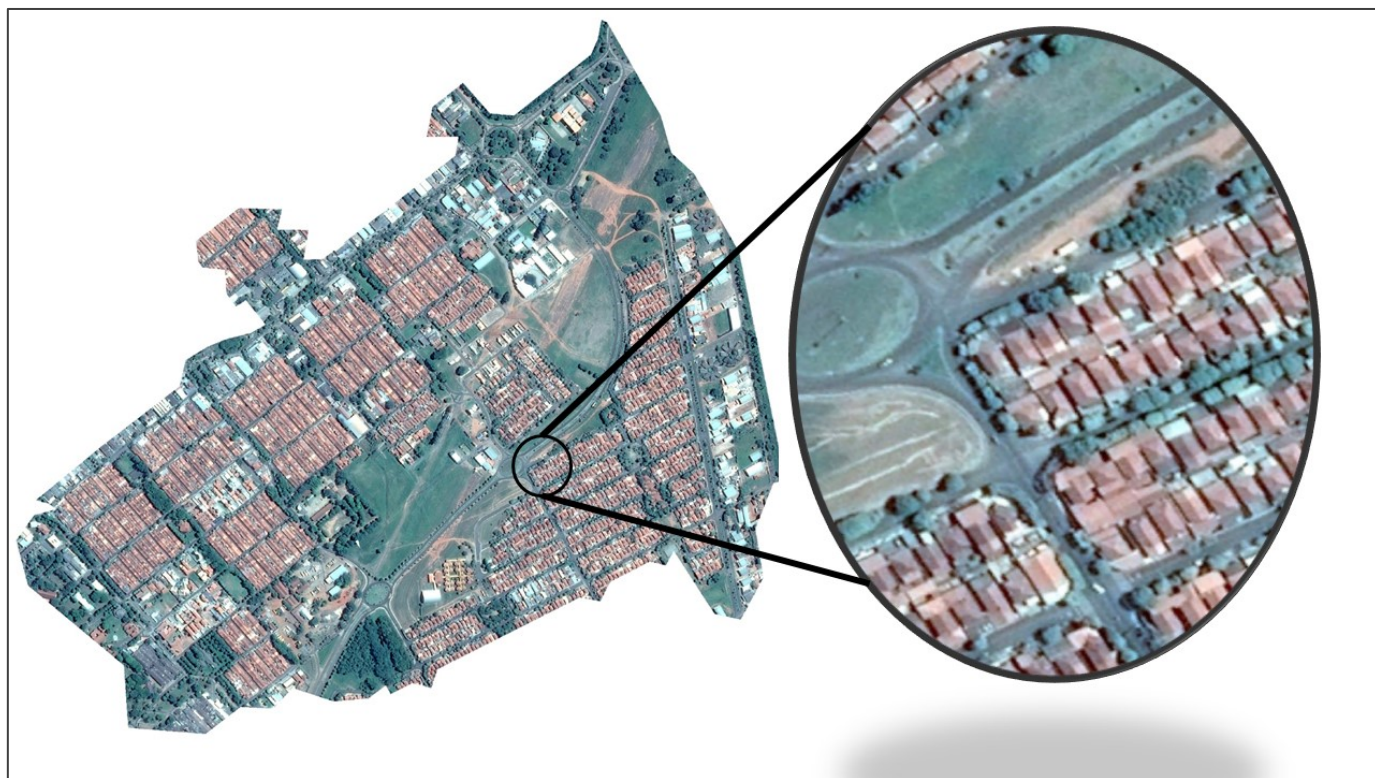
Para isso, foi verificado o erro entre a altura precipitada e a intensidade máxima registrada por evento. Foram simulados alguns eventos que considerariam a existência de apenas um pluviógrafo na região estudada e verificado a sensibilidade da resposta do modelo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Obtenção da imagem de Satélite

Como visto na revisão bibliográfica, um bom modelo representativo de uma bacia urbana requer uma boa resolução espacial; por isso, optou-se por confeccionar uma imagem de satélite mais precisa possível com os recursos disponíveis. Foi utilizado o software Google Earth Pro para captar as imagens da cidade e, posteriormente, essas imagens foram georreferenciadas para se trabalhar em ambiente SIG. A Figura 37 ilustra a imagem obtida.

Figura 37 - Imagem de Satélite da Sub-bacia



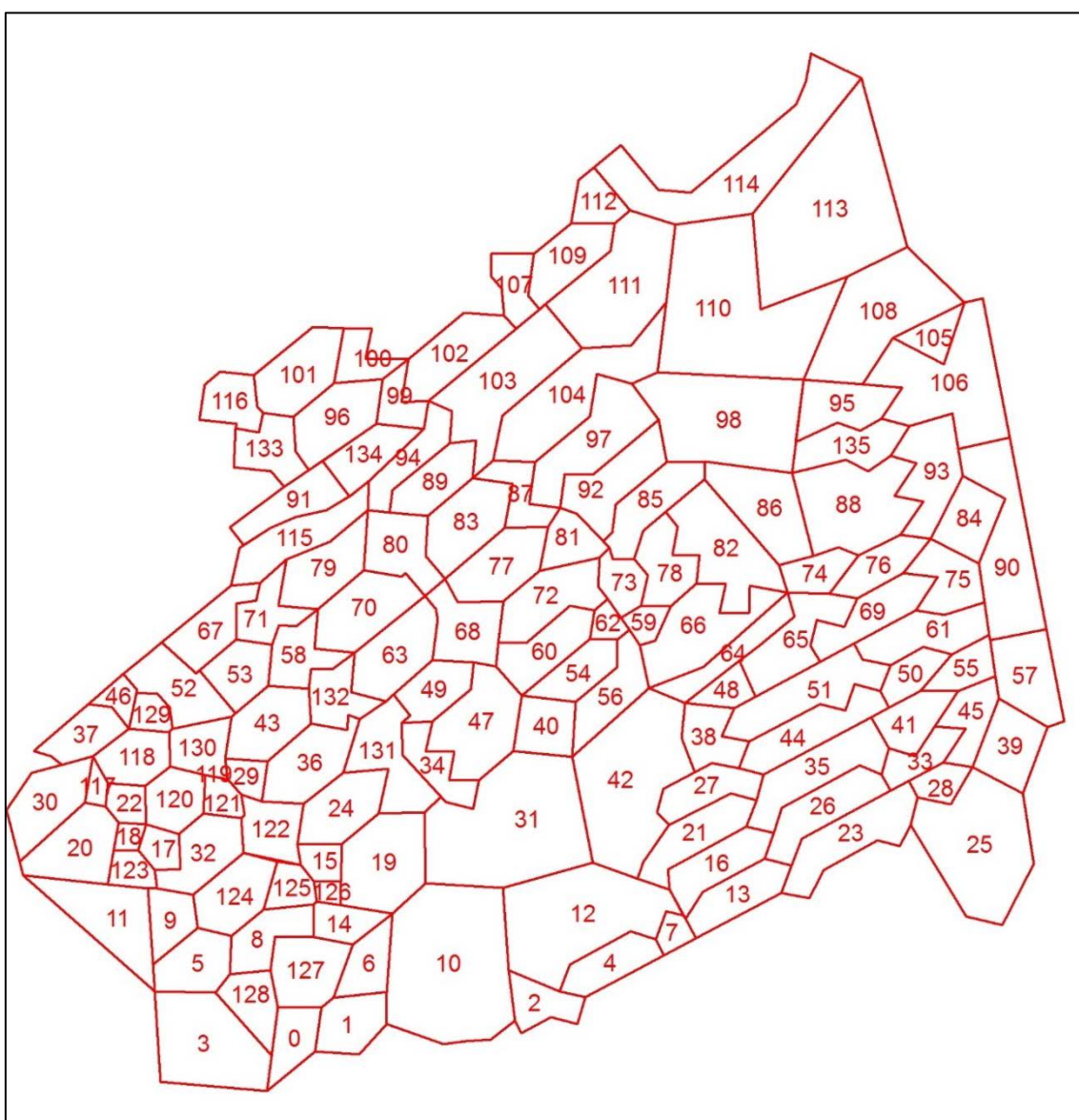
Fonte: Elaboração do autor.

Nota-se da Figura 37 que a resolução espacial é satisfatória, podendo ser distinguidos os elementos da superfície urbana como ruas, áreas verdes, árvores e telhados. A resolução final foi de 30 cm, patamar satisfatório para os objetivos iniciais deste trabalho.

5.2 Definição das Características das Sub-bacias

O primeiro procedimento foi a definição das sub-bacias para cada poço de visita, com o auxílio dos projetos de drenagem e planta topográfica. Foram delimitadas as sub-bacias da maneira mais discriminada possível, a fim de se obter um modelo digital tão detalhado quanto possível. Cada sub-bacia recebeu um número identificador para facilitar as etapas posteriores do trabalho. A Figura 38 mostra o resultado obtido.

Figura 38 - Definição das Sub-bacias de projeto.

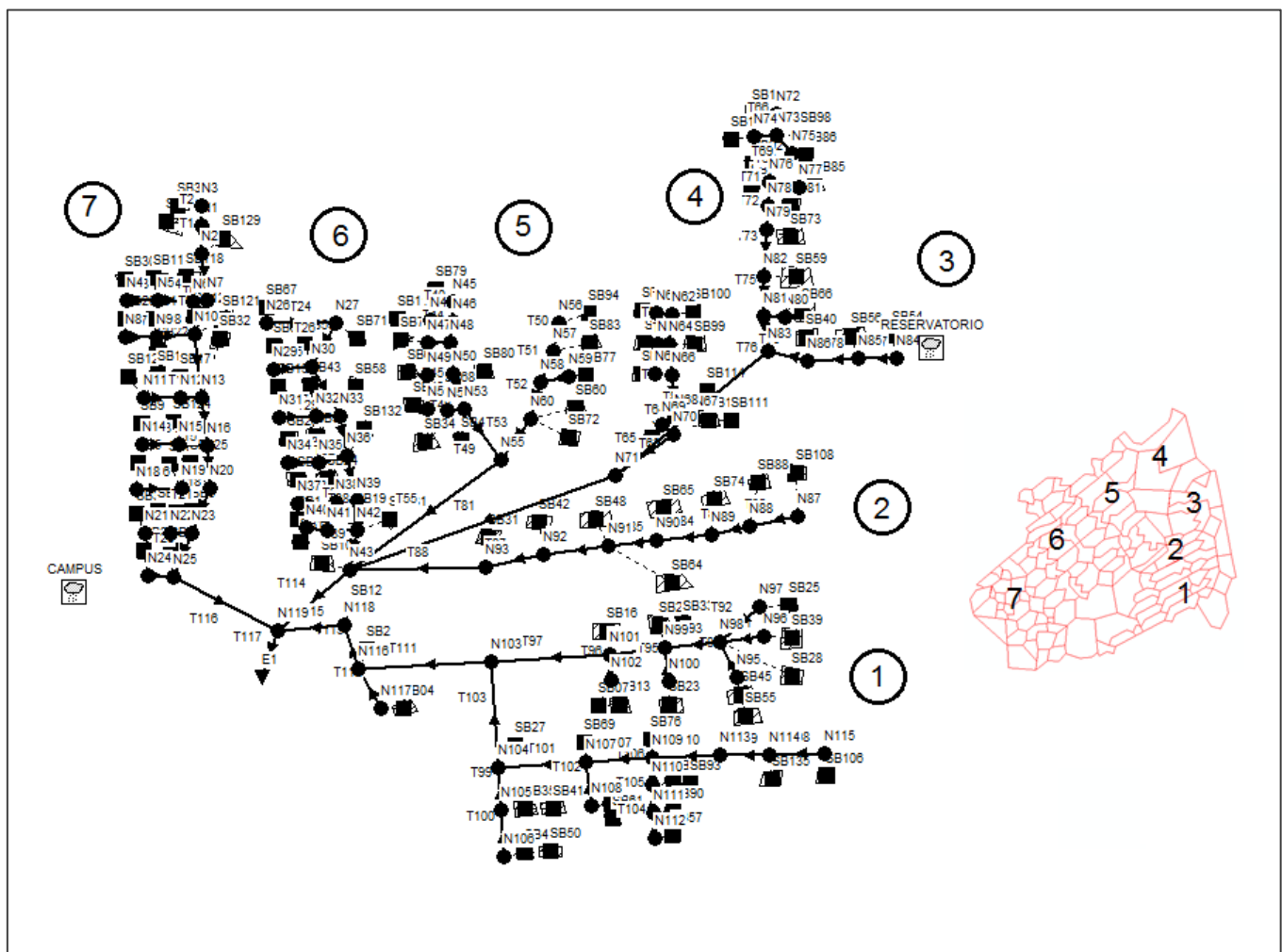


Fonte: Elaboração do autor.

No total, a bacia foi seccionada em 118 partes, sempre seguindo a cota de terreno e a área de influência de 45° a partir da esquina. Cada uma dessas sub-bacias se liga a um conduto, ou, em casos especiais, se liga a uma sub-bacia adjacente. O próximo passo foi construir no SWMM o esquema do sistema de drenagem, fazendo as conexões das sub-bacias com os condutos. A Figura 39 ilustra o resultado final.

Nota-se que existem sete canais principais de drenagem, cada qual drenando partes diferentes da cidade, todos esses canais principais descarregam no córrego aberto onde foi instalado o equipamento; em campanhas de campo, foi constatada a confluência dessas galerias como discriminado em projeto.

Figura 39 - Drenagem da Sub-bacia inserida no SWMM



Fonte: Elaboração do autor.

A próxima etapa foi a obtenção das características de cada sub-bacia. Algumas de fácil obtenção como área, comprimento e declividade das galerias. A porcentagem de área impermeável foi obtida via classificação do solo em áreas permeáveis ou impermeáveis. Posteriormente, foi realizada a estatística por zona para cada sub-bacia e definida sua porcentagem de área impermeável. O resultado do emprego desta técnica está ilustrado na Figura 40 e na Fonte: Elaboração do autor.

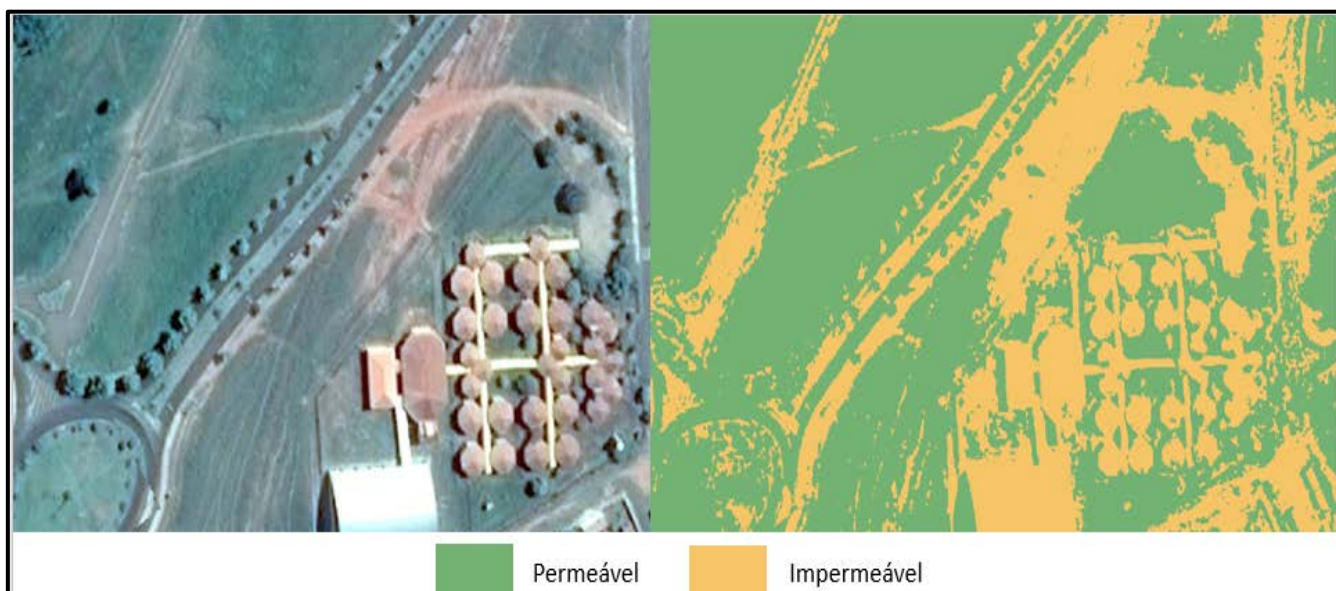
Figura 41.

Nota-se a maior taxa de impermeabilização no centro da cidade, parte oeste da bacia, e no bairro Jardim Aeroporto, parte leste. O que já era esperado visto que são as partes que concentram mais construções, sendo a parte mais permeável a faixa por onde passa a Avenida Atlântica.

Existem casos em que as sub-bacias estão quase completamente impermeabilizadas, com taxas acima dos 98 %, como é o caso da sub-bacia 22, ilustrada na Fonte: Elaboração do autor.

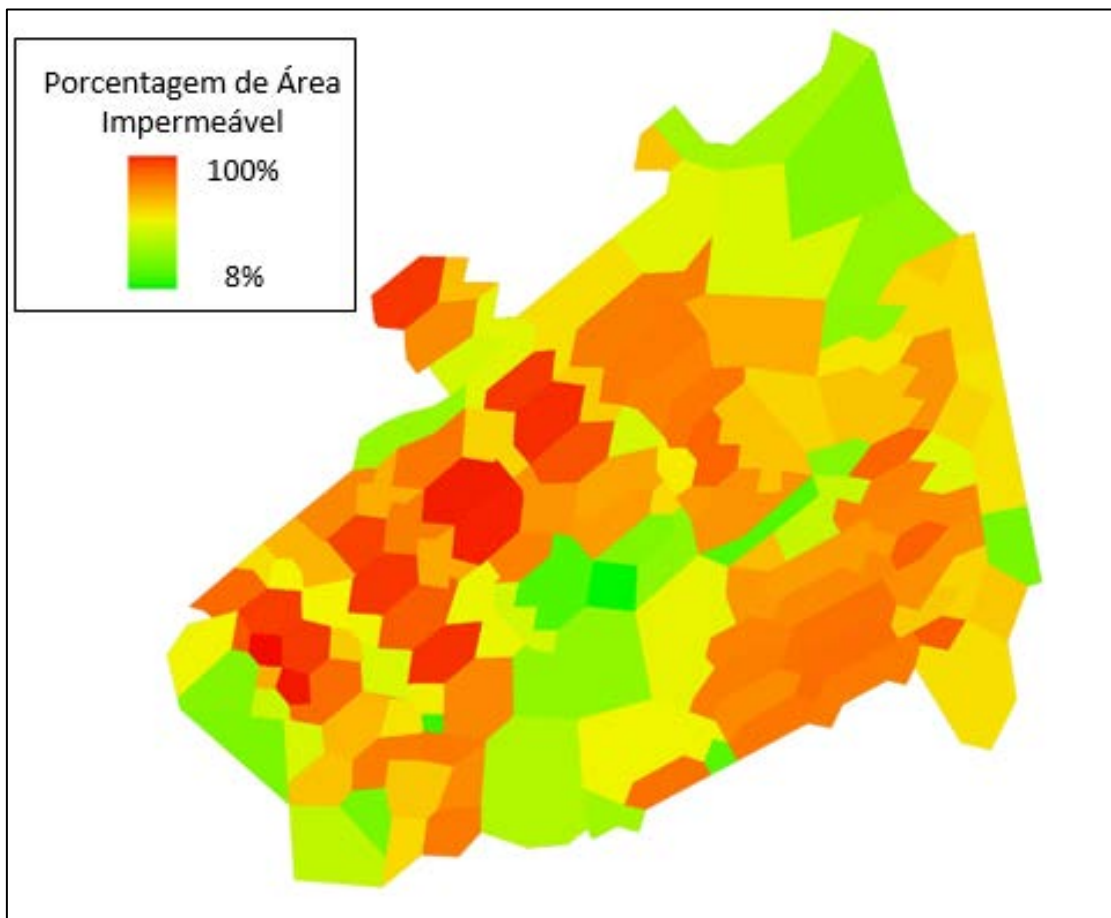
Figura 42. Em contrapartida, existem casos de bacias com taxa de impermeabilização muito baixa, como é o caso da sub-bacia 11.

Figura 40 - Classificação do Solo



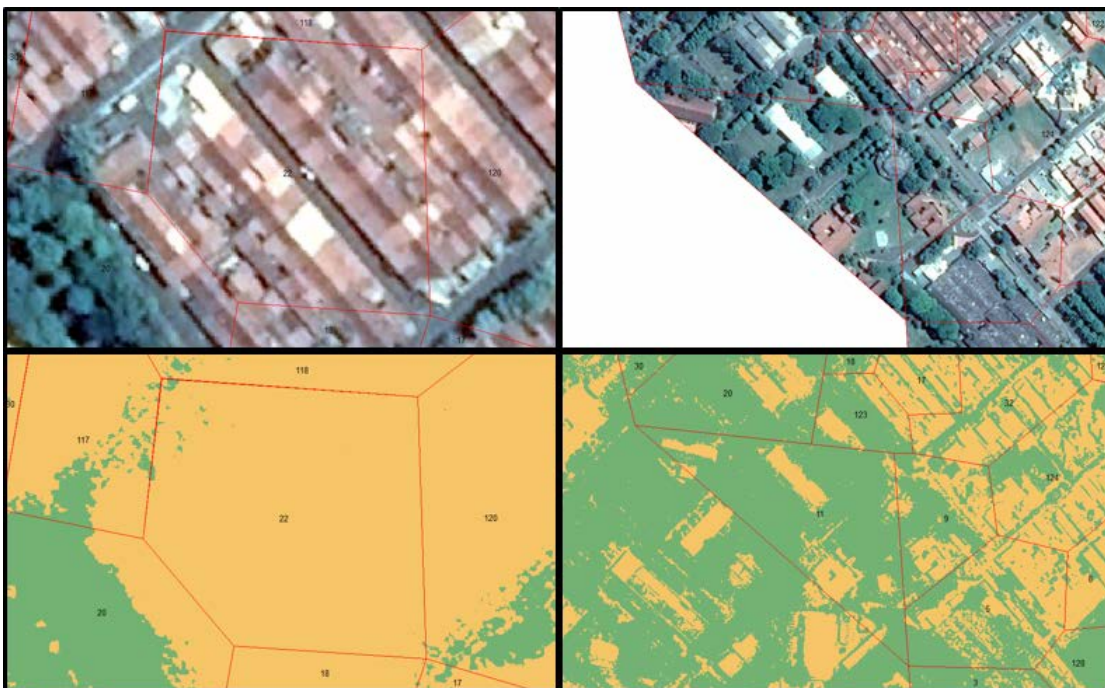
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 41 - Porcentagem de Área impermeável por Sub-bacia



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 42 - Exemplos de bacias com alto e baixo grau de impermeabilização.



Fonte: Elaboração do autor.

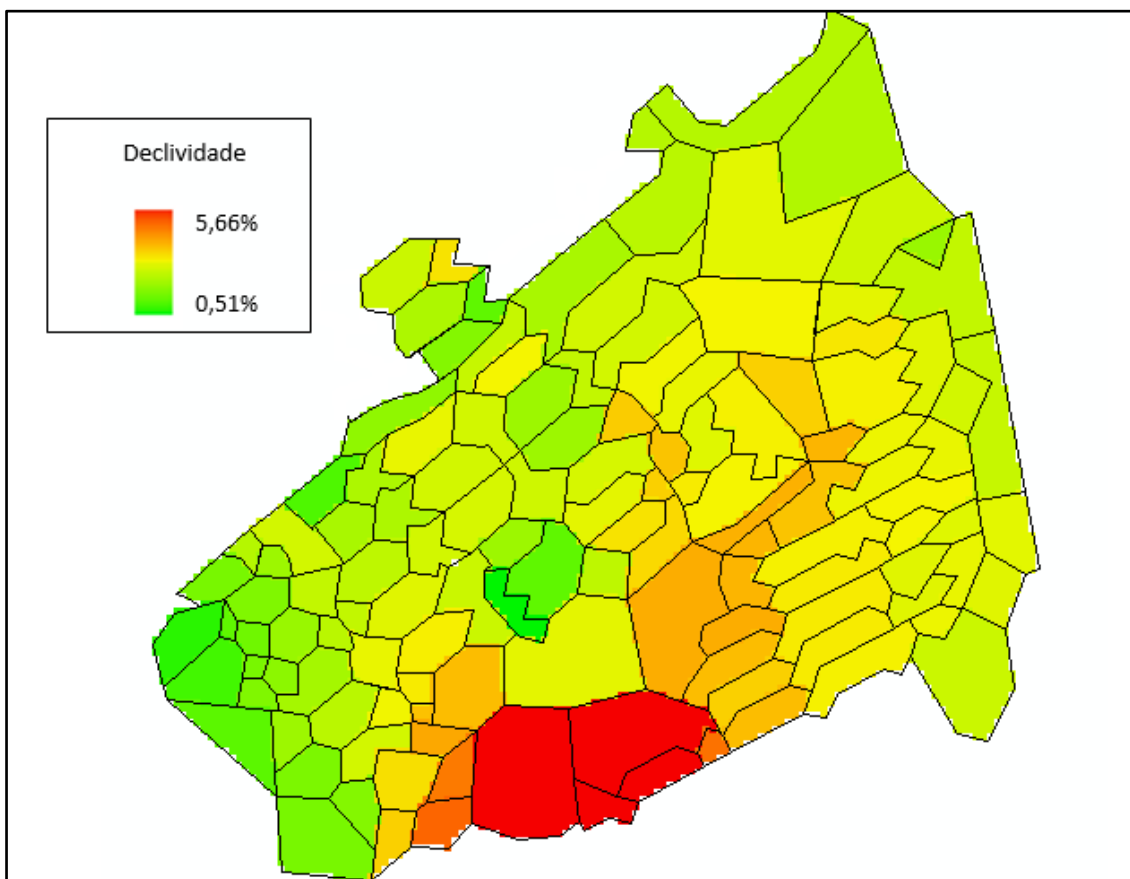
Nota-se também que a classificação conseguiu reproduzir de maneira fiel o grau de impermeabilização de cada parte, havendo apenas algumas falhas na classificação como, por exemplo, quando se tem solo exposto, conforme pode ser visto na figura Figura 40. Tal incoerência poderia ser removida utilizando a classificação manual do solo, o que não se aplica, pois demandaria um tempo excessivamente grande para pouca influência no resultado final.

Posteriormente, foram aplicadas as técnicas para obter as declividades médias de cada sub-bacia, cujos resultados estão expostos na Figura 43. Os valores variam de 0,5 % a 6%. O relevo impõe declividades mais baixas a oeste da bacia, a ocorrência de terrenos mais acentuados se dá próximo ao exutório, e percebe-se também que ao longe de todo o divisor topográfico as declividades são menores, afirmando assim o exposto na seção 4.2 na qual caracterizou a topografia com colinas amplas.

Para obter os valores das larguras das sub-bacias, foi medido o canal principal (sarjetas) de cada logradouro como a menor área de contribuição para poder calcular via equações 8 e 9.

Os resultados das características de cada sub-bacia estão discriminados na tabela do ANEXO B. Pela classificação do uso e ocupação do solo, constatou-se que a bacia está coberta de 67% de área impermeável, este valor está condizente com o valor amplamente usado na literatura (Coeficiente de deflúvio = 0,7).

Figura 43 - Declividades médias das sub-bacias



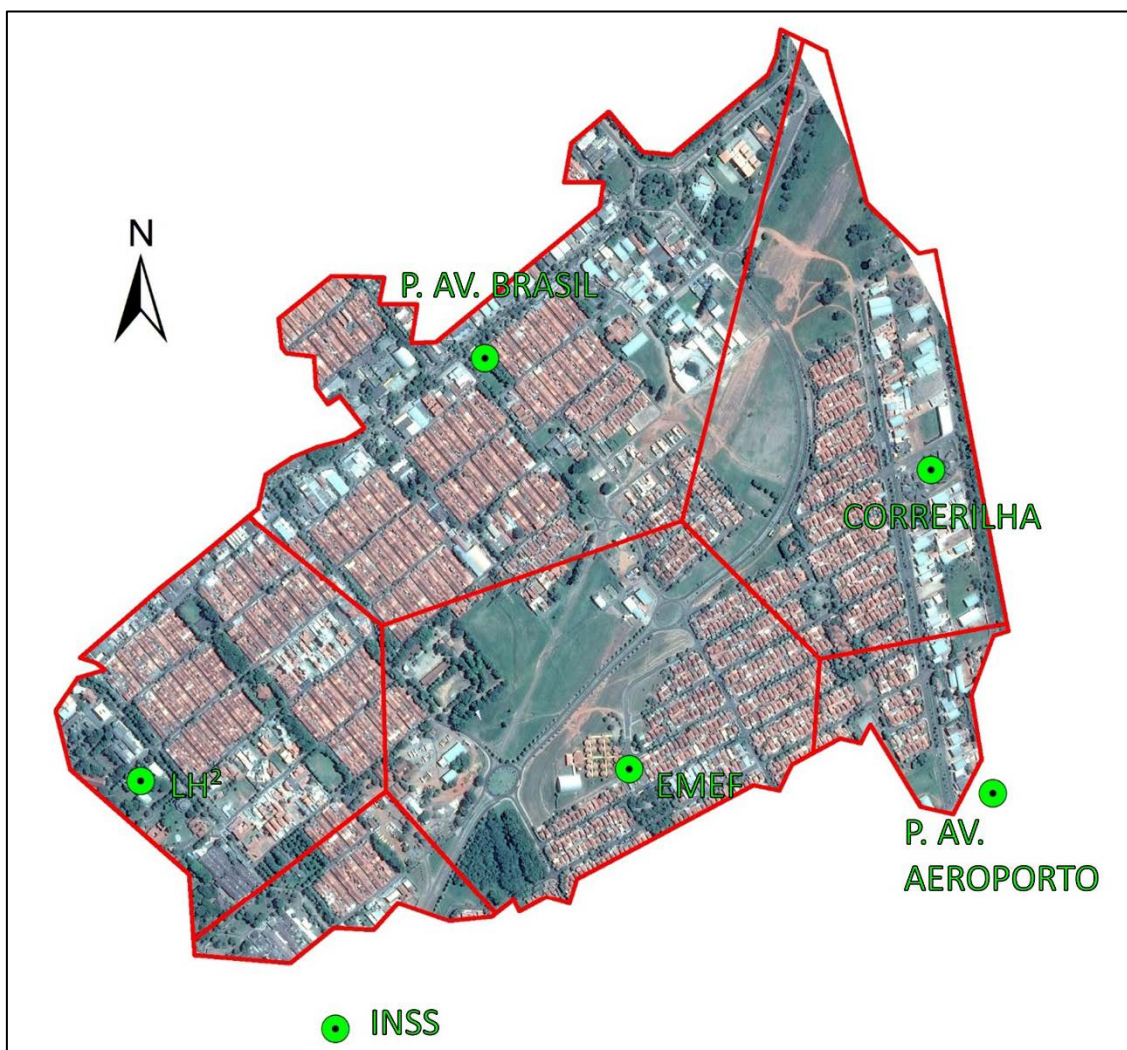
Fonte: Elaboração do autor.

Para os dados de infiltração, foram realizados os ensaios de infiltrômetro de duplo anel para seis localidades diferentes, conforme mostra a Figura 44, de acordo com a área de influência segundo polígono de Thiessen. Os resultados dos testes feitos e a curva teórica aproximada estão expostos na Fonte: Elaboração do autor.

Figura 45. A Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 6 sumariza os resultados obtidos, incluindo a correlação da curva teórica encontrada com os dados observados.

Figura 44 - Pontos de Infiltração amostrados



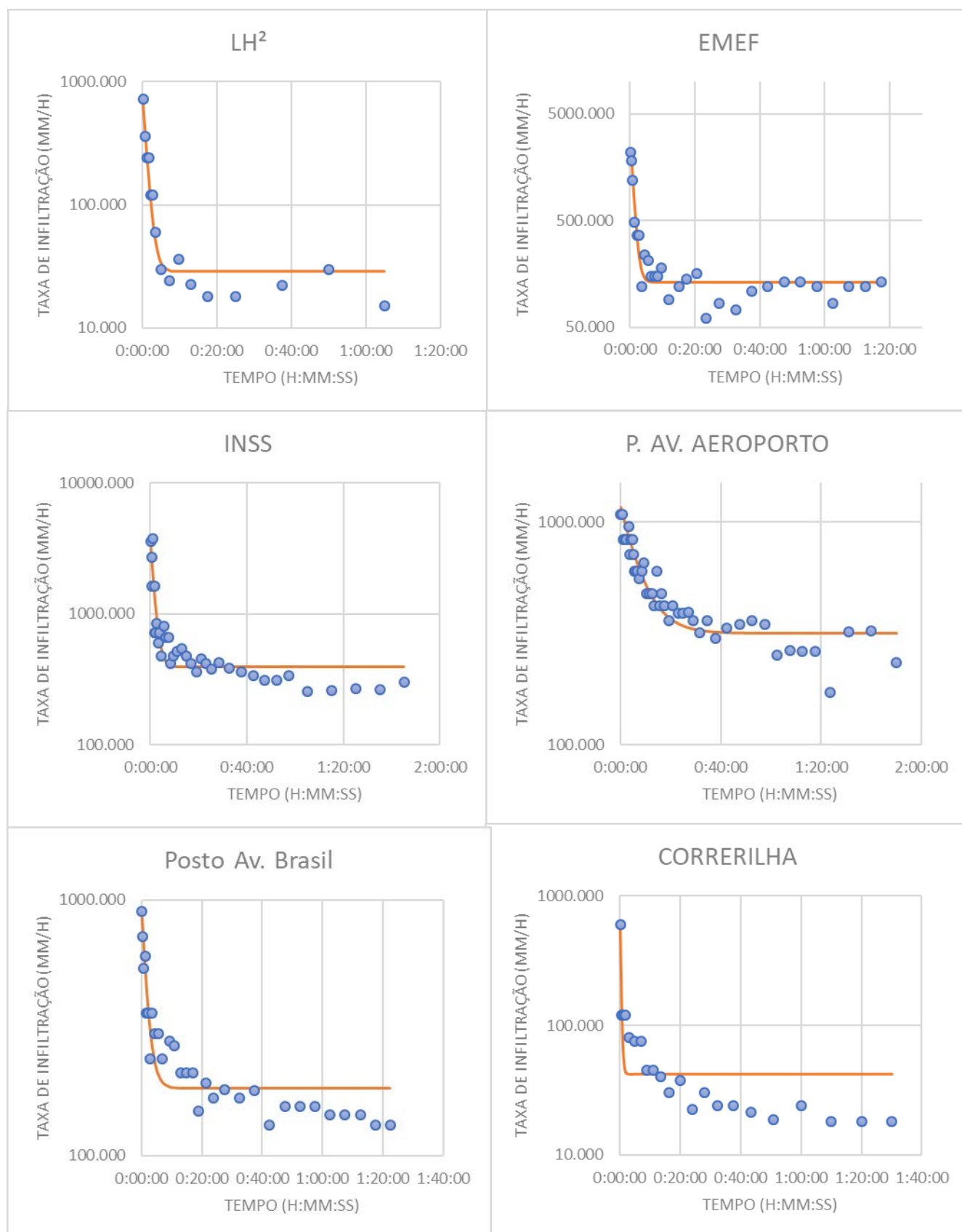
Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 6 - Parâmetros de Infiltração da Bacia.

NOME	Cordenadas		Parâmetros			R ²
	E	N	f [∞]	f0	K	
EMEF	465258	7741065	2699.98	132.04	73.32	98.25%
LH ²	464343	7741043	875.56	28.82	60.41	97.59%
CORRERILHA	465824	7741626	1325.98	42.09	201.15	94.33%
POSTO AV. BRASIL	464988	7741836	925.23	184.24	37.35	91.58%
POSTO AV. AEROP.	465939	7741020	1187.79	318.75	8.55	86.35%
INSS	464708	7740576	3947.57	394.35	41.28	81.18%
	Média		1827.02	183.38	70.34	

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 45 - Resultado dos testes de infiltração.



Fonte: Elaboração do autor.

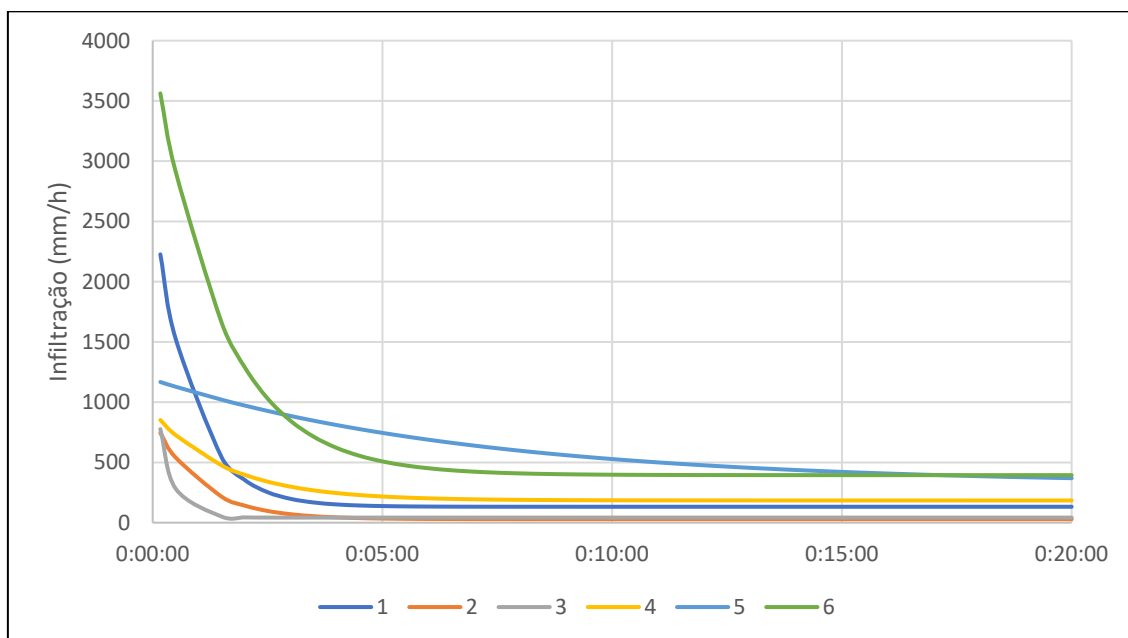
Percebe-se que houve uma boa correlação, de 98 a 82 %, entre o que foi observado e o que foi modelado, e isso sugere a adequação do modelo proposto à situação real, além de não terem sido observados erros sistemáticos durante os testes.

Nota-se a falta de dependência espacial dos parâmetros de infiltração. Conforme foi amplamente estudado na literatura, não se tem correlação espacial das propriedades de infiltração em grandes distâncias (JÁ LOAGUE; GANDER, 1990; SILVA JUNIOR *et al.* 2017; VLEIRA; NLFISEN; BLGGAR, 1981).

A Figura 46 mostra a diferença das curvas encontradas nos diferentes pontos, e verifica-se que existe uma grande variedade nos parâmetros entre os locais amostrados, além de não ter sido encontrado qualquer tipo de correlação espacial, sendo que os três parâmetros estudados: taxas de infiltração inicial, taxas de infiltração final e constante de decaimento, foram submetidas à krigagem ordinária e foi verificado o aparecimento do efeito pepita puro, corroborando a conclusão obtida. A Fonte: Elaboração do autor.

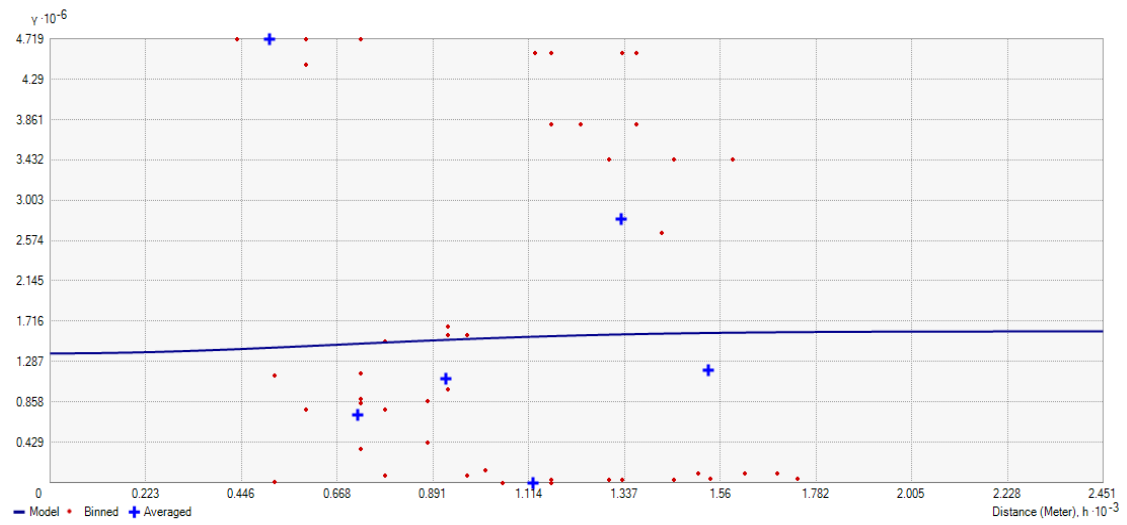
Figura 47 ilustra os semivariogramas obtidos.

Figura 46 - Curvas de infiltração obtidas nos diversos pontos.

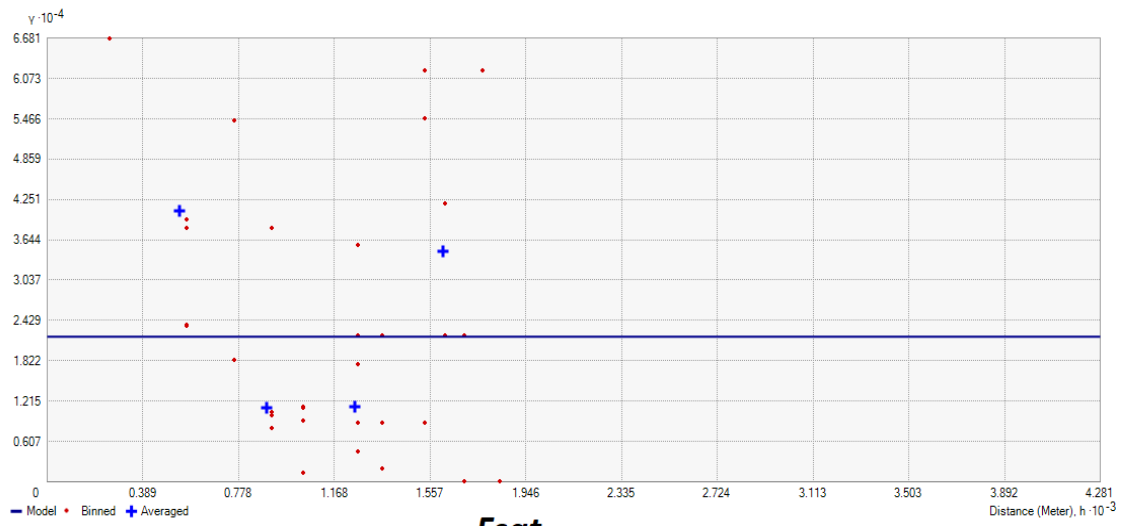


Fonte: Elaboração do autor.

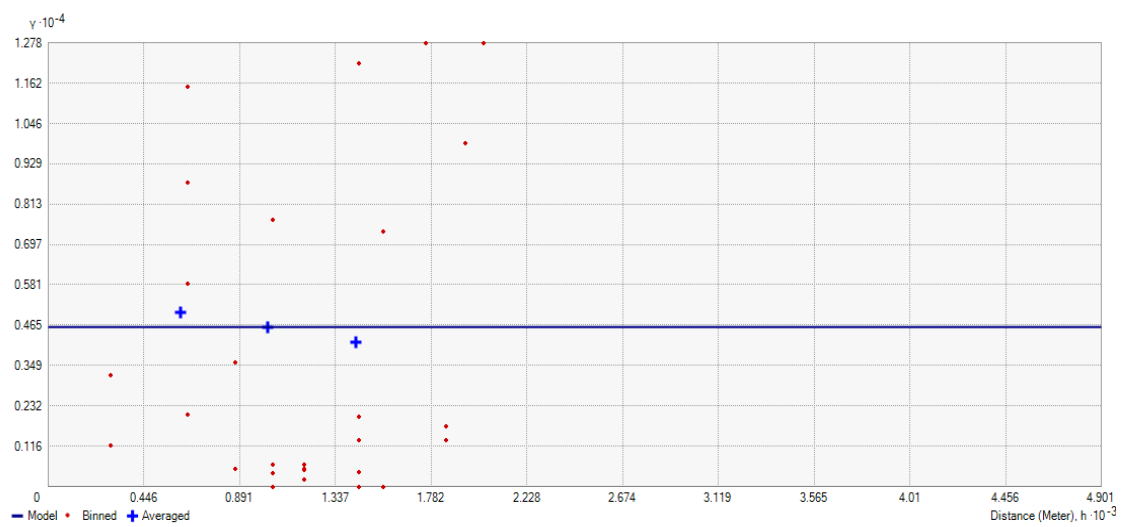
Figura 47 - Semivariograma dos parâmetros de Infiltração



F0



Fsat



K(decaimento)

Fonte: Elaboração do autor.

5.3 Validação da instrumentação

5.3.1 Calibração e consistência dos Pluviógrafos

A primeira etapa para a validação dos dados obtidos pela instrumentação é a calibração dos aparelhos.

Foram realizados dois testes com duas cargas diferentes no mariotte e os resultados estão demonstrados na Tabela 7. Conforme demonstrado nessa tabela, o pluviógrafo encontra-se adequado para uma chuva com intensidade de até 360 mm/h, valor mais do que suficiente para a realização do experimento.

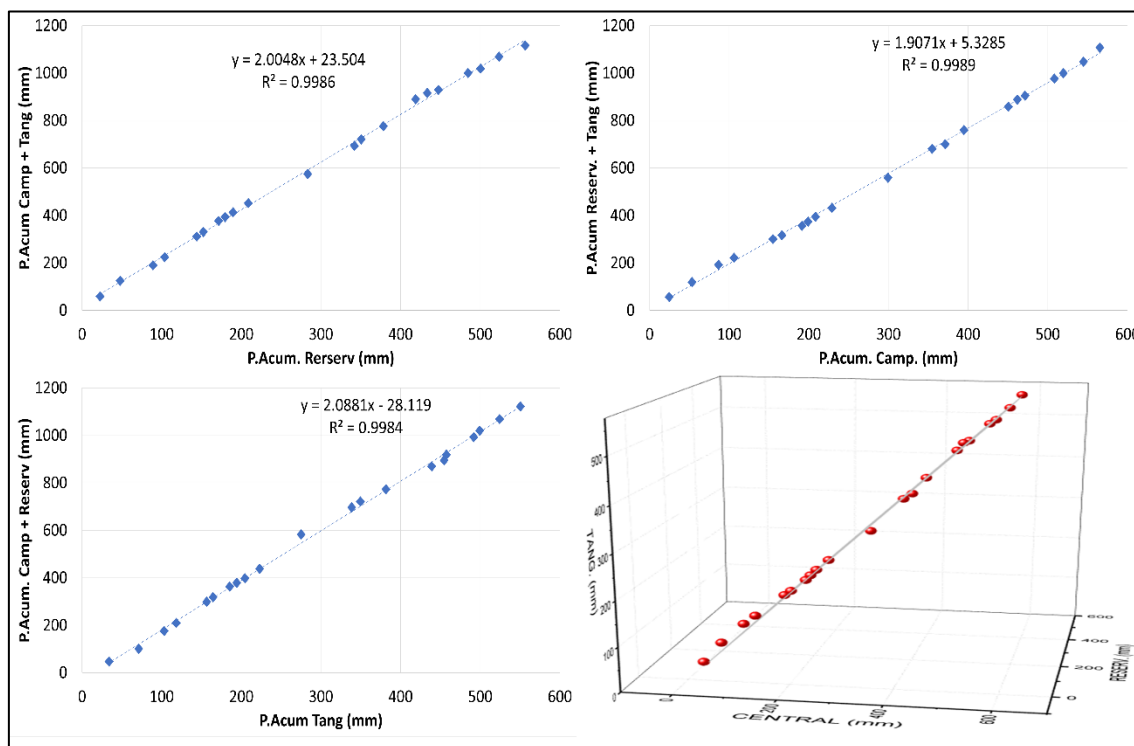
Tabela 7 - Resultados da calibração do pluviógrafo

Vol (ml)	100					$\rho(\text{g/cm}^3)$	0.9945			
Massa (g)	99.45									
Validação dos dados										
Teste	Q _{Mariote}			Δt Teórico(s)		Horário		nº de Bateladas		
	Massa (g)	T (s)	Q (ml/s)	1 mm	Batelada	Início	Final	Teór.	Med.	
1	208.7	74	2.835	11.078	2.215	3:28:03 PM	3:29:15 PM	32	32	OK!
2	169.1	60	2.833	11.085	2.217	3:43:57 PM	3:45:03 PM	30	29	OK!

Fonte: Elaboração do autor.

Durante o período estudado, foi realizada a análise da consistência dos dados obtidos nos três pluviógrafos em questão. Foram analisadas as alturas precipitadas, durante os eventos de calibração e validação, e, posteriormente, foi verificada a correlação entre as mesmas. A Figura 48 ilustra a correlação dos dados.

Figura 48 - Consistência dos dados de chuva Captados



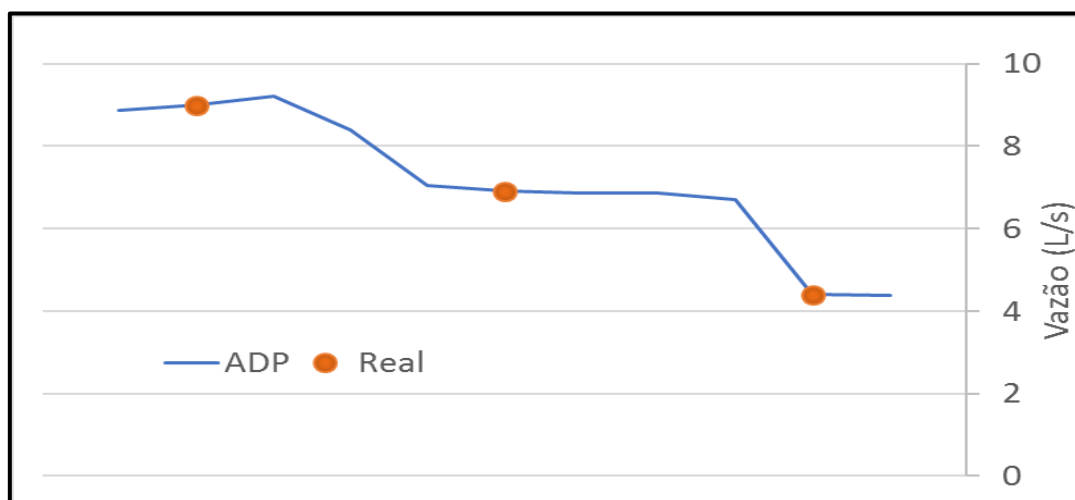
Fonte: Elaboração do autor.

Nota-se que todos os três pluviógrafos apresentam interdependência, com correlações obtidas da ordem de 99,9%. A análise do plano teórico, que representa a correlação dos dados dos três pluviógrafos, indicou uma correlação de 99,7%. Portanto, percebe-se que os dados obtidos estão todos corretos, não havendo, durante a condução do experimento, erros de natureza acidental que inviabilizassem os valores captados. Não houve também a detecção de *outliers* em nenhum evento.

5.3.2 Calibração e consistência do ADP

Durante o teste, foram utilizadas três vazões diferentes. A Figura 49 ilustra o resultado, no qual nota-se que, no momento em que a vazão se estabiliza, o equipamento traduz a vazão de maneira precisa. Portanto, é seguro afirmar que o ADP está calibrado.

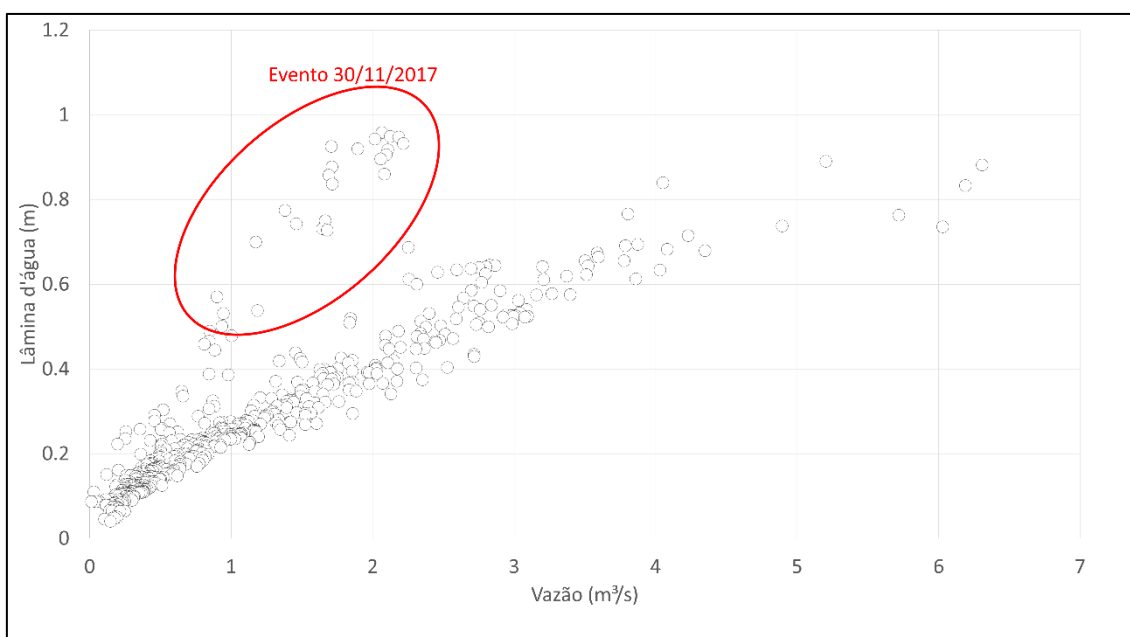
Figura 49 - Resultados da Calibração ADP



Fonte: Elaboração do autor.

Com o objetivo de detectar qualquer interferência nos dados captados, foi elaborada uma curva chave entre o nível e a vazão observada pelo equipamento. A Figura 50 ilustra a dispersão dos binários vazão/lâmina d'água. Percebe-se que existe um conjunto de pontos destoantes dos demais, referente ao evento do dia 30 de novembro, o que indica uma interferência ocorrida durante este evento, provavelmente a obstrução de algum objeto.

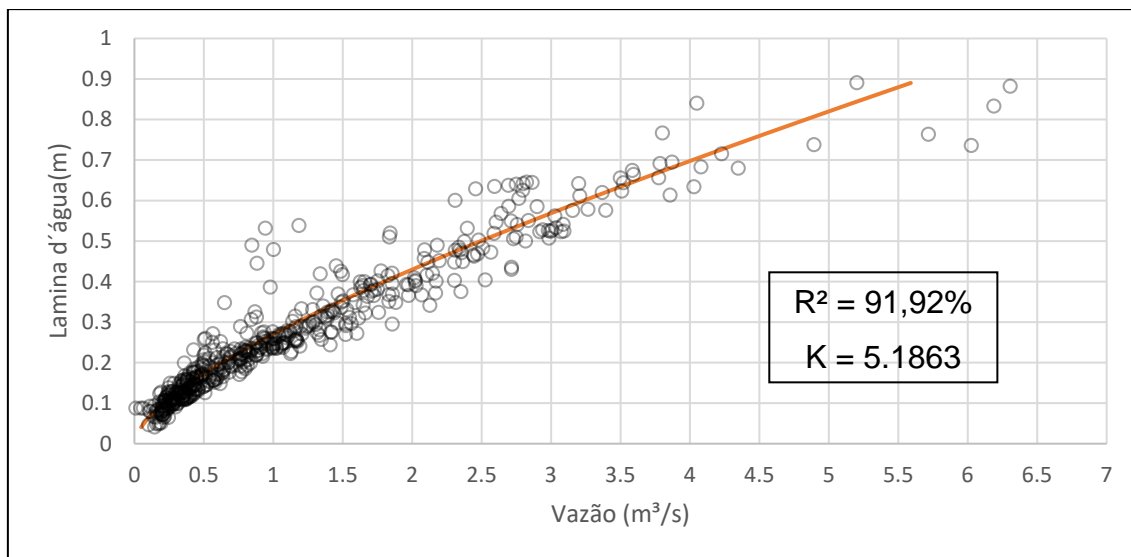
Figura 50 - Relação Vazão/lâmina d'água.



Fonte: Elaboração do autor.

A partir da exclusão destes pontos, foi então aproximada a curva chave no modelo de escoamento permanente uniforme, conforme a equação 26. É importante ressaltar que foram negligenciadas as parcelas de inércia e de pressão referentes ao escoamento não permanente; porém, tal aproximação é admissível nos parâmetros estudados, produzindo assim uma relação linear. A Figura 51 mostra a curva teórica ajustada.

Figura 51 - Curva-Chave do exutório da Bacia.



Fonte: Elaboração do autor.

A correlação de 92% indica uma boa representação do modelo, alguns desvios são naturais, devidos principalmente a eventuais obstruções, dejetos e falhas na leitura, além do efeito da não permanência do escoamento. De maneira geral, além do evento do dia 30 de novembro, não foram detectadas outras falhas na medição.

5.4 Análise da sensibilidade.

A sensibilidade foi testada para os parâmetros de Rugosidade da parcela permeável, impermeável, do conduto e da macrodrenagem, largura da bacia, porcentagem de área impermeável, infiltração e altura de armazenamento.

A escolha dos parâmetros foi feita seguindo o critério de incerteza, por exemplo, não se tem a noção do real valor da altura de armazenamento,

rugosidade da sub-bacia, nem dos condutos ou macrodrenagem. Em relação à largura, se utiliza a aproximação de uma bacia real a uma retangular, porém, esta conversão não é fiel. A porcentagem de área impermeável vem traduzir a questão das áreas diretamente conectadas, pois, como não se implementaram ferramentas capazes de identificar qual área está ou não conectada diretamente, é necessário ajustar tal parâmetro. A infiltração é uma variável de grande incerteza, principalmente devido à grande discrepância dos dados, conforme a seção 4.5.2, o que será discutido no decorrer do texto.

A escolha dos valores base dos parâmetros, assim como de seu limite superior ou inferior, foi feita de duas maneiras diferentes. Para as variáveis obtidas por meio do tratamento do banco de dados em SIG ou ensaios em campo, foram realizadas a majoração ou minoração dos valores, segundo um alcance pré-determinado em valores proporcionais. Já para os demais parâmetros, foi utilizada a literatura para estabelecer os limites. A Tabela 8 sumariza os valores utilizados para a sensibilidade. As simulações foram realizadas com o incremento ou decréscimo de 80% em relação ao limite inferior ou superior, tendo sempre como modelo base os valores médios, com a modificação apenas do parâmetro a ser estudado.

Tabela 8 - Valores testado para a avaliação da sensibilidade

	η_{Perm}	η_{Imp}	η_{Cond}	η_{Mac}	Larg.	%AI	i%	Inf	Arm.
Lím. Inf	0.05	0.01	0.01	0.05	-X100%	-X150%	-X100%	-X100%	0
Base	0.275	0.03	0.02	0.175	SIG	SIG	SIG	CAMP	3
Lím. Sup	0.5	0.05	0.03	0.3	X100%	X150%	X100%	X100%	6

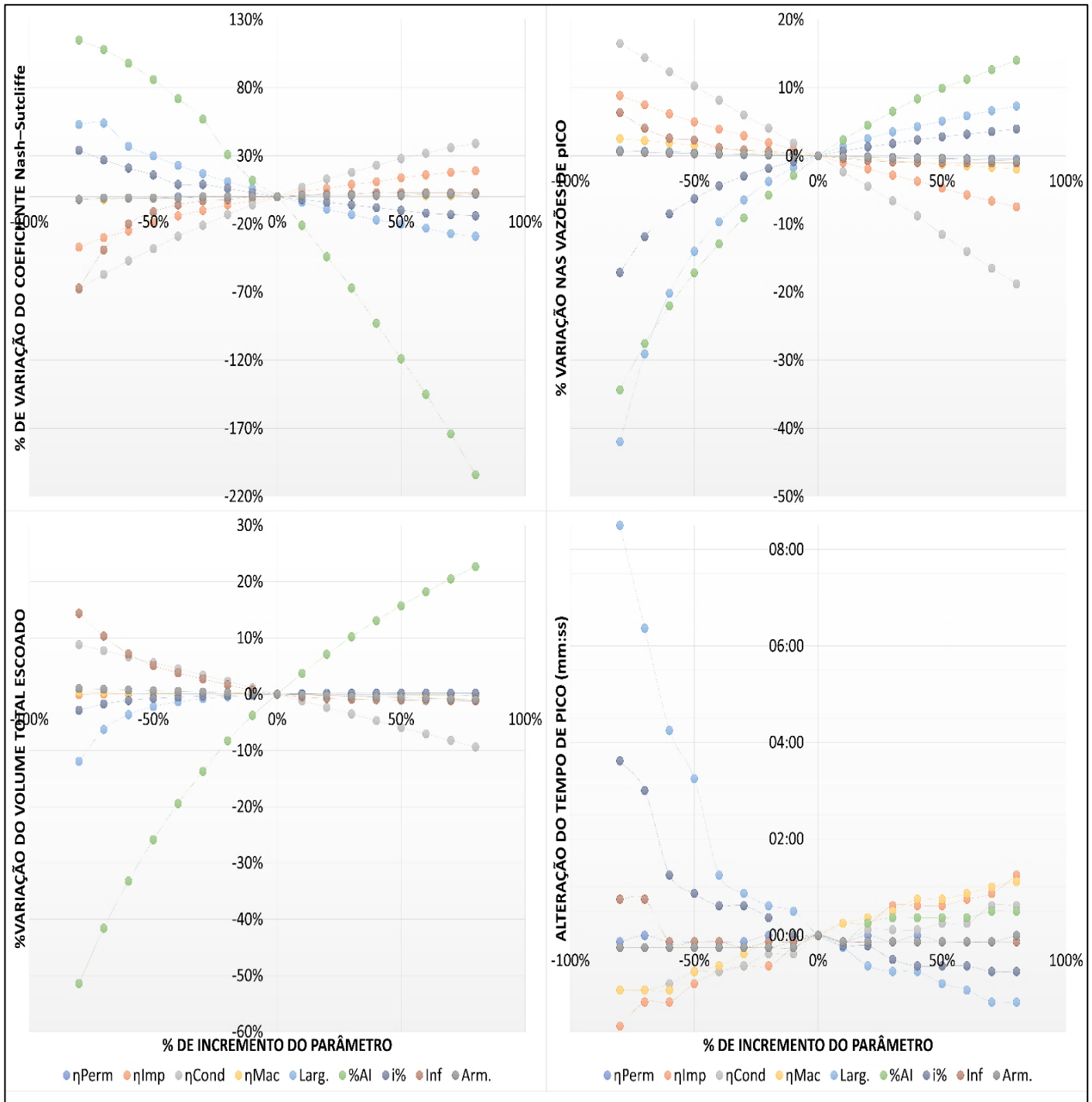
Fonte: Elaboração do autor.

Foi testada a resposta do modelo para quatro parâmetros diferentes, três (vazão de pico, volume escoado e tempo de pico) que estão intimamente ligados à forma do hidrograma e um que traduz os anteriores em um coeficiente de concordância (coeficiente de eficiência); assim, é possível obter a real noção de como a variável influi no hidrograma e se a mesma influi ou não na eficácia do modelo. A Figura 52 expõe os resultados obtidos.

A simulação foi realizada para os mesmos eventos que foram calibrados, ou seja, um total de 18; a média de todos os eventos para cada simulação foi estabelecida e depois parametrizada com o valor do modelo base. Com isso, foi

possível obter a variação do parâmetro em relação ao valor inicial pré-estabelecido na literatura ou no SIG.

Figura 52 - Resultado das análises da sensibilidade



Fonte: Elaboração do autor.

A porcentagem de área impermeável é muito sensível ao volume total escoado, vazão de pico e, conseqüentemente, ao coeficiente de eficiência;

sendo o parâmetro mais sensível de todos os estudados, conforme já noticiado na literatura e discutido na revisão bibliográfica. Já em relação ao tempo de pico, tal variável não apresenta muita sensibilidade.

A largura da bacia é outro parâmetro importante que gera alta sensibilidade em todos os parâmetros estudados, sendo o parâmetro mais sensível do tempo de pico e o segundo mais sensível tanto no coeficiente de eficiência quanto na vazão de pico. Para o volume escoado, a variável é sensível apenas para valores de largura muito pequenos.

A inclinação da sub-bacia é sensível à vazão de pico, coeficiente de eficiência e vazão de pico, sendo mais acentuada quando se tem baixa inclinação, também de acordo com o exposto na literatura.

A rugosidade dos condutos é outro fator de muita sensibilidade com relação a todos os indicadores estudados, apresentando comportamento linear na vazão de pico. A alta sensibilidade deste parâmetro chama atenção para um problema recorrente em praticamente todo território nacional: a negligência com a conservação das galerias, que pode se tornar depósito de dejetos, alterando a rugosidade natural do material e, por consequência, levar a mudanças bruscas no comportamento do escoamento, gerando assim alagamentos e enchentes.

Os valores base utilizados foram as médias dos ensaios de campo realizados conforme a Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 6. A infiltração é sensível para valores em que há grande redução da mesma, isto devido ao fato de se ter encontrado valores altos de taxas de infiltração; portanto, para os valores iniciais, praticamente tudo que chove infiltra.

A rugosidade da parcela impermeável é sensível à vazão de pico, tempo de pico e coeficiente de eficiência; já a rugosidade da macrodrenagem é sensível ao tempo de pico e levemente sensível à vazão de pico e ao coeficiente de eficiência. Os parâmetros rugosidade da parcela permeável e altura de armazenamento não apresentaram sensibilidade significativa.

Na Tabela 9 está apresentado o comportamento do modelo de acordo com os parâmetros estudados (sempre levando em conta o incremento da variável estudada). O coeficiente de eficiência não foi avaliado de acordo com o

seu aumento ou diminuição, pois é um critério relativo, ou seja, que varia de acordo com os valores base estabelecidos, e o aumento, ou diminuição, dos parâmetros pode levar a resultados diferentes.

Tabela 9 - Sensibilidade dos Modelos Aos Parâmetros estudados

	COE	Vazão de Pico	Volume Escoado	Tempo de Pico
η_{Perm}		Diminui	Insignificante	Insignificante
η_{Imp}		Diminui	Diminui	Aumenta
η_{Cond}		Diminui	Diminui	Aumenta
η_{Mac}		Diminui	Insignificante	Aumenta
Larg.		Aumenta	Aumenta	Diminui
%AI		Aumenta	Aumenta	Aumenta
i%		Aumenta	Aumenta	Diminui
Inf		Diminui	Diminui	Diminui
Arm.		Diminui	Diminui	Insignificante
Legenda				
Pouco sensível		Sensível		Muito sensível

Fonte: Elaboração do autor.

5.5 Calibração do Modelo

Ao todo, foram captados 35 eventos significativos que geraram lâmina d'água, dos quais 31 foram suficientemente fortes para gerar vazão adequada de estudo (13 antes de estiagem e 18 depois). As intensidades máximas variaram de 192 a 24 mm/h. O Volume total precipitado variou de 3.4 a 72 mm, e a duração das chuvas foi de 11 a 69 minutos.

Para a calibração e validação, foi pensada, inicialmente, a utilização de eventos aleatórios isolados para a avaliação; porém, foi constatado que os períodos anteriores sem chuva eram um fator que influenciava no resultado. Portanto, foi escolhido um período pré-determinado para calibração e outro para a validação. A calibração ocorreu no tempo de pós-estiagem, de 28 de outubro a 26 de dezembro, totalizando 18 eventos; a validação foi estudada no período

pré-estiagem de 11 de abril à 20 de maio, com o total de 13 eventos. Os eventos captados estão expostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Eventos Captados.

Nº	DATA	ALTURA PREC.(mm)	T DE PREC.(min)	I Max (mm/h)	I Med (mm/h)	QMax (L/S)	Tipo
1	11-abr	19.4	64	84	18.2	4108	V
2	12-abr	10.3	15	114	41.2	4839	V
3	12-abr	16.3	45	75	21.7	5994	V
4	20-abr	26.9	44	84	36.7	6153	V
5	20-abr	4.5	60	24	4.5	572	B.I
6	21-abr	11	37	72	17.8	2656	V
7	21-abr	5.5	11	60	30.0	2239	V
8	4-mai	16.6	33	61	30.2	5300	V
9	4-mai	12.2	44	61	16.6	3848	V
10	4-mai	13.7	25	114	32.9	8360	V
11	15-mai	9	22	53	24.5	2608	V
12	18-mai	22.3	16	167	83.6	7491	V
13	19-mai	7.9	34	46	13.9	2883	V
14	20-mai	9.7	41	48	14.2	2591	V
15	28-out	24.3	54	99	27.0	5522	C
16	30-out	3.6	18	42	12.0	870	B.I
17	30-out	15.4	27	175	34.2	5187	C
18	1-nov	72	69	192	62.6	13876	C
19	4-nov	3.4	10	30	20.4	2198	B.I
20	4-nov	32.4	30	175	64.8	9568	C
21	4-nov	11	44	96	15.0	3497	C
22	4-nov	6.2	60	15	6.2	1139	B.I
23	6-nov	12.5	43	53	17.4	3134	C
24	27-nov	5.9	24	36	14.8	3064	C
25	27-nov	11.4	30	66	22.8	5648	C
26	27-nov	7	30	68	14.0	4466	C
27	30-nov	48.1	68	114	42.4	5148	C
28	1-dez	6.5	35	24	11.1	3113	C
29	1-dez	6.5	27	60	14.4	4034	C
30	12-dez	11.8	29	102	24.4	5074	C
31	18-dez	37	38	144	58.4	6302	C
32	20-dez	13	26	54	30.0	5976	C
33	25-dez	24.3	37	96	39.4	6808	C
34	26-dez	9.1	30	60	18.2	3282	C
35	26-dez	13.4	26	72	30.9	3751	C

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nota: V: Validação; C: Calibração; B.I.: Baixa Intensidade.

A calibração ocorreu mediante análise da média dos 18 eventos de calibração de cinco indicadores de correlação, são eles:

- Coeficiente de Eficiência (COE)
- Índice de correlação (IC)
- Raiz do erro médio quadrático (RMSE)
- Erro na vazão de Pico (EQP)
- Erro no Tempo de Pico (ETP)

O erro no volume escoado, indicador amplamente utilizado nos trabalhos atuais, não foi utilizado devido ao fato da impossibilidade de medição da vazão pelo equipamento, quando a lâmina d'água é inferior a seis centímetros. Sendo assim, a recessão do hidrograma não é fielmente observada, de modo que é impossível calcular o volume real escoado.

O erro na vazão de pico e o erro no tempo de pico foram utilizados para verificar o desempenho do modelo quanto aos parâmetros mais importantes no contexto da hidrologia urbana; e foram também utilizados como critérios de dimensionamento de sistemas de drenagem.

A raiz do erro médio é um parâmetro que visa avaliar o desvio médio do modelado em relação ao observado, com a função de avaliar a magnitude do erro. Os indicadores COE e IC são utilizados para sumarizar todas as nuances do hidrograma, e avaliar o encaixe geral do modelo.

Os parâmetros modificados para calibração foram os mesmos utilizados para a análise da sensibilidade, com exceção da altura de armazenamento e rugosidade da parcela permeável, pois, segundo a Figura 52, não apresentaram sensibilidade significativa. Os valores finais dos parâmetros estão discriminados na

Tabela 11, sendo que para a largura da bacia, porcentagem de área impermeável, inclinação e infiltração foram utilizados multiplicadores para modificar, proporcionalmente e individualmente, cada uma das sub-bacias de acordo com os valores base identificados no processamento dos dados em SIG.

Tabela 11 - Valores dos Parâmetros Calibrados

η_{Imp}	η_{Cond}	η_{Mac}	Larg.	%AI	i%	Inf(inf)	inf(sat)
0.015	0.014	0.025	-39%	-53%	31%	-78%	-78%

Fonte: Elaboração do autor.

A rugosidade da parcela impermeável da sub-bacia está de acordo com o utilizado na literatura; tal parâmetro varia, significativamente, de trabalho para trabalho, porém sempre na escala encontrada. A rugosidade do conduto está compatível com os valores utilizados em todo o mundo para tubos de concreto (entre 0,012 e 0,016 dependendo da condição da galeria) (PORTO, 2006). A rugosidade da macrodrenagem também está de acordo com o exposto por Porto (2006) para canais com revestimento de vegetação rasteira e/ou pedregulho.

A compatibilidade dos valores de rugosidade com os encontrados na literatura, indica que o modelo elaborado tem relevância hidráulica, ou seja, os parâmetros realmente representam os fenômenos físicos que estão ocorrendo na bacia, e não apresentam valores absurdos, que, se utilizados, seriam apenas coeficientes para compatibilizar o observado ao modelado, sem nenhum sentido físico.

A diminuição da largura da bacia em 39 % indica que o método proposto por Guo e Urbonas (2009) para compatibilizar as dimensões da bacia não funcionou bem no modelo proposto, sendo necessária sensível alteração.

A diminuição sensível da área impermeável vem traduzir a influência das áreas indiretamente conectadas. O processo de classificação do solo não permite a diferenciação entre o que está diretamente ou não conectada a rede de drenagem, sendo, portanto, necessário minorar este parâmetro.

É importante ressaltar que a bacia, embora seja completamente urbanizada, apresenta boa parcela de área permeável em relação às outras bacias urbanas, muito devido ao nível de desenvolvimento da cidade estudada. Isto leva ao aparecimento de mais áreas indiretamente conectadas e a maior minoração do parâmetro porcentagem de área permeável no modelo.

A inclinação sofreu alteração muito provavelmente devido à resolução espacial da topografia disponível e pelo fato da bacia ser muito plana; o que caracteriza alta sensibilidade, conforme foi discutido na revisão bibliográfica e ratificado na análise de sensibilidade do modelo. Portanto, qualquer pequena alteração na inclinação das sub-bacias gerará forte modificação no resultado.

A infiltração foi drasticamente diminuída. O processo de urbanização naturalmente compacta o solo em algumas áreas, o que gera diminuição drástica na infiltração (Gregory *et al.* 2006). Portanto, muito embora os testes de infiltração tenham levado a valores médios altos, isto não representa fielmente os valores encontrados em toda a bacia. Desse modo, esta modificação é justificável para traduzir esta parcela de solo que apresenta baixas taxas.

Durante o desenvolvimento do projeto, ocorreu a queda de árvores no canal de macrodrenagem conforme mostra a Figura 53. Isto provocou alteração no escoamento da bacia quando se veiculava maiores vazões, pois os troncos apresentavam obstruções em maiores lâminas d'água.

Figura 53 - Árvores tombadas no canal de macrodrenagem.



Fonte: Elaboração do autor.

Para representar tal peculiaridade, foi inserida no modelo uma estrutura hidráulica que pode traduzir o fenômeno. Um orifício de grandes dimensões com altura significativa possibilitou que, quando a lâmina apresentasse valores mais altos, começasse a sofrer influência do “barramento artificial”. As dimensões do orifício utilizado foram 0,8m de altura por 1m de comprimento, com coeficiente de descarga igual a 0,65.

Tal fato mostra que cada bacia representa uma situação diferente, e que o desenvolvedor do modelo terá que apresentar soluções criativas para contornar problemas reais, sendo imprescindível o entendimento do comportamento hidráulico das equações, assim como o sentido físico de cada nuance.

5.6 Eficiência do Modelo e Validação

Os resultados referentes aos eventos de calibração estão expostos na Tabela 12. Percebe-se que o evento do dia 30 de novembro apresenta indicadores muito aquém do esperado. Foi constatada, na análise de consistência dos dados feita na seção 5.3.2, que tal evento apresentou alguma falha na medição, ou possível obstrução do canal.

Portanto, foi realizada a análise de *outliers* pelo método de Grubs e foi constatado que se tratava de um evento singular, podendo assim ser retirado da avaliação e composição dos indicadores. Tal exclusão não é rara em trabalhos desse tipo, pois a bacia apresenta inúmeras situações em que pode ocorrer erros na leitura; alguns trabalhos optam por escolher apenas eventos significativos, outros estabelecem critérios para exclusão, como Tan *et al.* (2008).

Tabela 12 - Indicadores de eficiência para os eventos de calibração

DATA	H PRECIP. (mm)	Imax(mm/h)	Qmax OBS. (L/S)	COE	IC	RMSE (L/S)	EQP	ETP
28-out	24.3	99	5522	0.71	0.93	903	-3.3%	0:02:00
30-out	15.4	175	5187	0.52	0.91	1184	-50.3%	0:02:00
1-nov	72	192	13876	0.73	0.93	1799	5.3%	0:06:00
4-nov	32.4	175	9568	0.72	0.93	1469	-15.0%	0:06:00
4-nov	11	96	3497	0.52	0.89	360	-0.8%	0:04:00
6-nov	12.5	53	3134	0.69	0.93	466	-2.0%	0:04:00
27-nov	5.9	36	3064	0.82	0.94	336	28.8%	0:00:00
27-nov	11.4	66	5648	0.52	0.87	790	34.8%	-0:02:00
27-nov	7	68	4466	0.48	0.82	898	42.5%	-0:02:00
30-nov	48.1	114	5148	-2.05	0.63	3132	-81.2%	-0:12:00
1-dez	6.5	24	3113	0.43	0.81	619	40.0%	-0:02:00

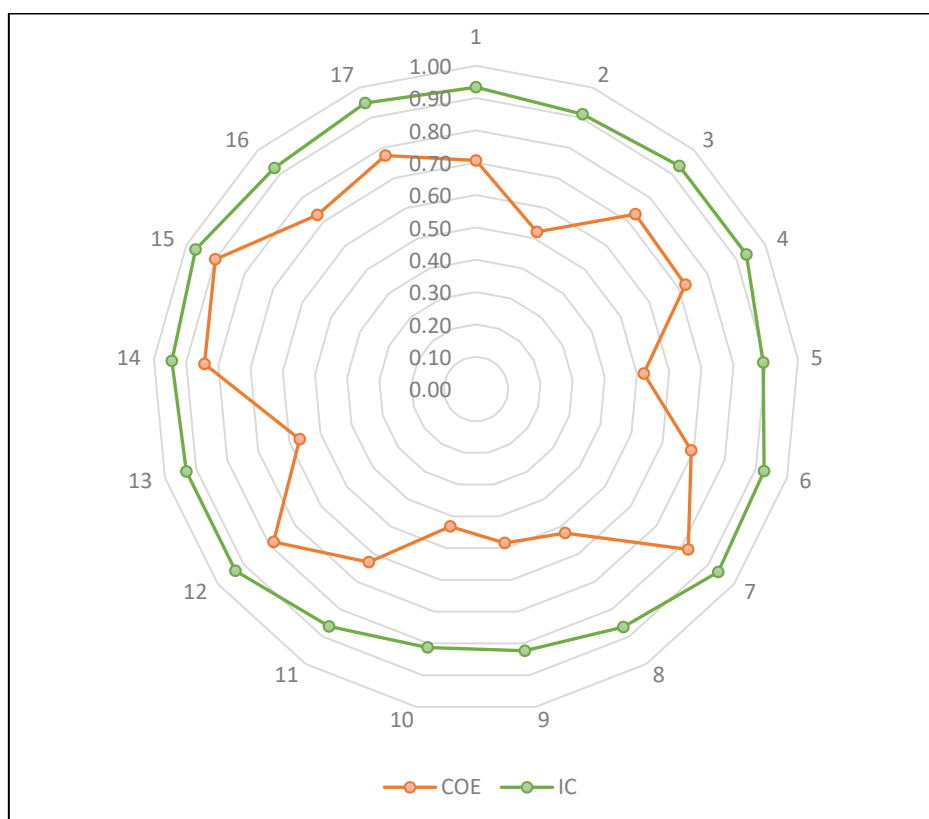
1-dez	6.5	60	4034	0.63	0.86	703	39.8%	-0:04:00
12-dez	11.8	102	5074	0.78	0.93	751	6.4%	0:00:00
18-dez	37	144	6302	0.57	0.93	1435	-32.4%	0:10:00
20-dez	13	54	5976	0.84	0.94	765	27.3%	0:00:00
25-dez	24.3	96	6808	0.90	0.97	707	20.6%	0:00:00
26-dez	9.1	60	3282	0.73	0.93	478	10.4%	-0:02:00
26-dez	13.4	72	3751	0.77	0.95	582	-5.4%	0:02:00
			Média	0.67	0.91	837	21%	0:02:40

Fonte: Elaboração do autor.

As figuras a partir da Figura 54 até a Fonte: Elaboração do autor.

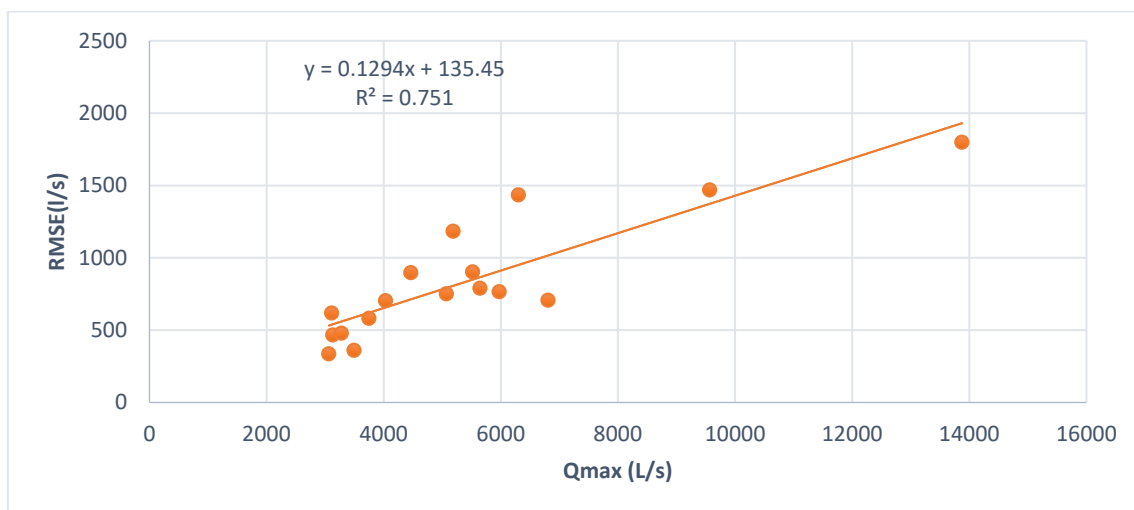
Figura 57 ilustram o desempenho de todos os eventos relativos a cada indicador estudado. Os hidrogramas observados e simulados de todos os eventos estão presentes no anexo C.

Figura 54 - COE e IC dos eventos de Calibração



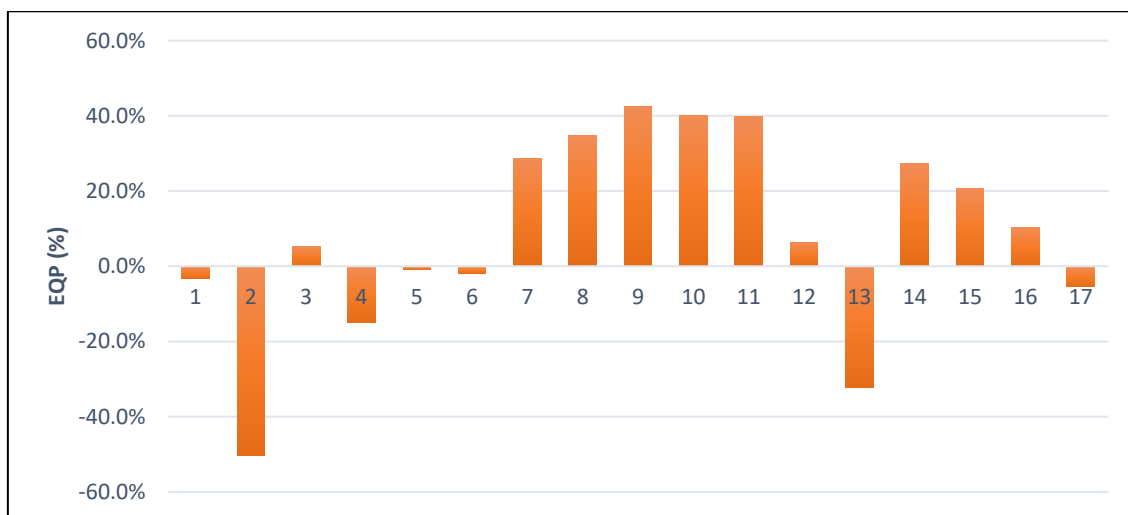
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 55 - RMSE versus Vazão Máxima Observada - Calibração



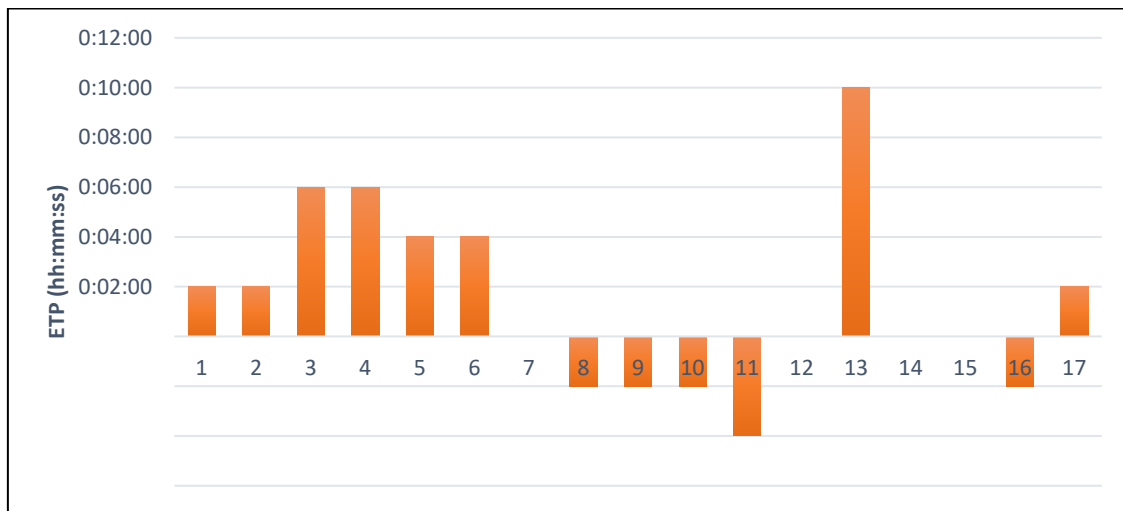
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 56 - Erro da Vazão de Pico - Calibração



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 57 - Erro no Tempo de Pico - Calibração



Fonte: Elaboração do autor.

Considerando-se que o modelo foi testado para muitos eventos (mais que a maioria dos trabalhos atuais) em uma bacia pequena, cuja resposta é intempestiva. Os indicadores de eficiência COE e IC indicam que o modelo proposto é satisfatório. Como mostrado na Tabela 5, os valores situam-se dentro dos encontrados na literatura com mínimo de 0,43, máximo de 0,90 e média de 0,67. Sendo poucos eventos com COE menor que 0,50 (limite para adequabilidade satisfatória) e mesmo os que estão abaixo estão ao redor deste valor.

O RMSE indica que a raiz do erro médio quadrático ao longo dos eventos está em torno de 13 % da vazão máxima observada, conforme indica a reta estimada na Fonte: Elaboração do autor.

Figura 55. Tal erro é um parâmetro de boa conformidade entre o modelado e observado.

O erro na vazão de pico alcançou, em alguns eventos, valores significativos de até 50 %, em outros o desempenho do modelo foi muito próximo ao real (menos de 10%). A média de erro, na casa dos 21%, indica que são possíveis alguns melhoramentos no modelo. A possível fonte deste erro é a falta de, no mínimo, mais um pluviógrafo, conforme será discutido na seção 5.7. Porém, de maneira geral, o erro na vazão de pico é aceitável, e não foi grande o suficiente para desqualificar o modelo.

Os eventos em que a vazão observada é menor que a vazão simulada obtiveram maior erro na vazão de pico, pois foi utilizada como denominador a vazão observado; isso pode causar extrapolações no indicador, destarte, a análise visual também é ferramenta de avaliação da concordância do modelo.

Em relação ao erro no tempo de pico, o desempenho do modelo foi muito bom, com média de 2 minutos e 40 segundos. 12 dos 17 eventos não apresentaram erro na vazão de pico ou erro igual a 2 minutos, que é o passo de tempo utilizado.

O evento que apresentou maior erro no tempo de pico (10 minutos) foi um evento cuja duração da chuva foi elevada, criando um patamar na zona de pico, levando a tal erro. Isto pode ser mais bem visualizado no anexo C, evento do dia 18 de dezembro.

Na Tabela 13, estão expostos os resultados obtidos no período de validação. Da mesma maneira que no período de calibração, houve dois eventos (11 de abril e 15 de maio) cujos indicadores não foram significantes devido a alguma falha na medição.

Tabela 13 - Indicadores de eficiência para os eventos de Validação.

<i>DATA</i>	H PRECI P. (mm)	lmax(mm/ h)	Qma x OBS. (L/S)	CO E	IC	RMS E (L/S)	EQP	ETP
11- abr	19.4	84	4108	- 0.20	0.6 8	1043	21.6%	- 0:16:00
12- abr	10.3	114	4839	0.89	0.9 6	490	10.9%	0:02:00
12- abr	16.3	75	5994	0.76	0.9 1	992	32.9%	- 0:04:00
20- abr	26.9	84	6153	0.85	0.9 6	771	-1.2%	0:02:00
21- abr	11	72	2656	0.39	0.9 1	598	- 50.4%	0:00:00
21- abr	5.5	60	2239	0.63	0.9 2	379	- 18.7%	0:04:00
4-mai	16.6	61	5300	0.67	0.8 9	997	15.3%	0:04:00
4-mai	12.2	61	3848	0.61	0.8 7	639	27.9%	- 0:02:00

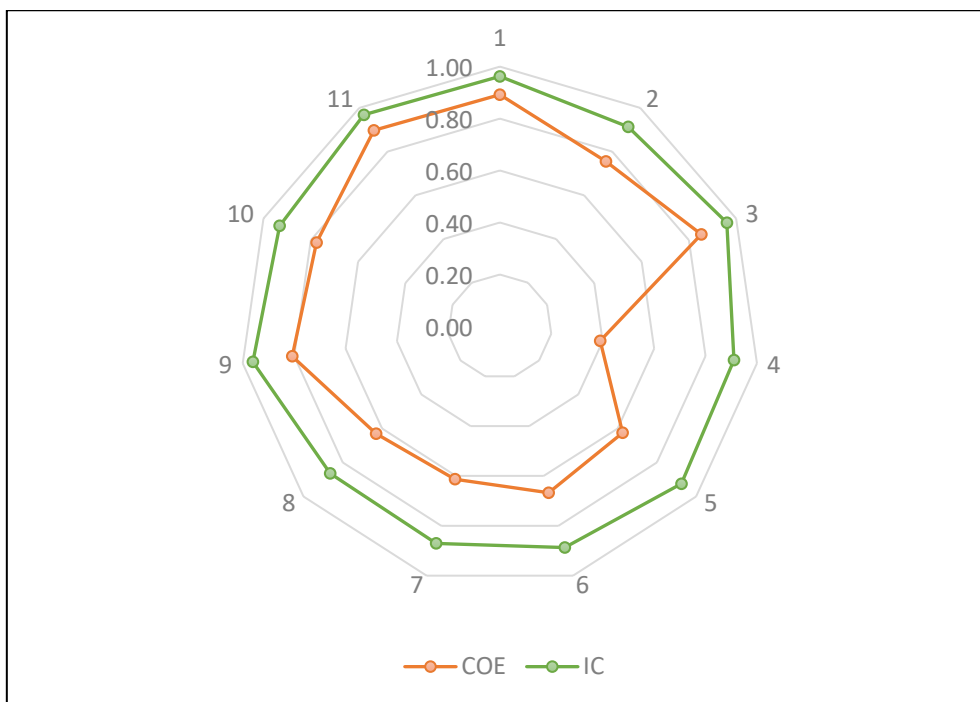
4-mai	13.7	114	8360	0.63	0.86	1589	37.1%	0:06:00
15-mai	9	53	2608	-0.13	0.78	796	-24.1%	0:04:00
18-mai	22.3	167	7491	0.81	0.96	1108	-29.9%	0:02:00
19-mai	7.9	46	2883	0.78	0.93	409	4.4%	0:02:00
20-mai	9.7	48	2591	0.90	0.97	237	5.8%	-0:02:00
			Média	0.72	0.92	746	21%	00:02:44

Fonte: Elaboração do autor.

As Figura 58 a Fonte: Elaboração do autor.

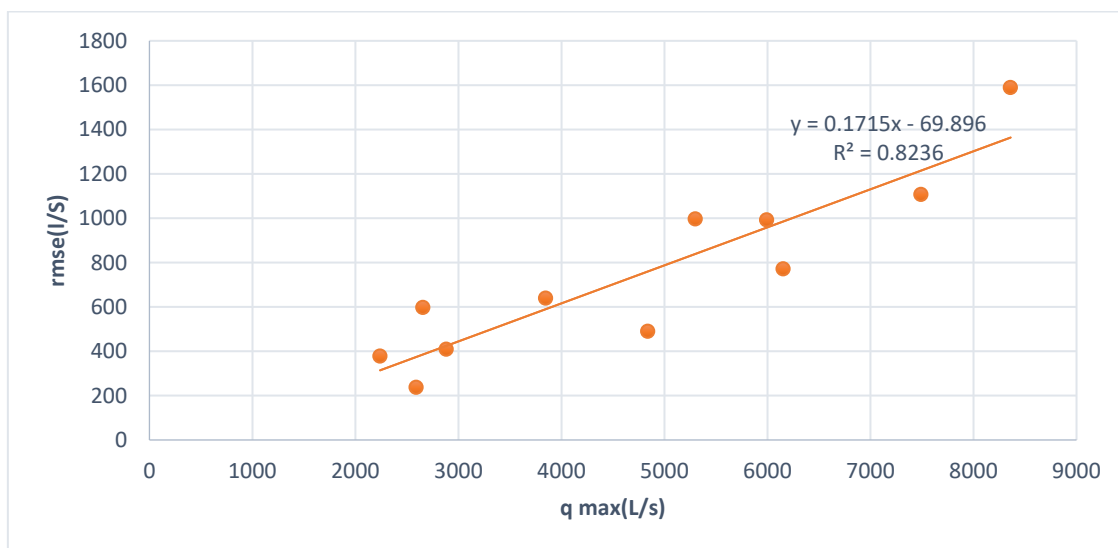
Figura 61 ilustram o desempenho de todos os eventos relativos a cada indicador estudado.

Figura 58 - COE e IC dos eventos de Validação



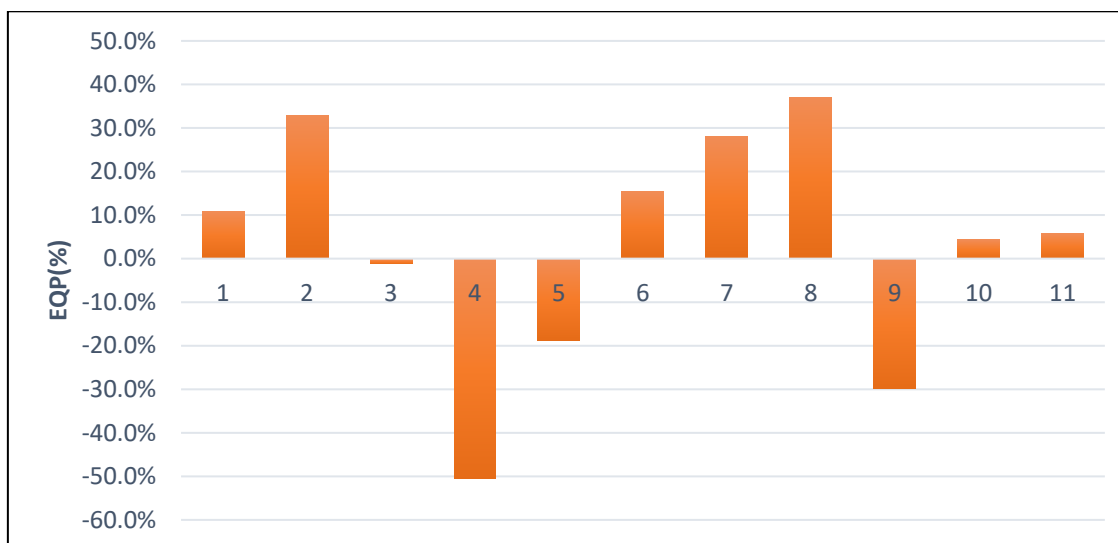
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 59 - RMSE versus Vazão Máxima Observada - Validação



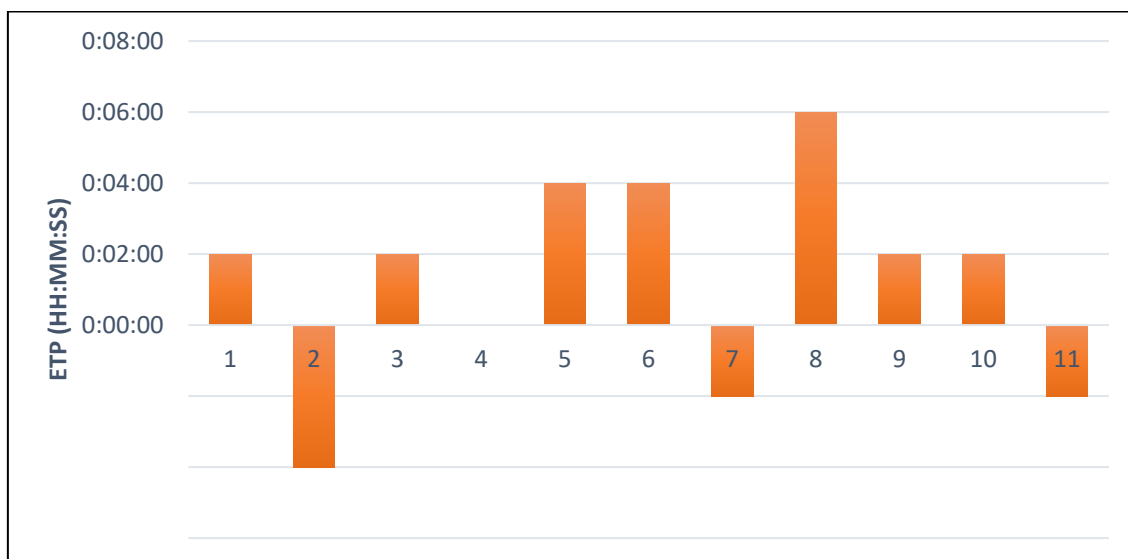
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 60 - -Erro da Vazão de Pico - Validação



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 61 - -Erro no Tempo de Pico - Validação



Fonte: Elaboração do autor.

De maneira geral, os resultados da validação foram equivalentes ou até superiores aos da calibração, o que é um excelente indicativo da consistência do modelo, ou seja, o modelo elaborado trabalha, também, em situações para as quais ele não foi calibrado, corroborando sua validade.

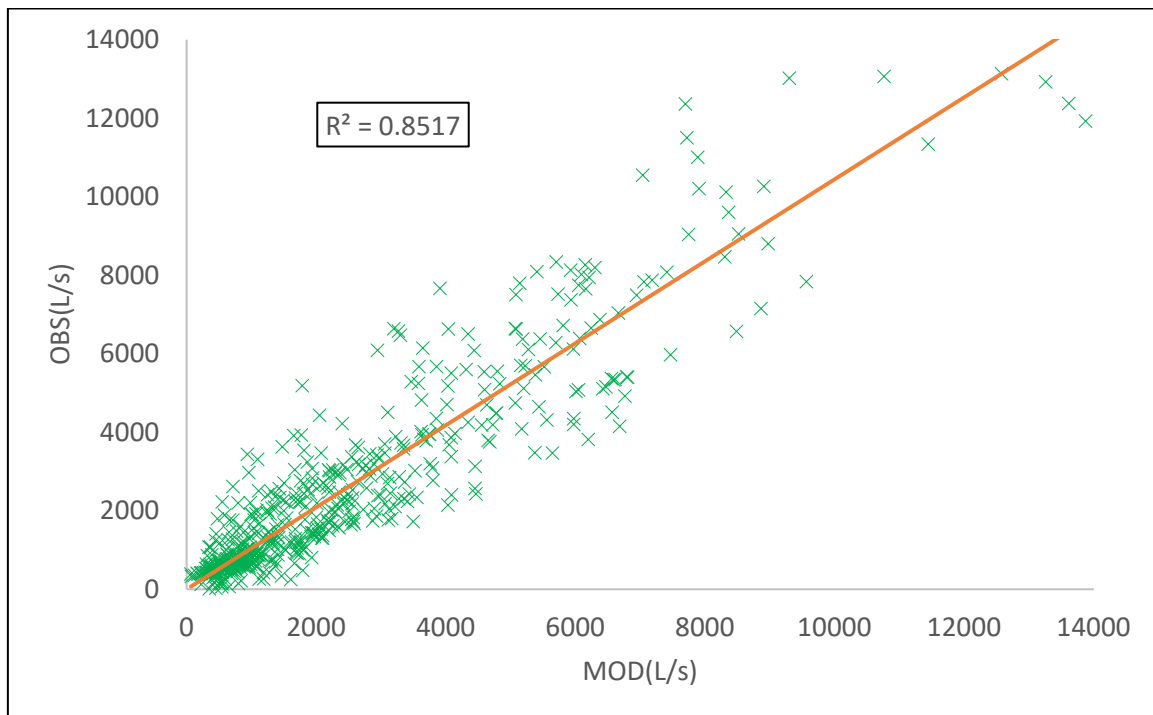
Os indicadores COE e IC foram superiores do que os encontrados na calibração com mínima de 0,39; máxima de 0,90 e média de 0,72 para o COE; valores muito bons para adequabilidade do modelo.

O RMSE resultante é ligeiramente maior do que o do período da validação (17% da vazão de pico). O erro na vazão de pico teve desempenho muito semelhante ao da calibração, com erros máximos em torno de 50%, mínimos com menos de 5 % e médio de 21%.

O erro no tempo de pico também teve desempenho semelhante a sete dos 12 eventos, apresentando erros nulos ou até 2 minutos, e erro médio de 2 minutos e 44 segundos.

A consistência dos dados também foi testada pela correlação simples entre o modelado e observado. O coeficiente R^2 de 85,2% indica boa similaridade entre os dados, além de não ter sido observada nenhuma região com dispersão elevada de pontos, o que sugere que o modelo representa bem todas as magnitudes de vazão, e, por consequência, o formado do hidrograma.

Figura 62 - Dispersão e correlação entre o observado e modelado



Fonte: Elaboração do autor.

5.7 Dependência Espacial

Conforme a Figura 15, a indicação é que a resolução espacial da medição de chuva seja de aproximadamente 3 km, ou seja, um pluviógrafo para toda bacia seria o suficiente; embora Ochoa-Rodriguez *et al.* (2015) sugiram uma resolução espacial de 1 km para áreas maiores que 100 ha. A colocação de dois instrumentos possibilitou a avaliação da dependência espacial da resposta do modelo.

As chuvas que ocorreram no pluviógrafo central são diferentes daquelas do pluviógrafo do reservatório. As Figura 63 e Fonte: Elaboração do autor.

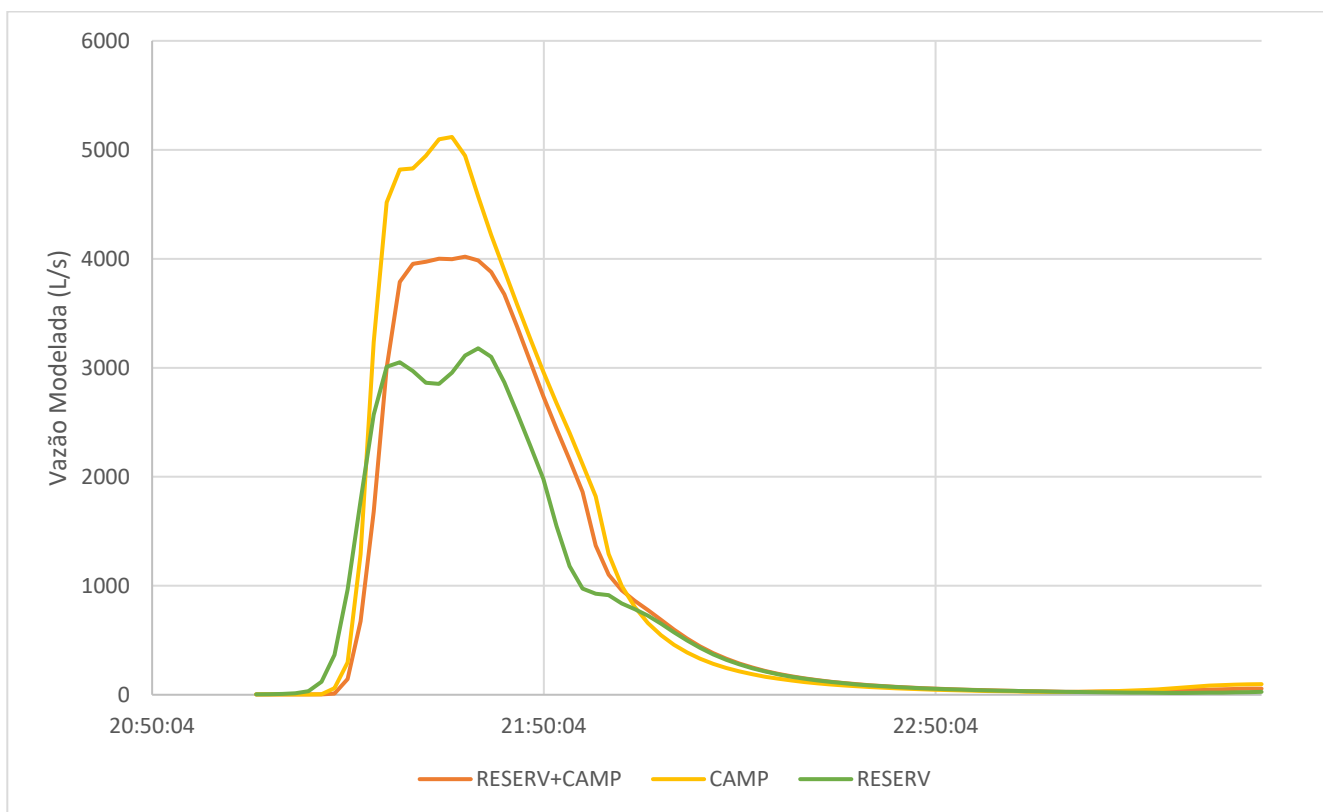
Figura 64 representam exemplos do modelo simulado com as chuvas, considerando apenas um pluviógrafo (ou campus ou reservatório) e a composição dos dois. O hidrograma é alterado tanto em relação ao formado, quanto em relação à magnitude, alterando assim a vazão e tempo de pico.

Evidentemente, existem eventos em que a diferença entre a utilização ou não de dois instrumentos é pequena.

A Fonte: Elaboração do autor.

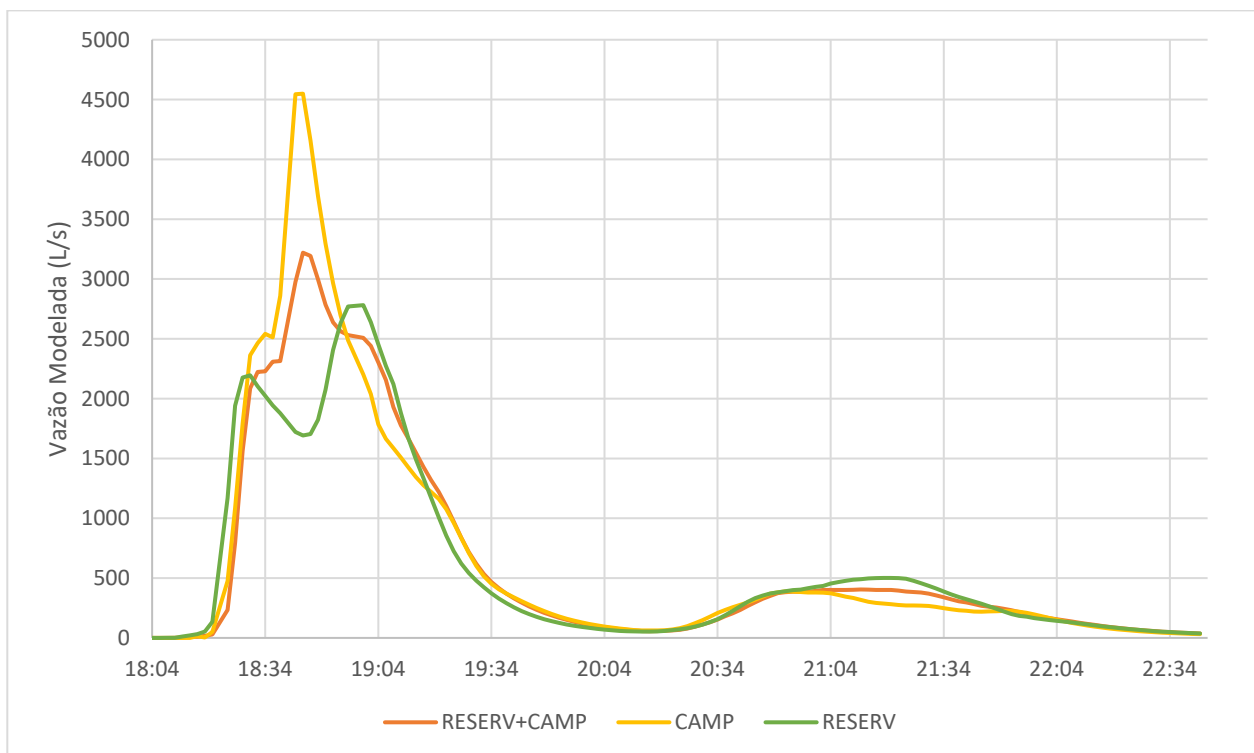
Tabela 14 expõe os erros referentes à vazão de pico para os dois casos analisados. Os valores são significativos, podendo chegar a uma variação de 41% em relação ao valor real e um erro de aproximadamente 50% entre uma vazão e outra.

Figura 63 - Sensibilidade Espacial do Modelo (Evento 12/04/2017)



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 64 - Sensibilidade Espacial do Modelo (Evento 11/04/2017)



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 14 - Erros decorrentes da discretização espacial

VAZÃO DE PICO (L/s)			
	RESERV+CAMP	CAMP	RESERV
12/4/2017	4019	5117	3178.
	ERRO(%)	27.33	-20.92
11/4/2017	3220	4549	2791
	ERRO(%)	41.28	-13.30

Nota: Os valores base para os erros são calculados tomando como referência a combinação do pluviógrafo campus com o do reservatório.

Fonte: Elaboração do autor.

A Tabela 15 apresenta os valores de precipitação acumulada e intensidade máxima atingida em todos os eventos captados. Nota-se que ambos os parâmetros são afetados com média de erro de 24% para quantidade precipitada e 20% para intensidade máxima observada, atingindo valores máximos de 89%. Os erros referentes à intensidade máxima são maiores do que os relacionados à precipitação acumulada, porém ambos apresentam valores significativos; o que leva a refletir sobre a resolução utilizada.

A Figura 65 ilustra o gráfico *boxplot*, resumizando os erros encontrados referentes à precipitação acumulada e intensidade máxima. Percebe-se que ambos têm desempenho semelhante, sendo a intensidade máxima com valores mais dispersos e a presença de um *outlier* no volume precipitado.

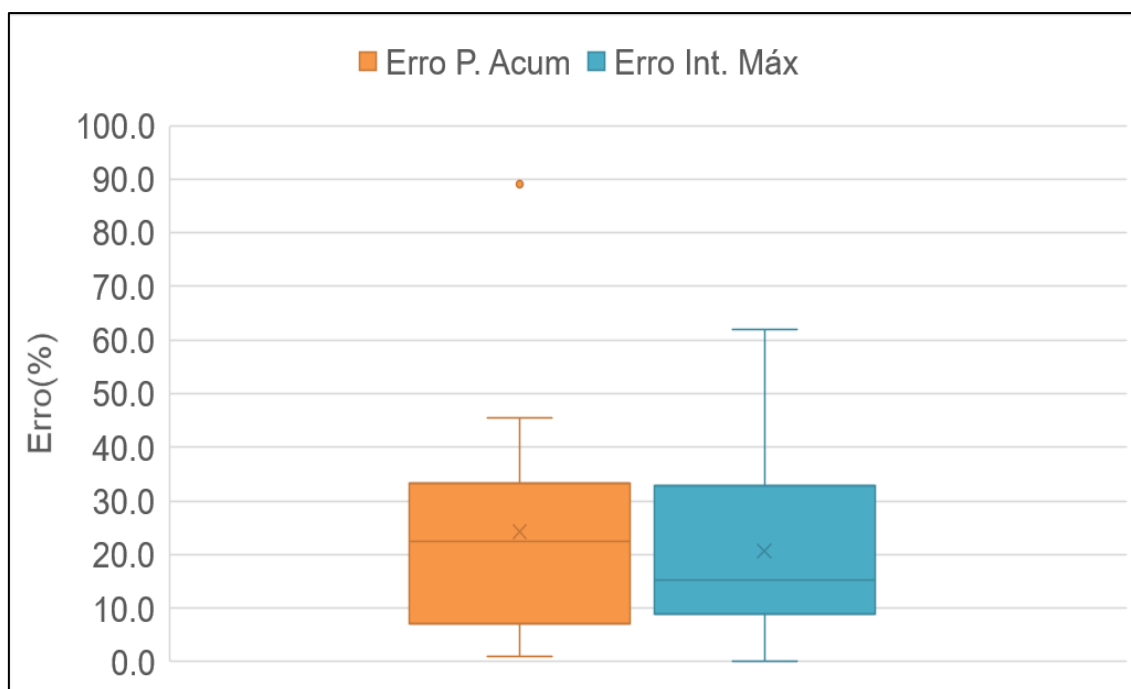
Tabela 15 - Comparação da Precipitação acumulada e Intensidade Máxima.

Data	P.Acum (Camp.)	P. Acum (Reserv)	I. Máx (Camp.)	I. Máx (Reserv)	Erro P. Acum (%)	Erro Int. Máx (%)
11-abr	24.6	45.2	83.8	84.0	45.5	0.2
12-abr	28.7	25.2	76.2	114.0	13.9	33.2
20-abr	33.3	41.2	76.2	84.0	19.2	9.3
21-abr	19.6	14.8	61.0	72.0	32.1	15.3
4-mai	48.8	40.2	114.3	114.0	21.3	0.3
15-mai	11.2	8.2	53.3	36.0	36.3	48.2
18-mai	25.4	19.2	167.6	150.0	32.3	11.8
19-mai	7.6	8.2	45.7	42.0	7.1	8.9
20-mai	9.4	10.0	38.1	48.0	6.0	20.6
28-out	27.2	21.4	99.1	78.0	27.0	27.0

30-out	20.6	19.2	175.3	132.0	7.2	32.8
3-nov	70.1	74.6	175.3	192.0	6.0	8.7
4-nov	55.6	58.6	175.3	174.0	5.1	0.7
6-nov	16.3	8.6	53.3	42.0	89.0	27.0
27-nov	23.6	27.8	68.6	48.0	15.0	42.9
30-nov	55.9	40.4	114.3	102.0	38.3	12.1
1-dez	11.2	14.6	22.9	60.0	23.5	61.9
12-dez	9.7	14.0	83.8	102.0	31.1	17.8
18-dez	36.8	37.2	121.9	144.0	1.0	15.3
20-dez	11.2	15.8	53.3	54.0	29.3	1.2
25-dez	25.4	23.2	83.8	96.0	9.5	12.7
26-dez	20.6	32.8	38.1	72.0	37.3	47.1
				Média	24.2	20.7

Nota: Obs. os valores base para os erros são calculados tomando como referência o pluviógrafo campus.
 Fonte: Elaboração do autor.

Figura 65 - Erros relativos à precipitação.



Fonte: Elaboração do autor.

Foi realizada a simulação considerando apenas um pluviógrafo instalado. Conforme exposto na Tabela 16, percebe-se que todos os indicadores foram conduzidos a uma diminuição significativa da representatividade do modelo, o que, mais uma vez, corrobora para a necessidade de mais pluviógrafos na região de estudo para aprimorar ainda mais o modelo.

Tabela 16 - Indicadores Analisados via Espacialidade.

		COE	IC	RMSE	EQP	ETP
CALIBRAÇÃO	TODOS	0.67	0.91	837.93	21%	0:02:40
	CENTRAL	0.26	0.83	1083.56	35%	0:03:40
	RESERV	0.47	0.89	949.49	25%	0:02:47
VALIDAÇÃO	TODOS	0.72	0.92	746.33	21%	0:02:30
	CENTRAL	0.47	0.91	800.87	26%	0:02:10
	RESERV	0.32	0.84	973.15	29%	0:03:50
AMBOS	TODOS	0.69	0.92	801.95	21%	0:02:31
	CENTRAL	0.34	0.86	972.51	32%	0:02:58
	RESERV	0.41	0.87	958.79	27%	0:03:06

Fonte: Elaboração do autor.

O erro na vazão de pico é sensivelmente alterado, em alguns casos chegando a um aumento de 14% na média. Já o erro no tempo de pico e no erro médio também tiveram alteração, porém de menor magnitude. Sendo assim, o parâmetro mais afetado, quanto à espacialidade, é a vazão de pico, justamente o indicador que teve a eficiência menor dentro todos os testados.

Foi constatada então a necessidade de se ter mais de dois pluviógrafos instalados na bacia experimental em questão; a resolução espacial é muito importante para se ter um bom *input* deste modelo.

A resolução espacial utilizada neste trabalho foi de 1,76 Km. Alguns autores indicam que a resolução adequada é de 1km, portanto a colocação de mais um pluviógrafo na bacia é altamente recomendada, sendo esta uma possível fonte de erro no modelo.

Os erros na vazão de pico, na ordem de 20%, poderiam ser melhorados com a melhor representação da chuva; tal fato iria refletir nos indicadores de eficiência COE e IC, já que o formato do hidrograma e o tempo de pico estão muito bem representados pelo modelo.

Outro ponto que poderia acarretar uma melhora no modelo é o aumento da resolução espacial, foi utilizada neste trabalho a resolução de 2 minutos devido a limitações nos equipamentos. A diminuição deste valor incrementaria os resultados obtidos, porém não com a mesma proporção do aumento da resolução espacial. Não foi possível testar a diminuição ou aumento da resolução espacial devido à falta de instrumentação.

6 CONCLUSÃO

O processo de calibração dos parâmetros e a utilização do SIG para determinar as características das sub-bacias elaboraram um modelo de desempenho satisfatório para os 31 eventos simulados em um espectro amplo de intensidade de precipitações.

- As técnicas de geoprocessamento disponíveis atualmente podem resultar em bons produtos, sem a necessidade de custos altos. Muito embora, exijam trabalho de campo significativo. Podem-se obter parâmetros muito precisos no âmbito da modelagem de bacias urbanas; porém, tal procedimento ainda é dispendioso e requer corpo técnico capacitado.
- As taxas de infiltração da bacia como um todo são relativamente altas, com valores que inviabilizam o escoamento superficial direto em áreas permeáveis até mesmo em seu estado saturado. Porém, o processo de uso do solo, pelas atividades antrópicas, compacta o solo, diminuindo essas taxas significativamente, e fazendo surgir o escoamento nestas áreas.
- A instrumentação (pluviógrafos e ADP) para captação de dados apresentou excelente consistência, sendo capaz de produzir a curva chave da galeria estudada. Foi observado que em alguns eventos ocorreram interferências na medição, muito provavelmente por obstruções carregadas pelo escoamento.
- A sensibilidade do modelo foi testada, e verificou-se que a vazão de pico e o volume escoado são fortemente influenciados pela rugosidade da galeria, largura, inclinação e porcentagem de área impermeável da sub-bacia. O tempo de pico é influenciado principalmente pela rugosidade da parcela impermeável, rugosidade das galerias e macrodrenagem, largura da bacia e inclinação. Os parâmetros altura de armazenamento e rugosidade da área permeável têm sensibilidade insignificante no modelo.
- A calibração conduziu a valores fisicamente significativos de parâmetros hidráulicos, como a rugosidade dos canais, macrodrenagem e sub-bacia. O que contribui para que a representatividade do modelo não seja baseada em coeficientes artificiais e que ele possa ser utilizado em uma gama de situações.

- Os valores obtidos pelo geoprocessamento foram alterados significativamente devido a diversos fatores, são eles: a representação das áreas indiretamente conectadas (%AI), resolução no modelo digital de terreno (i%) e correção do formato da bacia (Largura). Portanto, um cuidadoso processo de calibração não pode ser negligenciado em modelos subsequentes.
- No processo de elaboração de um modelo de escoamento superficial, muitas vezes é necessário utilizar de artifícios hidráulicos para contornar problemas reais. Neste trabalho, foi utilizado um orifício artificial para representar a queda de árvores no canal de macrodrenagem. Portanto, foi necessário o entendimento físico das leis que regem o escoamento para uma correta representação.
- O modelo produziu uma boa representação do formato do hidrograma e do tempo de pico. Contudo, a vazão de pico apresentou erros mais elevados, sendo a provável causa a resolução espacial da infiltração.
- Embora os resultados obtidos tenham sido bons, ficou constatado que a resolução espacial para captação dos dados de chuva pode ser melhorada para aprimorar o modelo; com valores na casa de 1km, e que, apenas um pluviógrafo geraria resultados muito inferiores aos atingidos.

7 RECOMENDAÇÕES

7.1 Para a continuidade deste trabalho

- Ampliar a bacia experimental para a Avenida quinze de outubro, onde já está locado o aparato experimental para captação de vazão;
- Instalar um medidor de nível na galeria onde foi realizado o trabalho e utilizar a curva chave elaborada para calcular a vazão;
- Elaborar uma rotina automática para calibração do modelo, com dois pontos de objetivo (quinze de outubro e sete de setembro) e os indicadores presentes no trabalho;
- Realizar mais campanhas de campo para averiguar as condições reais do sistema de drenagem (galerias, bocas de lobo, inclinação das ruas...);
- Realizar o modelo, no próprio SWMM, de transporte de poluentes da bacia, de modo análogo ao realizado para o escoamento, com coletas em campo e posterior calibração;
- Elaborar estudos sobre a resposta da bacia às medidas estruturais e não estruturais, sobre a análise de riscos e eficácia da drenagem utilizando o modelo deste trabalho.

7.2 Para os Órgãos mantenedores do sistema

Muito embora este trabalho não tenha se primado em avaliar os possíveis pontos de alagamento, o desenvolvimento de campanhas ao longo do ano possibilitou a inferência de algumas conclusões.

- Conservação, limpeza e desobstrução do córrego Sem Nome, para evitar efeitos nocivos à jusante;
- Manutenção e limpeza das bocas de lobo ao longo de toda a cidade, para evitar possíveis alagamentos;
- Redimensionamento das estruturas de engolimento das lombofaixas presentes na Avenida Brasil, que apresentam frequentes problemas;

- Varrição das ruas para melhor conservação da qualidade da água do córrego Sem Nome e demais;
- Fiscalização do lançamento indevido de esgoto na rede pluvial, estudos recentes e odores característicos indicam um grau elevado de contaminação do córrego.

8 COMENTÁRIOS FINAIS

O presente capítulo tem como finalidade apresentar a perspectiva pessoal dos autores deste trabalho, elencando as dificuldades enfrentadas e atalhos tomados durante a execução, e as lições aprendidas vivenciando a gestão da drenagem urbana.

O processo de modelagem de uma bacia urbana requer extenso trabalho, tanto de campo quanto de laboratório, e é imprescindível o cuidado com a qualidade dos dados obtidos para a corroboração do modelo, pois defeitos nos equipamentos e eventuais interferências internas não são incomuns e podem gerar falhas incorrigíveis. Portanto, a manutenção exaustiva dos equipamentos e a validação dos dados obtidos se fazem necessárias.

As campanhas de campo e as entrevistas com moradores da região, também são importantes para reconhecer particularidades da bacia, tais nuances podem ajudar a explicar ou modelar certos tipos de fenômeno. Portanto é imprescindível o conhecimento a fundo do local estudado.

Percebe-se que, de maneira geral, os órgãos gestores dos sistemas de drenagem possuem cadastramento deficitário ou inexistente. É imprescindível para uma abordagem ampla da gestão, o cadastramento de diferentes bancos de dados em uma plataforma única. Neste espectro o SIG é importante aliado, não só do ponto de vista de drenagem urbana, mas também planejamento urbanístico, cobrança de taxas, saúde pública, entre outros.

Encoraja-se então o advento de ações que visem integrar os diversos bancos de dados das prefeituras, para não ocorrerem perdas de projetos, duplicidade de levantamentos, entre outros problemas.

O processo de modelagem requer uma imersão do modelador no problema; por isso, é imprescindível ao operador incorporar as variáveis físicas do problema e sua resposta no hidrograma. A tradução de situações reais na modelagem física pertinente gera um enorme ganho no processo de adequabilidade do modelo. É necessário entender como os parâmetros influem em três indicadores: tempo de pico, vazão de pico e formato do hidrograma.

Nem sempre é fácil compatibilizar o modelo; é um processo exaustivo de tentativa e erro, e, em muitos casos, é necessário inserir estruturas hidráulicas artificiais, como reservatórios, orifícios e vertedouros. Porém, é condição *sine qua non* para a gestão da bacia como um todo.

No Brasil, dentre as quatro partes constituintes do saneamento básico, a drenagem urbana tende ser a mais negligenciada pelo poder público, e menos exigida pela comunidade. Isto porque os problemas oriundos dela são pontuais e sazonais, geralmente na época de chuva. No entanto, os custos referentes aos danos causados por enchentes e inundações são extremamente altos; em contrapartida, o bom planejamento e execução das obras de drenagem reduziriam muito esse tipo de desastre, caracterizando excelente investimento para máquina pública.

Para a mitigação dos problemas referentes à drenagem urbana, os principais pontos de atuação seriam a manutenção das guias e boca de lobo, a fiscalização de lançamentos ilegais e execução em desacordo com o projeto, e, principalmente, a gestão da bacia como um todo, sendo feitos estudos nas fases de implantação do plano diretos, não no decorrer da implementação dos loteamentos periféricos.

Para progredir como nação, é necessário que as quatro vertentes do saneamento básico estejam no planejamento nacional; não se deve tratar o assunto como gasto, e sim como investimento. É bem conhecido e amparado por diversos estudos que o retorno financeiro dos investimentos com saneamento básico é maior que os custos. Além dos ganhos sociais e da saúde pública.

REFERÊNCIAS

- ABILY M; BERTRAND N; DELESTRE O; GOURBESVILLE P; DULUC C. Spatial Global Sensitivity Analysis of High Resolution classified topographic data use in 2D urban flood modelling. **Environmental Modelling & Software**, [S. l.], v. 77, p.183-195, mar. 2016
- ACHLEITNER, S.; MÖDERL, M.; RAUCH, W. CITY DRAIN © – An open source approach for simulation of integrated urban drainage systems. **Environmental Modelling & Software**, [S. l.], v. 22, n. 8, p.1184-1195, ago. 2007.
- AILEGEORGIS, T. T.; ALFREDSEN, K. High spatial–temporal resolution and integrated surface and subsurface precipitation-runoff modelling for a small stormwater catchment. **Journal Of Hydrology**, Amsterdam, v. 557, p.613-630, fev. 2018.
- AKAN, A. O; HOUGHTALEN, R. J. Urban **Hydrology, hydraulics, and stormwater quality**. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- ALMEIDA, G. A. M. de; BATES, P.; OZDEMIR, H. Modelling urban floods at sub-metre resolution: challenges or opportunities for flood risk management. **Journal of Flood Risk Management**, [S. l.], p.1-11, out. 2016.
- ANGRILL, S.; PETIT-BOIX, A.; MORALES-PINZÓN, T.; JOSA, A.; RIERADEVALL, J.; GABARRELL, X. Urban rainwater runoff quantity and quality – A potential endogenous resource in cities? **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 189, p.14-21, mar. 2017.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p.711-728, 1 dez. 2013.
- BARON, V.; COUDIÈRE, Y.; SOCHALA, P. Adaptive multistep time discretization and linearization based on a posteriori error estimates for the Richards equation. **Applied Numerical Mathematics**, Amsterdam, v. 112, p.104-125, fev. 2017.
- BARCO, J.; WONG, K. M.; STENSTROM, M. K. Automatic Calibration of the U.S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment. **Journal of Hydraulic Engineering**, [S. l.], v. 134, n. 4, p. 466-474, abr. 2008.
- BAPTISTA, Márcio; NASCIMENTO, Nilo. Aspectos Institucionais e de Financiamento dos Sistemas de Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p.29-49, 2002.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2005.

BELING, F. A.; GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D.; BASTOS, G. A. P.; PAIVA J. B. D. Analysis of the SWMM model parameters for runoff evaluation in periurban basins from southern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE, 12nd., Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: [s. n.], 2011. p. 01-8.

BERNE, A.; DELRIEUG; CREUTIN J D; OBLED, C. Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 299, n. 3-4, p.166-179, dez. 2004.

BLISS, D. J.; NEUFELD, R. D.; RIES, R. J. Storm water runoff mitigation using a green roof. **Environmental Engineering Science**, Larchmont, v. 26, n. 2, p.407-418, fev. 2009.

BUDEL, Marcel Aramis. **Estudo comparativo da qualidade da água de chuva coletada em cobertura convencional e em telhado verde**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, 2014.

BURGER, G.; SITZENFREI, R.; KLEIDORFER, M.; RAUCH, W. Parallel flow routing in SWMM 5. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 53, p. 27-34, mar. 2014.

CAMBEZ, M.j.; PINHO, J.; DAVID, L.m.. Using SWMM 5 in the continuous modelling of stormwater hydraulics and quality. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE, 11th., 2008, Edinburgh. **Anais...** Edinburgh: [s. n.], 2008. p. 1 - 10.

CANHOLI, A.P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 302 p.

CARPENTER C.M.G.; TODOROV D.; DRISCOLL C.T.; MONTESDEOCA M. Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. **Environmental Pollution**, Barking, v. 218, p. 664-672, nov. 2016.

CEA, L.; PUERTAS, J.; VÁZQUEZ-CENDÓN, M. Depth Averaged Modelling of Turbulent Shallow Water Flow with Wet-Dry Fronts. **Archives Of Computational Methods In Engineering**, Barcelona, v. 14, n. 3, p. 303-341, 9 ago. 2007.

CHAHINIAN N.; MOUSSA R.; ANDRIEUXP.; VOLTZ M. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 306, n. 1-4, p.191-214, maio 2005.

CHANG, Tsang-jung; WANG, Chia-ho; CHEN, Albert S.. A novel approach to model dynamic flow interactions between storm sewer system and overland surface for different land covers in urban areas. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 524, p. 662-679, maio 2015.

CIPOLLA, S. S.; MAGLIONICO, M.; STOJKOV, I. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 95, p. 876-887, out. 2016.

COURTY, Laurent G.; RICO-RAMIREZ, Miguel A.; PEDROZO-ACUNA, Adrian. The Significance of Infiltration and Spatial Variability of Rainfall on the Numerical Reproduction of Urban Floods. **Preprints**, Washington, p.1-16, 29 ago. 2017.

CRISTIANO, E.; VELDHUIS, M.-C. T.; GIESEN, N. Spatial and temporal variability of rainfall and their effects on hydrological response in urban areas: a review. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 21, n. 7, p. 3859-3878, 28 jul. 2017.

CUNGE, J. A.. On The Subject Of A Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method). **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 7, n. 2, p. 205-230, jan. 1969.

DONGQUAN Z.; JINING C.; HAOZHENG W.; QINGYUAN T.; SHANGBING C.; ZHENG S. GIS-based urban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach: a case study in Macau. **Environmental Earth Sciences**, Heidelberg, v. 59, n. 2, p.465-472, 23 jan. 2009.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 158, n. 3-4, p.265-284, jun.

EBRAHIMIAN, A.; WILSON, B. N.; GULLIVER, J. S. Improved methods to estimate the effective impervious area in urban catchments using rainfall-runoff data. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 536, p.109-118, maio 2016.

ENGMAN, Edwin T.. Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff. **Journal of Irrigation And Drainage Engineering**, [s.l.], v. 112, n. 1, p.39-53, fev. 1986.

ENNIS, S.; CROBEDDU, E.. New Runoff Simulation Model for Small Urban Catchments. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 12, n. 5, p. 540-544, set. 2007.

FAGUNDES, D.C. **Forte chuva alaga rua e água invade carros e casas no passeio Itu**. Ilha Solteira: Ilha de Notícias, 2017. Disponível em <<http://ilhadenoticias.com/index.php/noticias/32-destaques/5837-forte-chuva-alaga-rua-e-agua-invade-carros-e-casas-no-itu.html>>. Acesso em: 27 mar. 2017.

FAGUNDES, D. C. **Secretários tentam combater alagamento “na mão”**. Ilha Solteira: Ilha de Notícias, 2017. Disponível em: <<http://ilhadenoticias.com/index.php/menu-prefeitura/6562-secretarios-tentam-combater-alagamento-na-mao.html>>. Acesso em: 09 fev. 2018.

FENICIA, F.; PFISTER, L.; KAVETSKI, D.; MATGEN, P.; IFFLY J.; HOFFMANN, L.; UIJLENHOET, R. Microwave links for rainfall estimation in an urban environment: Insights from an experimental setup in Luxembourg-City. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 464-465, p.69-78, set. 2012.

FEWTRELL, T. J.; DUNCAN, A.; SAMPSON, C. C.; NEAL, J. C.; BATES P. D. Benchmarking urban flood models of varying complexity and scale using high resolution terrestrial LiDAR data. **Physics and Chemistry of The Earth**, Oxford, v. 36, n. 7-8, p.281-291, jan. 2011.

FILGUEIRA A.; GONZÁLEZ-JORGE H.; LAGÜELA S.; DÍAZ-VILARIÑO L.; ARIAS P. Quantifying the influence of rain in LiDAR performance. **Measurement**, Amsterdam, v. 95, p.143-148, jan. 2017.

FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. **Advances In Water Resources**, Southampton, v. 51, p. 261-279, jan. 2013.

FLETCHER, T. D.; SHUSTER, W.; HUNT, W. F.; ASHLEY, R.; BUTLER, D.; ARTHUR, S.; TROWSDALE, S.; BARRAUD, S.; SEMADENI-DAVIES, A.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.; MIKKELSEN, P. S.; RIVARD, G.; UHL, M.; DAGENAIS, D.; VIKLANDER, M. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, [S. l.], v. 12, n. 7, p. 525-542, 23 jul. 2014.

FORMIGA, K. T. M; CARVALHO, M.; SILVA, K. A.; SOARES, A. K. Calibração do Storm Water Management Model (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 697-707, dez. 2016.

GAMERITH, V.; GRUBER, G.; MUSCHALLA, D. Single- and multievent optimization in combined sewer flow and water quality model calibration. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 137, n. 7, p. 551-558, jul. 2011.

GREEN, W. H.; AMPT, A. G. Studies on soil physics. the flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Sciences**, [S. l.], v. 4, p.11-24, 1911.

GREGORY, J. H.; DUKESM, D.; JONESP, H.; MILLERG,L. Effect of urban soil compaction on infiltration rate. **Journal of Soil And Water Conservation**, Ankeny, v. 61, n. 3, p.117-124, jan. 2006.

GUO, J.C.; URBONAS, B. Conversion of Natural Watershed to Kinematic Wave Cascading Plane. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 14, n. 8, p.839-846, ago. 2009.

GUO, J. C. Y. Green Concept in Storm Water Management. **Irrigation & Drainage Systems Engineering**, [S. l.], v. 2, n. 3, p.1-8, 2013.

HAN, W. Suk; BURIAN, S. J. Determining Effective Impervious Area for Urban Hydrologic Modeling. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 14, n. 2, p.111-120, fev. 2009.

HARPER, G. E; LIMMER, M. A.; SHOWALTER, W. E.; BURKEN, J. G. Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 78, p.127-133, maio 2015.

HILDEN, M. **Extensions of shallow water equations**. 2003. 159 f. Tese (PhD em Matemática) - Kaiserslautern University, Kaiserslautern, 2003.

HOOD, M. J.; CLAUSEN, J. C.; WARNER, G. S. Comparison of stormwater lag times for low impact and traditional residential development. **Journal of The American Water Resources Association**, Herndon, v. 43, n. 4, p.1036-1046, ago. 2007.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions American Geophysical Union**, Washington, v. 14, p. 446-460, 1933.

HUBER, W. C.. New Options for Overland Flow Routing in SWMM. **Urban Drainage Modeling**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 22-29, 21 nov. 2001.

HUBER, W. C.; CANNON, L. Modeling non-directly connected impervious areas in dense neighborhoods. **Global Solutions For Urban Drainage**, [S. l.], p. 1-2, 5 set. 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Perfil dos municípios brasileiros 2013**. Rio de Janeiro: IBGE, 2013.

JAIN, S. K.; SUDHEER, K. P. Fitting of hydrologic models: a close look at the nash–sutcliffe index. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 13, n. 10, p. 981-986, out. 2008.

JHA, Abhas Kumar; BOOTH, Colin; BLOCH, Robin. **Cities and flooding : a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century**. [S. l]: World Bank, 2012.

KAMALI, M.; DELKASH, M.; TAJRISHY, M. Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 187, p. 43-53, fev. 2017.

KIDD, C. H. R. Rainfall-runoff processes over urban surfaces. In: INTERNATIONAL WORKSHOP HELD AT IH., 1978, Wallingford. **Proceedings...** Wallingford: Institute of Hydrology, 1978. p. 1-90. abr.

KLENZENDORF, B.; PORESKEYA; KELLY, M.; CHRISTMAN, M. 1D/2D modeling of decentralized stormwater control measures for flood mitigation in Austin, Texas. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS, 2015, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.]: American Society of Civil Engineers, 2015. p. 1-10.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances In Geosciences**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 89-97, jan. 2005.

KREBSG; KOKKONEN; VALTANEN; SETÄLÄH; KOIVUSALO, H. Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 512, p. 482-497, maio 2014.

KÖHLER, M.; SCHMIDT, M. **Study of extensive “Green Roofs” in Berlin. 2003.** [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <http://www.roofmeadow.com/wp-content/uploads/Study-of-extensive-green-roof-in-Berlin_rev2.pdf>. Acesso em: 24 maio 2017.

KONG, K.; BAN, Y.; YIN, H.; JAMES, P.; DRONOVA, I. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development. **Environmental Modelling & Software**, [S. l.], v. 95, p. 132-142, set. 2017.

LARRY, W. M. **Hydraulics of sewer systems**. Nova York: Mcgraw-hill, 2001.

LEANDRO, J.; SCHUMANN, A.; PFISTER, A.. A step towards considering the spatial heterogeneity of urban key features in urban hydrology flood modelling. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 535, p. 356-365, abr. 2016.

LEE, J.; HYUN, K.; CHOI, J.; YOON, Y.; GERONIMO, F. K. F. Flood reduction analysis on watershed of LID design demonstration district using SWMM5. **Desalination and Water Treatment**, [S. l.], v. 38, n. 1-3, p. 255-261, jan. 2012.

LEE, J. Y.; LEE, M. J.; HAN, M. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 152, p. 171-176, abr. 2015.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 233-241, jan. 1999.

LOAGUE, K.; GANDER, G. A.. Spatial variability of infiltration on a small rangeland catchment. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 5, n. 26, p.957-971, maio 1990.

MARTINS, L. G. B. **Avaliação do potencial de aplicação de técnicas compensatórias em áreas urbanas consolidadas**. 2016. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2016.

MCCUEN, R. H.; KNIGHT, Z.; CUTTER, A. G. Evaluation of the nash–sutcliffe efficiency index. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 11, n. 6, p. 597-602, nov. 2006.

- MERZ, B.; KREIBICH, H.; SCHWARZE, R.; THIEKEN, A. Review article "Assessment of economic flood damage". **Natural Hazards And Earth System Science**, [S. l.], v. 10, n. 8, p.1697-1724, 18 ago. 2010.
- MULVANY, T. J.. On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rain fall and of flood discharges in a given catchment. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland**, [S. l.], v. 4, p. 18–33, 1851.
- MUSCHALLA, D.; SCHNEIDER, S.; SCHRÖTER, K.; GAMERITH, V.; GRUBER, G. Sewer modelling based on highly distributed calibration data sets and multi-objective auto-calibration schemes. **Water Science & Technology**, Oxford, v. 57, n. 10, p.1547-1556, maio 2008.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V.. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, n. 3, p. 282-290, abr. 1970.
- NIEMCZYNOWICZ, J. The rainfall movement: a valuable complement to short-term rainfall data. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 104, n. 1-4, p.311-326, dez. 1988.
- NIEMCZYNOWICZ, J. Urban hydrology and water management: present and future challenges. **Urban Water**, Amsterdam, v. 1, n. 1, p.1-14, mar. 1999.
- NIEMI, T. J.; WARSTA, L.; TAKA, M.; HICKMAN, B.; PULKKINEN, S.; KREBS, G.; MOISSEEV, D. N.; KOIVUSALO, H.; KOKKONEN, T. Applicability of open rainfall data to event-scale urban rainfall-runoff modelling. **Journal Of Hydrology**, Amsterdam, v. 547, p. 143-155, abr. 2017.
- NUNES, J. P.; DE LIMA, J. L. M. P.; SINGHV, P.; DE LIMAM, I. P.; VIEIRAG, N. Numerical modeling of surface runoff and erosion due to moving rainstorms at the drainage basin scale. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 330, n. 3-4, p. 709-720, nov. 2006.
- OCHOA-RODRIGUEZ, S.; WANG, L.; GIRES, A.; PINA, R. D.; RONDINEL, R. R.; BRUNI, G.; ICHIBA, A.; GAITAN, S.; CRISTIANO, E.; VAN ASSEL, J.; KROLL, S.; MURLÀ-TUYLS, D.; TISSERAND, B.; SCHERTZER, D.; TCHIGUIRINSKAIA, I.; ONOF, C.; ILLEMS, P.; VELDHUIS, M. C. T. Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 531, p. 389-407, dez. 2015.
- PETERSON, E. W.; WICKS, C. I M. Assessing the importance of conduit geometry and physical parameters in karst systems using the storm water management model (SWMM). **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 329, n. 1-2, p. 294-305, set. 2006.

PETRUCCI, G.; BONHOMME, C. The dilemma of spatial representation for urban hydrology semi-distributed modelling: Trade-offs among complexity, calibration and geographical data. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 517, p. 997-1007, set. 2014.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos: Eesc Usp, 2006.

PORTO, R. L. **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos**. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

RAGABR; BROMLEYJ; ROSIERP; COOPERJ, D.; GASH, J. H. C. Experimental study of water fluxes in a residential area: 1. Rainfall, roof runoff and evaporation. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 17, n. 12, p. 2409-2422, 2003a.

RAGABR; BROMLEYJ; ROSIERP; COOPERJ, D.; GASH, J. H. C. Experimental study of water fluxes in a residential area: 2. Road infiltration, runoff and evaporation. **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 17, n. 12, p.2423-2437, 2003b.

RAMIER, D.; BERTHIER, E.; ANDRIEU, H.. The hydrological behaviour of urban streets: long-term observations and modelling of runoff losses and rainfall-runoff transformation. **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 25, n. 14, p. 2161-2178, jul. 2011.

REFSGAARD, J. C.; STORM, B. Construction, calibration and validation of hydrological models. **Distributed Hydrological Modelling**, [S. l.], p. 41-54, 1990.

RIAÑO-BRICEÑO, G.; BARREIRO-GOMEZ, J.; RAMIREZ-JAIME, A.; QUIJANO, N.; OCAMPO-MARTINEZ, C. MatSWMM: an open-source toolbox for designing real-time control of urban drainage systems. **Environmental Modelling & Software**, [S. l.], v. 83, p. 143-154, set. 2016.

RICO-RAMIREZ, M. A.; LIGUORI, S.; SCHELLART, A. N. A. Quantifying radar-rainfall uncertainties in urban drainage flow modelling. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 528, p. 17-28, set. 2015.

RITTER, A.; MUÑOZ-CARPENA, R. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 480, p. 33-45, fev. 2013.

RODRIGUES, M. **Lombofaixas na nova ciclovia de Ilha Solteira causa alagamentos na avenida Brasil**. Disponível em: <<http://pingafogoilhasolteira.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 08 fev. 2018.

ROSA, D. J.; CLAUSEN, J. C.; DIETZ, M. E. Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development. **Jawra Journal of The American Water Resources Association**, [S. l.], v. 51, n. 3, p. 746-757, 30 jan. 2015.

ROSSMAN, L. **Storm water management model user's manual version 5.1.** Cincinnati: National Risk Management Laboratory Office of Research And Development U.s. Environmental Protection Agency, 2015.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. **Storm water management model reference manual volume I: hydrology.** Cincinnati: National Risk Management Laboratory Office Of Research And Development U.s. Environmental Protection Agency, 2016.

ROY, A. H.; SHUSTER, W. D. Assessing Impervious Surface Connectivity and Applications for Watershed Management. **Jawra Journal Of The American Water Resources Association**, [S. l.], v. 45, n. 1, p.198-209, fev. 2009.

SALVAN, L.; ABILY, M.; GOURBESVILLE, P.; SCHOORENS, J. Drainage System and Detailed Urban Topography: Towards Operational 1D-2D Modelling for Stormwater Management. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 154, p. 890-897, 2016.

SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGASW, A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of The American Water Resources Association**, [S. l.], v. 37, n. 5, p.1169-1188, out. 2001.

SANTIM, Thiago Garcia da Silva. **Uso de geotecnologias na análise temporal dos impactos da urbanização na sub-bacia do córrego sem nome em Ilha Solteira/SP.** 2010. 228 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2010.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrologicos: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 03, n. 02, p. 01-19, set. 2009.

SCHMITT, T. G.; THOMAS, M.; ETTRICH, N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 299, n. 3-4, p. 300-311, dez. 2004.

SETZER, J.; PORTO, R. L. L. **Tentativa de avaliação de escoamento superficial de acordo com o solo e o seu recobrimento vegetal nas condições do estado de São Paulo.** São Paulo: DAEE, 1979.

SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building And Environment**, [S. l.], v. 42, n. 11, p. 3830-3836, nov. 2007.

SHINMA, T. A. **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão.** 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SHUSTER W. D.; BONTA J.; THURSTON H.; WARNEMUENDEE.; SMITH D. R. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. **Urban Water Journal**, [S. l.], v. 2, n. 4, p. 263-275, dez. 2005.

SILVA JUNIOR, M. A. B. *et al.* Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in Recife - PE. **RBRH**, [S. l.], v. 22, p.1-11, 2017.

SINGH, V. P. Effect of the duration and direction of storm movement on planar flow with full and partial areal coverage. **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 16, n. 17, p. 3437-3466, 2002.

SOHN, W.; KIM, J.-h.; LI, M.-h. Low impact development applications in urban watersheds: efficacy evaluation by imperviousness connectivity estimations. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL FORUM ON URBANISM, 8th,[S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2015. p. 1-13.

TAN, T. B.; CHUA, L. H.; SHUY, E. B.; LO, E. Y.; LIM, L. W.. Performances of Rainfall-Runoff Models Calibrated over Single and Continuous Storm Flow Events. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 13, n. 7, p.597-607, jul. 2008.

TEIXEIRA, P. C. **Qualidade da água drenada por coberturas verdes para fins de aproveitamento em edifício**. 93 p. 2013. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2013.

TEMPRANO, J.; ARANGO, Ó.; CAGIAO, J.; SUÁREZ, J.; TEJERO, I. Stormwater quality calibration by SWMM: a case study in Northern Spain. **Water SA.**, On Line, p. 1-9. jan. 2006

TOBIO, J. A. S.; MANQUIZ-REDILLAS, M. C.; KIM, L.-h. Optimization of the design of an urban runoff treatment system using stormwater management model (SWMM). **Desalination And Water Treatment**, [S. l.], v. 53, n. 11, p.3134-3141, 29 maio 2014.

TODINI, E. A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 4, p.1549-1592, jan. 2007.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2009.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. **Population Division (Org.)**. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. Nova York: 2015. 517 p.

VAN DAM, J. C.; FEDDES, R. A. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 233, n. 1-4, p. 72-85, jun. 2000.

VISSMAN JUNIOR, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to Hydrology**. 5. ed. NJ: Pearson, 2003.

VIEIRA, S. R.; NLFISEN, D. R.; BLGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Sci.**, [S. I.], v. 45, n. 1, p. 1040-1048, jan. 1981.

VOJINOVIC, Z.; TUTULIC, D. On the use of 1D and coupled 1D-2D modelling approaches for assessment of flood damage in urban areas. **Urban Water Journal**, [S. I.], v. 6, n. 3, p.183-199, set. 2009.

VOJINOVIC, Z.; SEYOUM, S. D.; MWALWAKA, J. M.; PRICE, R. K. Effects of model schematisation, geometry and parameter values on urban flood modelling. **Water Science & Technology**, [S. I.], v. 63, n. 3, p. 462-469, jan. 2011

WANG, L.; OCHOA-RODRÍGUEZ, S.; VAN ASSEL, J.; PINA, R. D.; PESSEMIER, M.; KROLL, S.; WILLEMS, P.; ONOF, C. Enhancement of radar rainfall estimates for urban hydrology through optical flow temporal interpolation and Bayesian gauge-based adjustment. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 531, p. 408-426, dez. 2015.

WILLMOT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, [S. I.], v. 2, n. 1, p. 184-194, jan. 1981.

WMO. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. Geneva, Switzerland: Wmo, 2008.

WU, Jianguo. Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. **Landscape And Urban Planning**, [S. I.], v. 125, p. 209-221, maio 2014.

ZAGHLOUL, N. A. Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation. **Advances In Water Resources**, [S. I.], v. 6, n. 4, p.214-223, dez. 1983.

ZHU, Z.; CHEN, Z.; CHEN, X.; HE, P. Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems. **Science of The Total Environment**, [S. I.], v. 553, p. 1-12, maio 2016.

ANEXOS

ANEXO A – NOTÍCIAS DE ENCHENTES NA BACIA DURANTE O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Forte chuva alaga rua e água invade carros e casas no Itu

 Categoria: Cidade Publicado em Sexta, 05 Maio 2017 22:48

Douglas Cossi Fagundes
Da Redação



A forte chuva que atingiu Ilha Solteira no final da tarde desta sexta-feira (5), alagou a rua que fica entre os Passeios Itú e Mococa, na zona sul. A água invadiu carros e casas.

O problema é antigo e, mesmo após algumas intervenções da Prefeitura, continua provocando transtornos aos moradores. Bastou poucos minutos de chuva para que uma forte enxurrada descesse pela viela de 300 do Passeio Itu e se acumulasse rapidamente na esquina, pegando motoristas que passavam pelo local de surpresa e invadissem casas.


Apesar de visivelmente a rede de escoamento da água ser insuficiente para o escoamento da chuva, a Prefeitura, em 2015, apenas trocou uma tampa por uma grade. A "solução", diversas vezes, já se mostrou ineficiente.

A mais prejudicada, de novo, foi Lilian Cristina, que mora na esquina da viela de 300 do Passeio Itu. A água voltou a inundar parte da sua casa. Um outro motorista que passava pelo local não conseguiu cruzar o alagamento e teve que tirar o carro, do meio da água, no braço.



Fonte: (FAGUNDES, 2017)

Secretários tentam combater alagamento “na mão”

 Categoria: Prefeitura Publicado em Sábado, 04 Novembro 2017 16:03

Douglas Cossi Fagundes
Da Redação



Secretário Pedro Pereira

Dois secretários do Governo Otávio Gomes, Pedro Pereira dos Santos Filho (Desenvolvimento Econômico) Vanderley Marcelino (Obras e Manutenção), foram para a rua na tarde desta sexta-feira (3), quando Ilha Solteira enfrentava uma forte chuva, para tentar combater, “na mão”, os impactos nas áreas alagadas. A ação, é claro, não deu resultado.

A água também acumulou ao longo da Avenida Brasil, principalmente próximo às lombos-faixas, provocando transtornos aos motoristas. Carros tiveram dificuldade em trafegar pela região.



Alameda Ceará

Fonte: (FAGUNDES, 2018)

ANEXO B – PROPRIEDADES INICIAIS DAS SUB-BACIAS

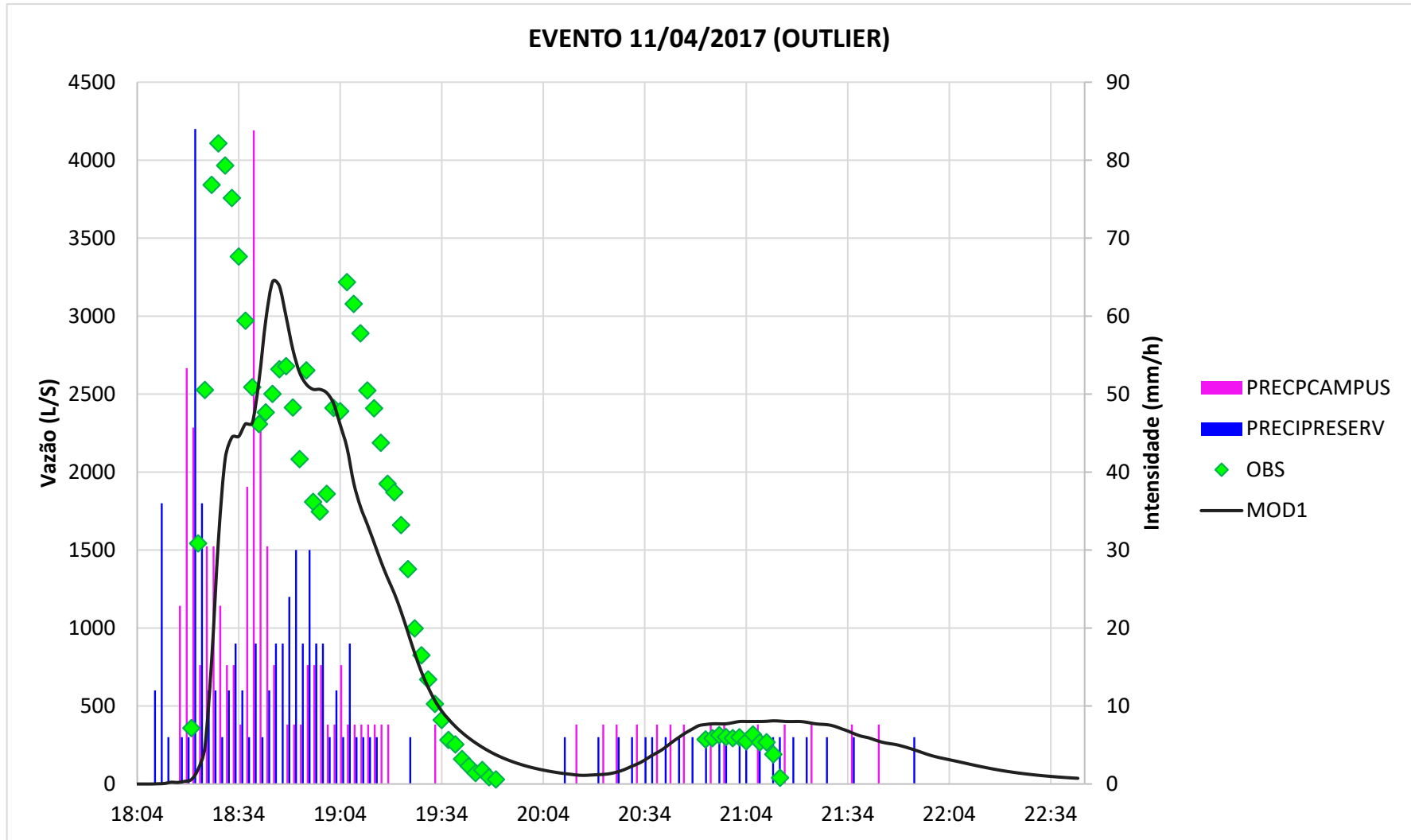
SUB-BACIA	Área (ha)	%ÁREA IMP	Decliv(%)	Parâmetros P/ o Cálculo da Largura					L
				C	Am (m ²)	X	Z	Y	
0	0.79	62.72	2.75	88	4565	1.02	0.58	1.76	155
1	0.99	81.09	3.73	142	3907	0.49	0.39	0.62	89
2	0.75	37.48	5.58	126	3097	0.47	0.41	0.63	79
3	2.54	48.05	1.19	150	13605	1.13	0.54	1.78	267
4	0.99	87.66	5.67	180	5147	0.30	0.52	0.52	94
5	1.11	72.74	1.22	90	6900	1.37	0.62	2.42	218
6	0.80	77.87	3.51	85	4056	1.11	0.50	1.66	141
7	0.30	23.16	3.60	60	1201	0.84	0.40	1.02	61
8	0.98	81.69	2.03	170	5807	0.34	0.60	0.66	112
9	0.73	52.79	1.54	90	5172	0.90	0.71	1.94	175
10	5.01	41.26	4.36	270	23801	0.69	0.47	1.02	276
11	1.82	29.84	0.95	112	9458	1.45	0.52	2.12	237
12	3.83	55.51	4.60	350	20325	0.31	0.53	0.55	191
13	1.10	84.69	2.93	200	5331	0.28	0.48	0.44	88
14	0.62	84.78	3.12	90	3811	0.77	0.61	1.46	131
15	0.41	56.41	2.50	87	2400	0.54	0.58	1.01	88
16	1.17	80.64	2.75	200	5952	0.29	0.51	0.49	98
17	0.42	98.83	1.39	80	2154	0.65	0.52	1.06	85
18	0.20	77.06	1.20	66	1128	0.46	0.56	0.84	55
19	2.04	79.39	2.92	174	13210	0.67	0.65	1.37	238
20	1.49	36.84	0.76	150	14800	0.66	1.00	2.07	310
21	1.28	82.86	2.91	218	6730	0.27	0.53	0.47	102
22	0.41	99.01	1.13	94	2070	0.46	0.51	0.76	71
23	1.71	83.57	2.45	245	9721	0.28	0.57	0.54	131
24	1.30	96.14	2.49	200	6400	0.33	0.49	0.53	105
25	3.47	63.60	1.99	270	20400	0.48	0.59	0.90	244
26	1.37	87.26	2.52	210	7140	0.31	0.52	0.53	112
27	0.97	83.43	3.08	150	5435	0.43	0.56	0.78	118
28	0.47	88.76	2.32	100	2677	0.47	0.57	0.86	86
29	0.37	53.28	1.89	87	1746	0.49	0.47	0.74	65
30	1.36	59.79	0.64	80	10756	2.13	0.79	4.23	338
31	4.84	31.43	2.24	150	31058	2.15	0.64	3.46	519
32	1.23	85.29	1.61	185	7011	0.36	0.57	0.67	124
33	0.66	69.93	2.22	160	3795	0.26	0.58	0.49	79
34	0.83	45.17	0.51	70	4100	1.69	0.50	2.26	158
35	1.69	86.59	2.50	240	8900	0.29	0.53	0.51	122
36	1.44	89.35	2.22	214	7500	0.31	0.52	0.54	115
37	0.86	87.54	1.20	130	4155	0.51	0.48	0.79	103
38	0.88	80.74	2.98	62	4723	2.29	0.54	3.01	186
39	1.15	64.21	2.22	140	5600	0.58	0.49	0.91	127

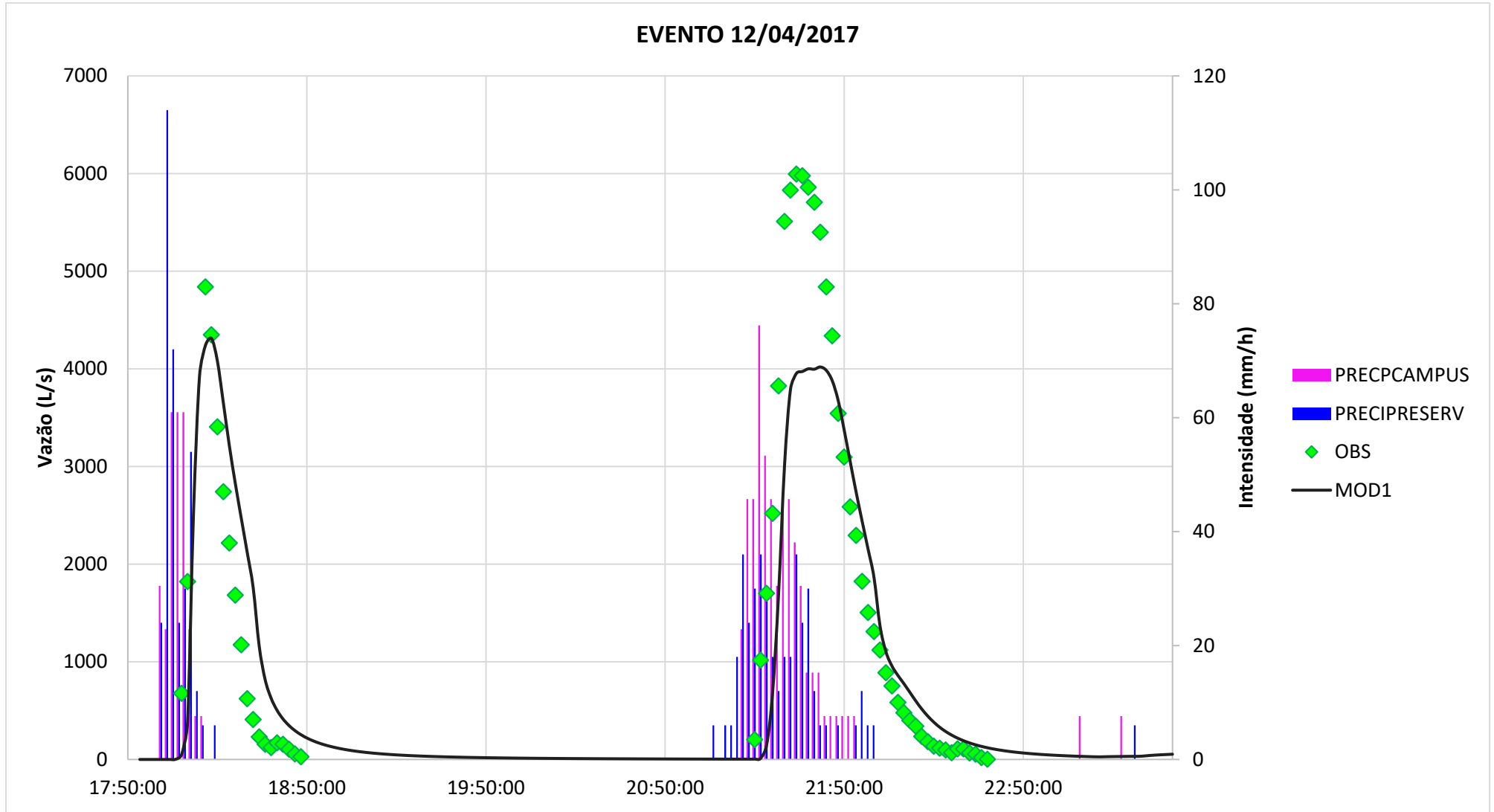
SUB-BACIA	Área (ha)	%ÁREA IMP	Decliv(%)	Parâmetros P/ o Cálculo da					L
				Largura					
				C	Am (m ²)	X	Z	Y	
40	0.90	8.58	1.87	134	4500	0.50	0.50	0.81	108
41	0.89	79.95	2.22	150	4809	0.39	0.54	0.70	105
42	4.02	54.25	3.09	245	26140	0.67	0.65	1.37	335
43	1.32	93.83	1.84	175	6330	0.43	0.48	0.67	117
44	1.41	82.31	2.51	270	7200	0.19	0.51	0.33	89
45	0.87	68.65	2.30	130	5090	0.51	0.59	0.97	126
46	0.33	65.41	1.78	50	2135	1.31	0.65	2.45	122
47	1.96	17.53	1.00	150	10000	0.87	0.51	1.36	204
48	0.47	73.16	3.01	83	2450	0.68	0.52	1.12	93
49	0.91	81.93	1.51	160	5600	0.36	0.61	0.72	115
50	0.62	89.32	2.39	134	3400	0.35	0.54	0.62	83
51	1.82	77.65	2.46	270	10500	0.25	0.58	0.48	129
52	1.29	75.91	2.02	170	7200	0.45	0.56	0.81	137
53	0.94	93.39	1.65	120	5200	0.65	0.55	1.14	136
54	0.91	27.80	2.57	176	4600	0.29	0.51	0.49	86
55	0.65	80.72	2.19	63	4400	1.64	0.67	3.02	190
56	1.15	30.32	2.67	160	6000	0.45	0.52	0.76	121
57	1.39	27.25	2.19	160	9367	0.54	0.68	1.17	187
58	0.94	83.47	1.69	95	7300	1.04	0.78	2.41	229
59	0.35	75.49	2.51	65	2000	0.82	0.58	1.46	95
60	1.20	74.60	2.26	180	6500	0.37	0.54	0.66	118
61	1.34	81.59	2.38	150	7000	0.59	0.52	0.99	148
62	0.29	64.58	2.76	110	1500	0.24	0.52	0.41	45
63	1.52	97.74	2.09	185	8600	0.45	0.56	0.81	151
64	0.95	22.37	3.02	140	8000	0.49	0.84	1.31	184
65	1.49	46.39	2.84	170	12000	0.51	0.81	1.33	226
66	1.97	78.13	2.40	260	15000	0.29	0.76	0.73	191
67	1.06	81.88	0.84	167	5100	0.38	0.48	0.60	100
68	1.24	80.20	2.02	130	6500	0.73	0.53	1.20	156
69	1.23	82.06	2.31	240	6500	0.21	0.53	0.38	90
70	1.57	98.49	2.03	195	8665	0.41	0.55	0.74	144
71	0.83	71.77	1.68	95	5800	0.92	0.70	1.95	185
72	1.45	73.97	2.10	200	8000	0.36	0.55	0.65	131
73	0.62	58.98	2.86	104	3300	0.58	0.53	0.97	101
74	0.67	36.07	3.01	80	3600	1.04	0.54	1.68	134
75	1.04	58.48	2.29	130	6500	0.62	0.62	1.22	158
76	0.85	88.78	2.34	185	5075	0.25	0.60	0.49	91
77	1.41	89.76	1.54	190	8300	0.39	0.59	0.75	142
78	1.06	84.38	2.18	170	6000	0.37	0.57	0.68	115
79	1.33	83.77	2.27	175	7500	0.44	0.56	0.79	139
80	1.22	66.96	2.07	170	6300	0.42	0.51	0.71	120
81	0.74	48.83	2.79	80	4991	1.15	0.68	2.29	183
82	2.23	66.75	2.47	215	15277	0.48	0.69	1.06	229
83	1.53	97.09	1.55	180	7917	0.47	0.52	0.79	142

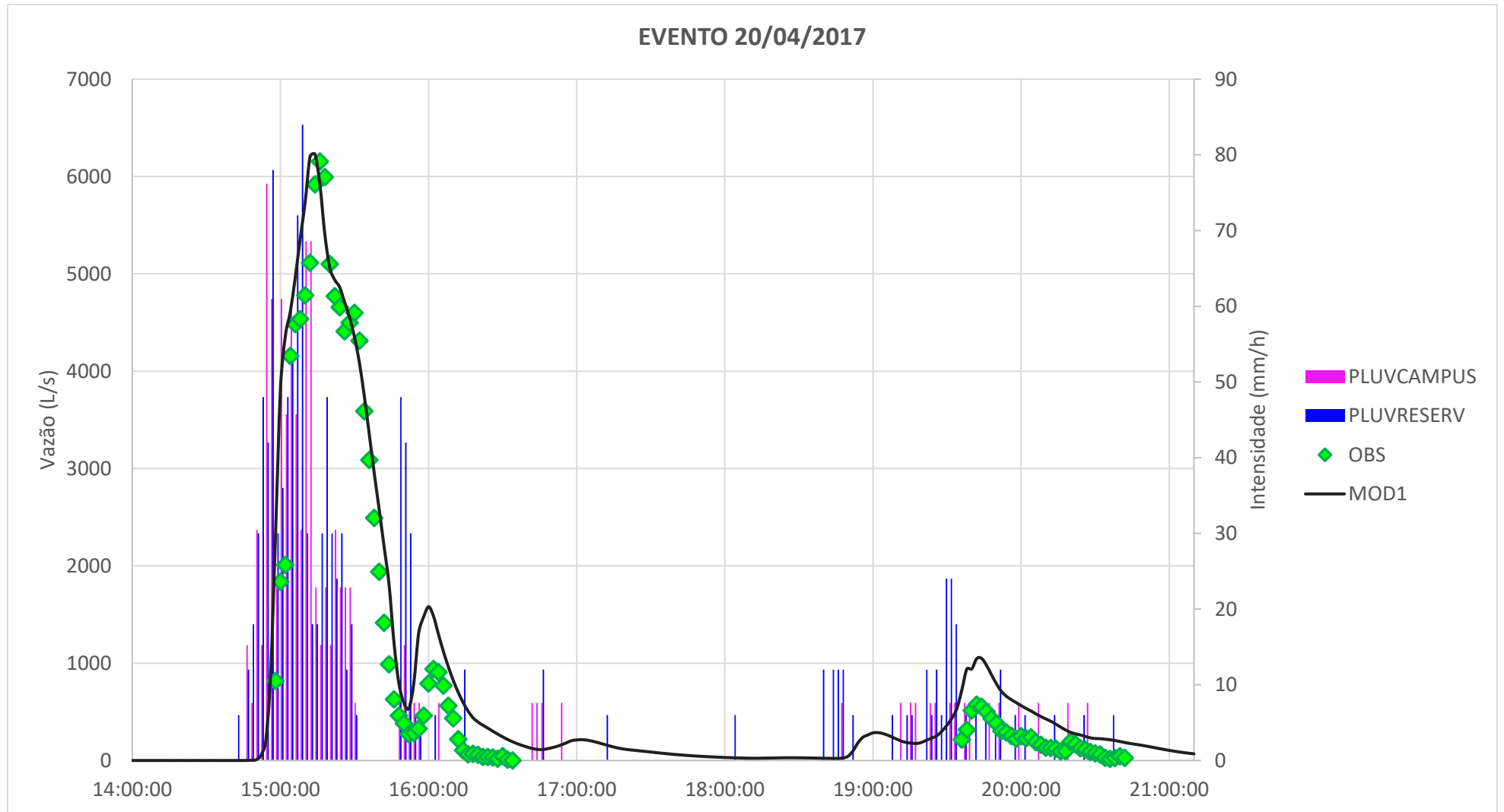
SUB-BACIA	Área (ha)	%ÁREA IMP	Decliv(%)	Parâmetros P/ o Cálculo da					L
				Largura					
				C	Am (m ²)	X	Z	Y	
84	1.03	67.08	2.05	137	5200	0.55	0.50	0.88	121
85	1.24	81.00	2.30	215	7200	0.27	0.58	0.52	111
86	1.79	59.74	2.75	117	9000	1.31	0.50	1.89	221
87	0.73	67.33	1.88	140	3700	0.37	0.51	0.62	86
88	2.56	70.67	2.45	150	16000	1.14	0.63	2.09	314
89	1.05	93.59	2.39	190	6500	0.29	0.62	0.59	113
90	2.53	59.93	1.92	330	17670	0.23	0.70	0.54	178
91	1.07	56.65	1.41	200	8400	0.27	0.79	0.70	139
92	1.46	80.39	2.38	180	9000	0.45	0.61	0.90	162
93	1.55	79.41	2.22	195	10150	0.41	0.66	0.87	169
94	0.93	57.27	1.93	200	5900	0.23	0.63	0.49	98
95	1.17	33.24	2.24	90	8636	1.44	0.74	3.00	270
96	1.42	82.95	1.70	190	7343	0.39	0.52	0.66	126
97	2.00	82.34	2.04	242	13804	0.34	0.69	0.77	187
98	3.71	68.99	2.42	270	19000	0.51	0.51	0.84	226
99	0.56	57.42	1.00	110	3100	0.46	0.56	0.83	91
100	0.61	69.30	2.59	110	3677	0.51	0.60	0.98	107
101	1.47	95.77	1.96	180	8700	0.46	0.59	0.87	156
102	1.43	85.82	1.36	230	9100	0.27	0.63	0.57	131
103	2.72	63.64	1.66	330	14500	0.25	0.53	0.44	146
104	2.63	81.13	2.02	340	15000	0.23	0.57	0.43	147
105	0.53	65.08	1.48	110	2750	0.43	0.52	0.74	81
106	3.13	61.45	1.88	130	26000	1.85	0.83	4.05	527
107	0.67	56.51	1.57	125	2766	0.43	0.41	0.57	72
108	3.05	31.83	2.02	287	16000	0.37	0.52	0.64	182
109	1.17	90.62	1.85	180	8100	0.36	0.69	0.82	147
110	5.57	51.44	2.19	325	32200	0.53	0.58	0.98	317
111	3.00	54.08	1.81	350	16000	0.24	0.53	0.43	152
112	0.59	71.19	1.76	91	3300	0.71	0.56	1.24	113
113	5.67	30.43	1.72	400	36500	0.35	0.64	0.75	299
114	3.59	39.96	1.79	490	19800	0.15	0.55	0.28	136
115	1.40	39.37	1.43	270	9400	0.19	0.67	0.43	116
116	0.79	55.47	1.91	120	4000	0.55	0.50	0.89	106
117	0.20	92.34	0.98	50	1300	0.80	0.65	1.60	80
118	0.94	94.81	1.24	130	5500	0.56	0.59	1.04	135
120	0.90	95.24	1.48	130	4700	0.53	0.52	0.89	116
121	0.38	65.65	1.80	92	2050	0.45	0.54	0.78	72
122	0.95	48.30	2.31	125	6255	0.61	0.66	1.27	159
123	0.42	48.49	1.28	83	2920	0.61	0.70	1.34	111
124	1.26	66.60	1.82	170	7500	0.44	0.59	0.84	143
125	0.52	58.40	2.37	93	3300	0.60	0.64	1.21	113
126	0.16	21.01	2.88	52	806	0.58	0.51	0.95	49
127	1.34	65.04	2.59	160	8900	0.52	0.67	1.11	178
128	0.86	31.84	1.28	80	4400	1.34	0.51	1.96	157

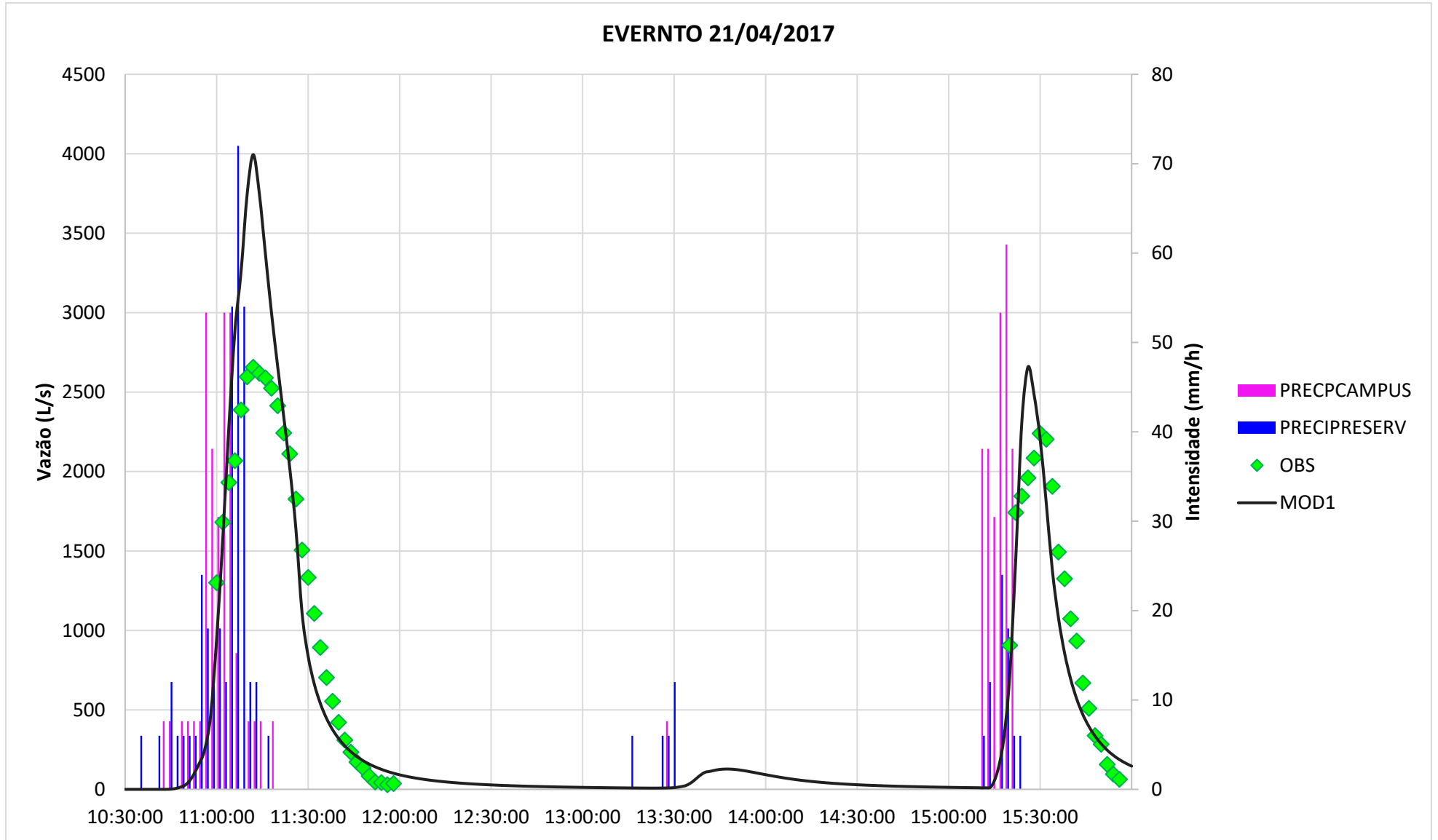
SUB- BACIA	Área (ha)	%ÁREA IMP	Decliv(%)	Parâmetros P/ o Cálculo da Largura					L
				C	Am (m²)	X	Z	Y	
129	0.38	60.58	1.54	85	2000	0.53	0.53	0.89	75
130	0.83	56.33	1.88	113	4300	0.65	0.52	1.06	120
131	1.52	55.37	1.99	190	8500	0.42	0.56	0.76	145
132	0.87	75.75	2.04	140	4500	0.44	0.52	0.74	104
133	0.95	68.75	1.96	100	5000	0.95	0.52	1.51	151
134	0.95	52.38	1.30	165	9400	0.35	0.98	1.13	187
135	1.12	61.21	2.53	160	6900	0.44	0.61	0.87	140

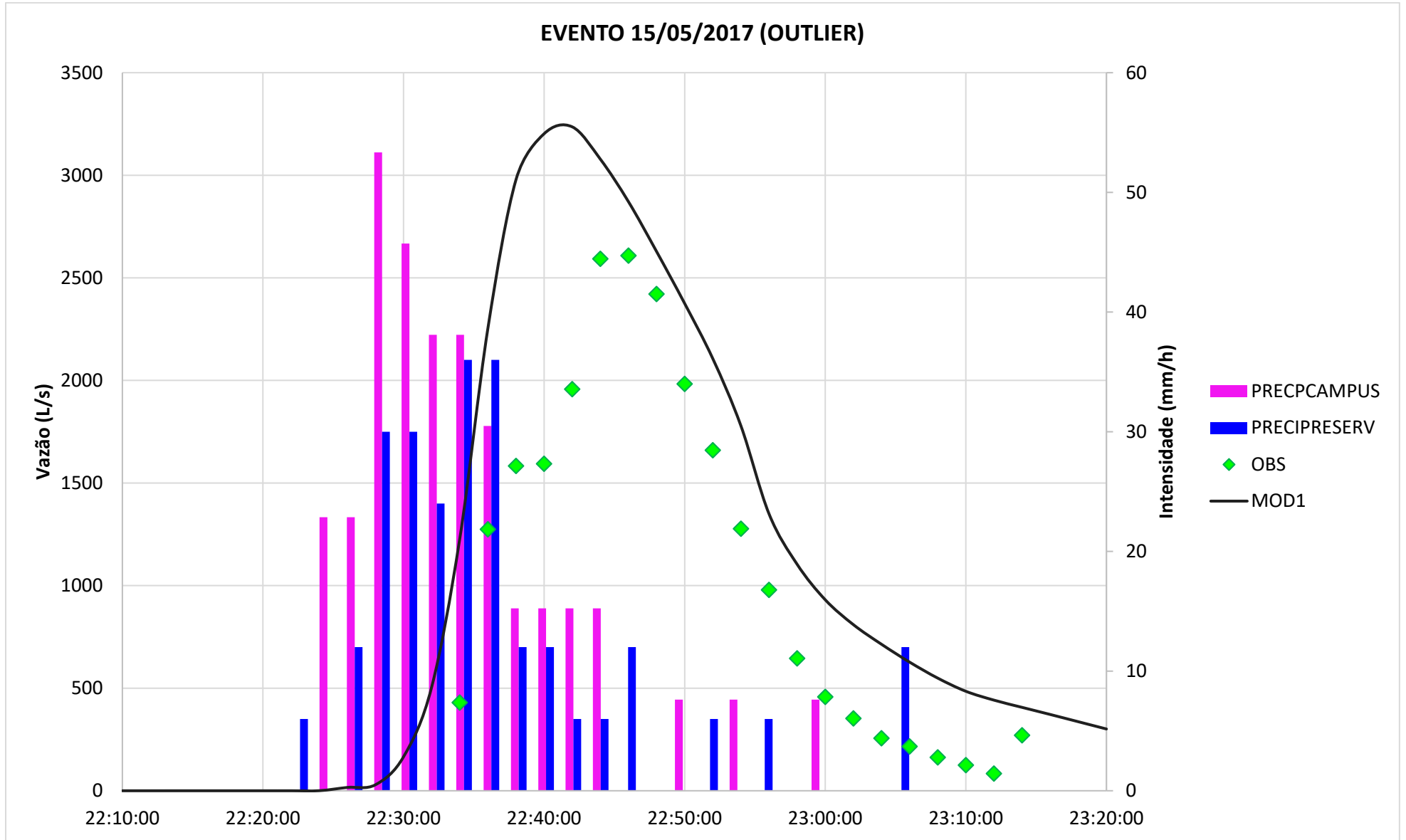
ANEXO C – HIDROGRAMAS OBSERVADOS E SIMULADOS

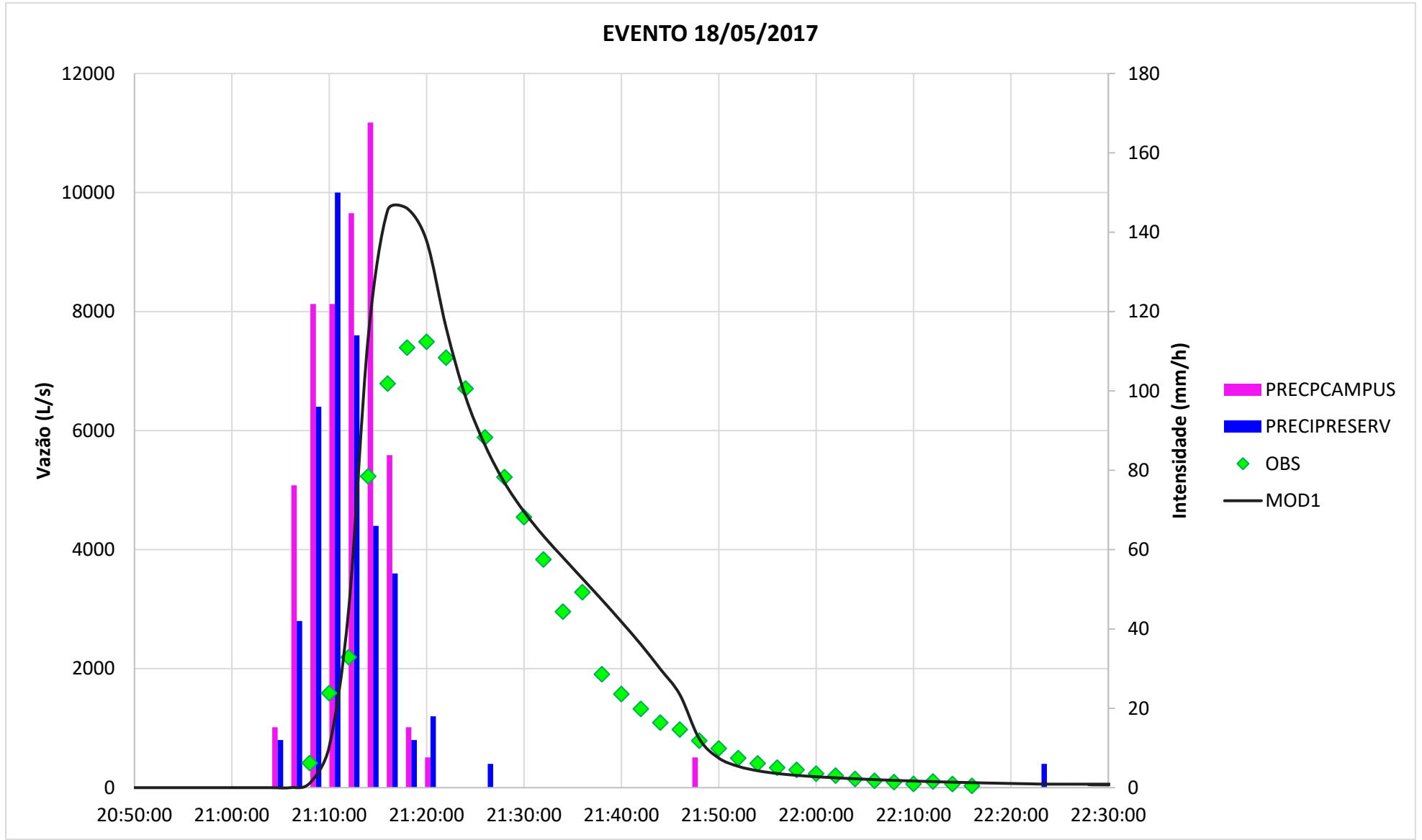


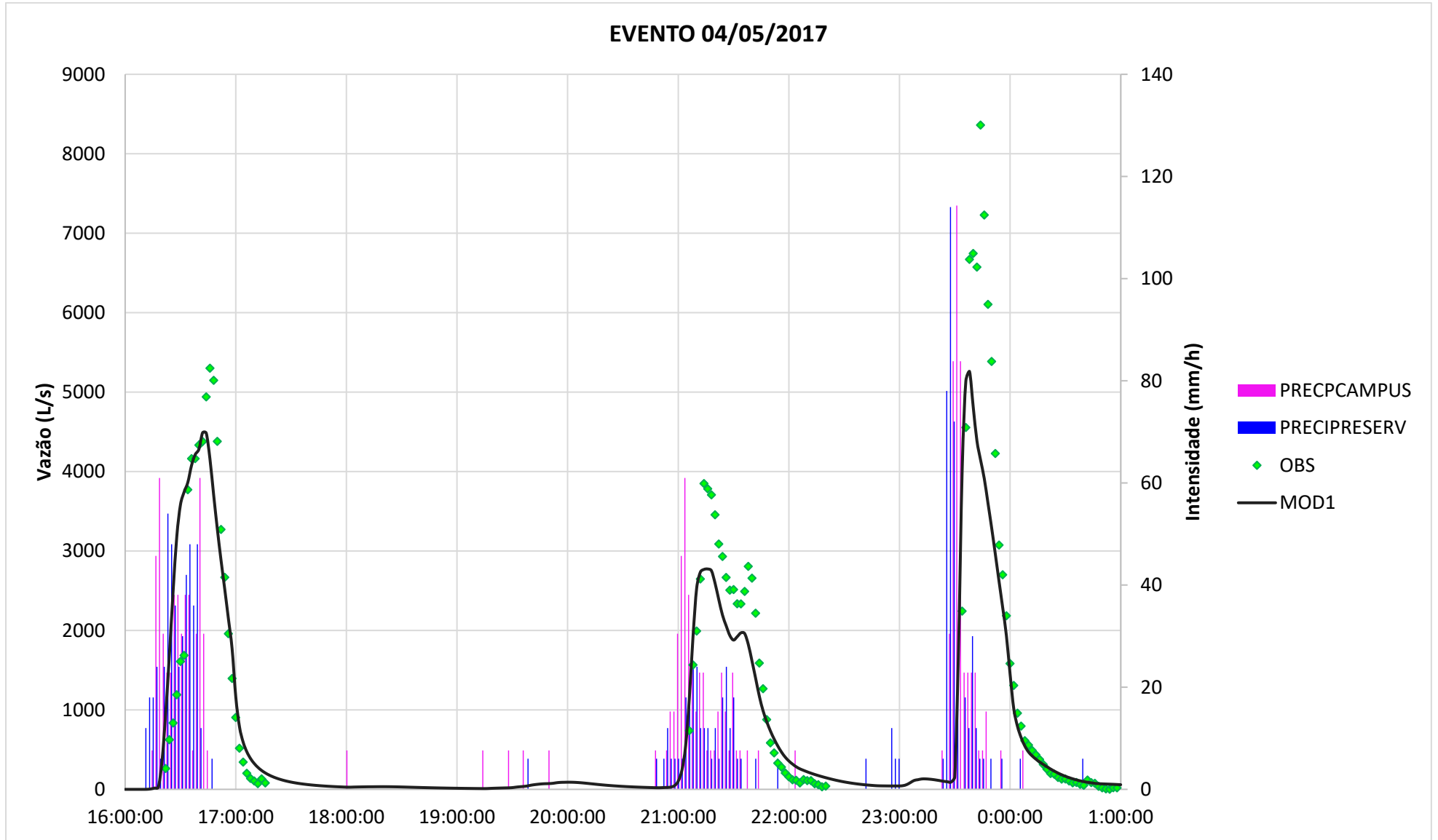


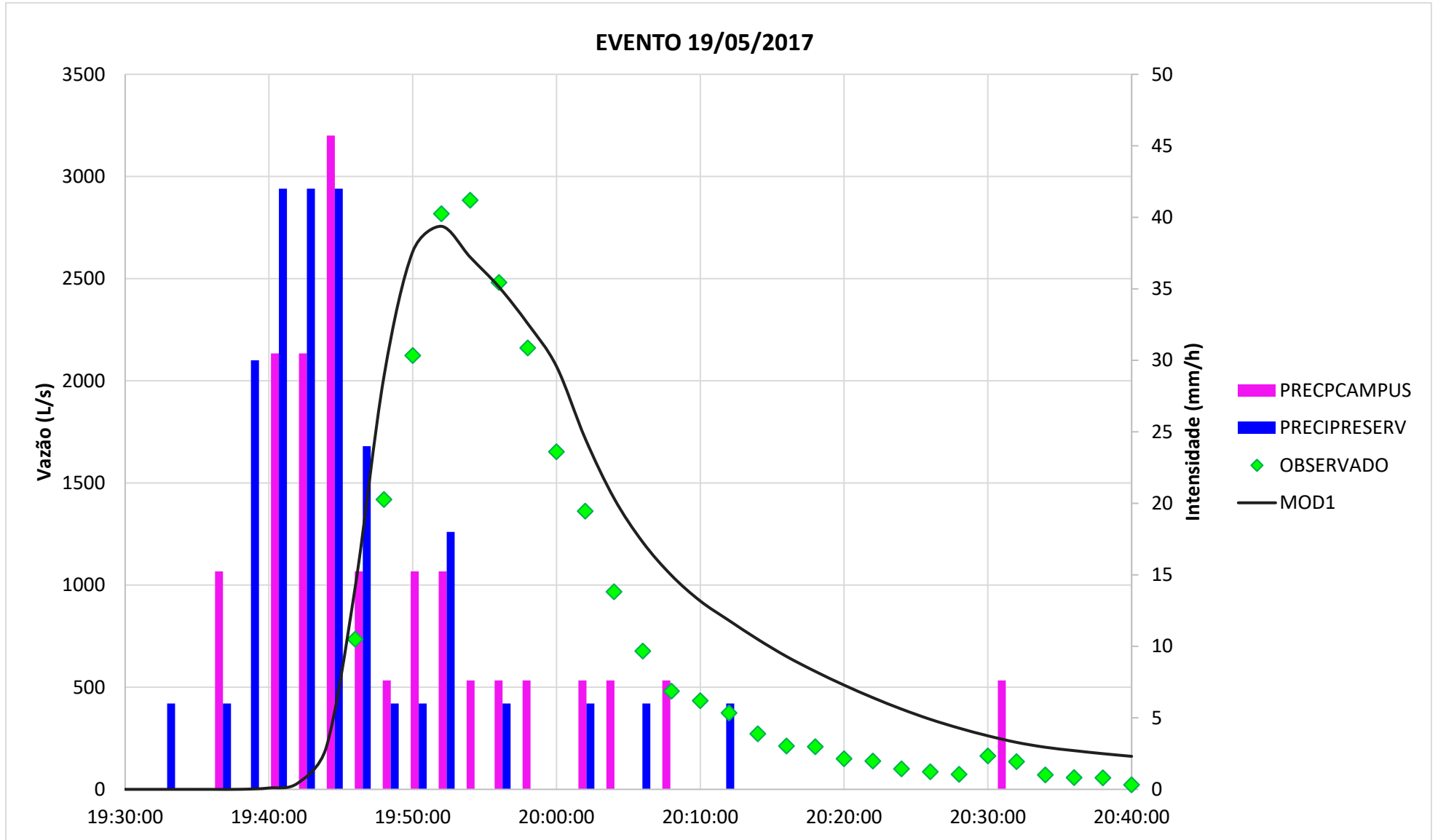


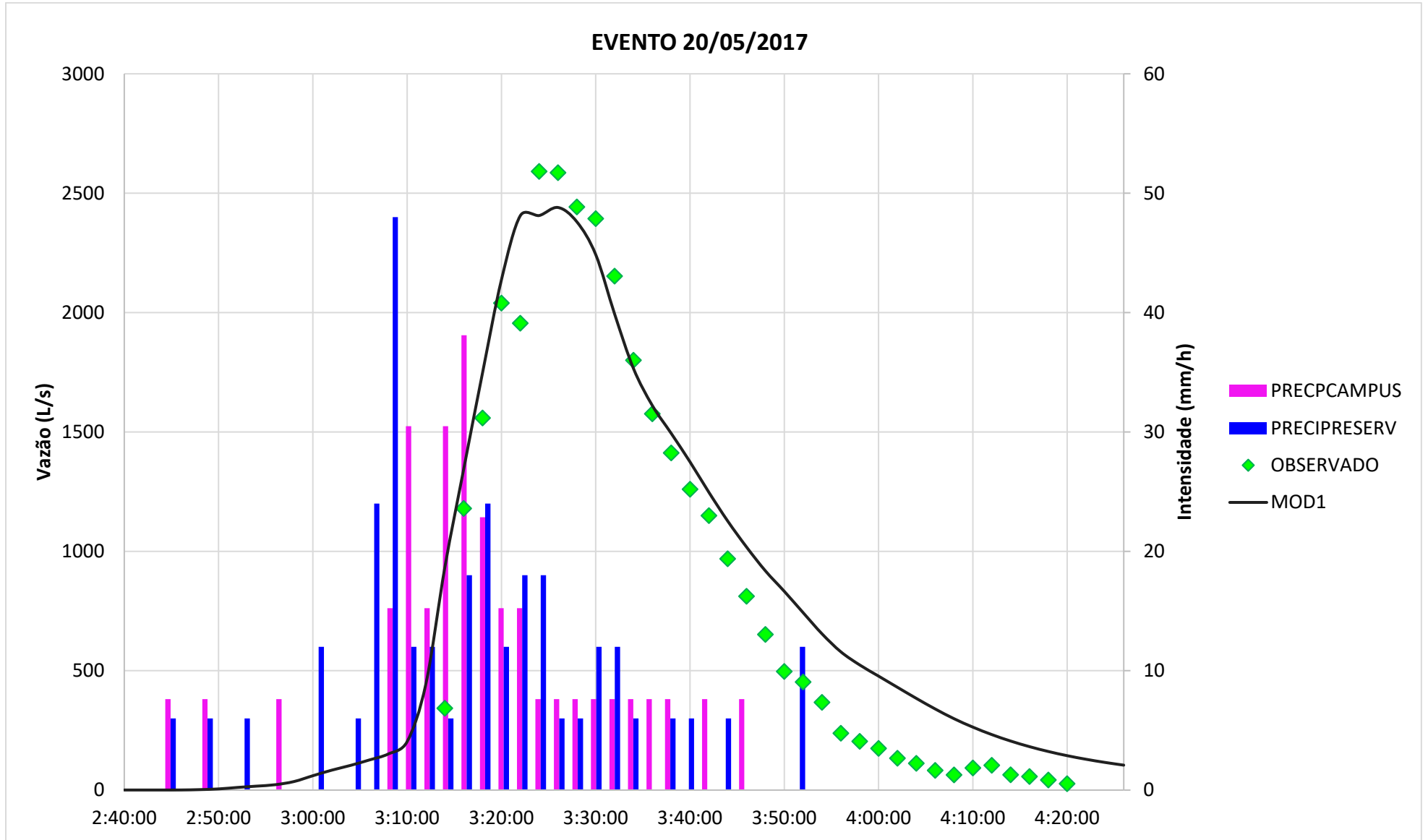


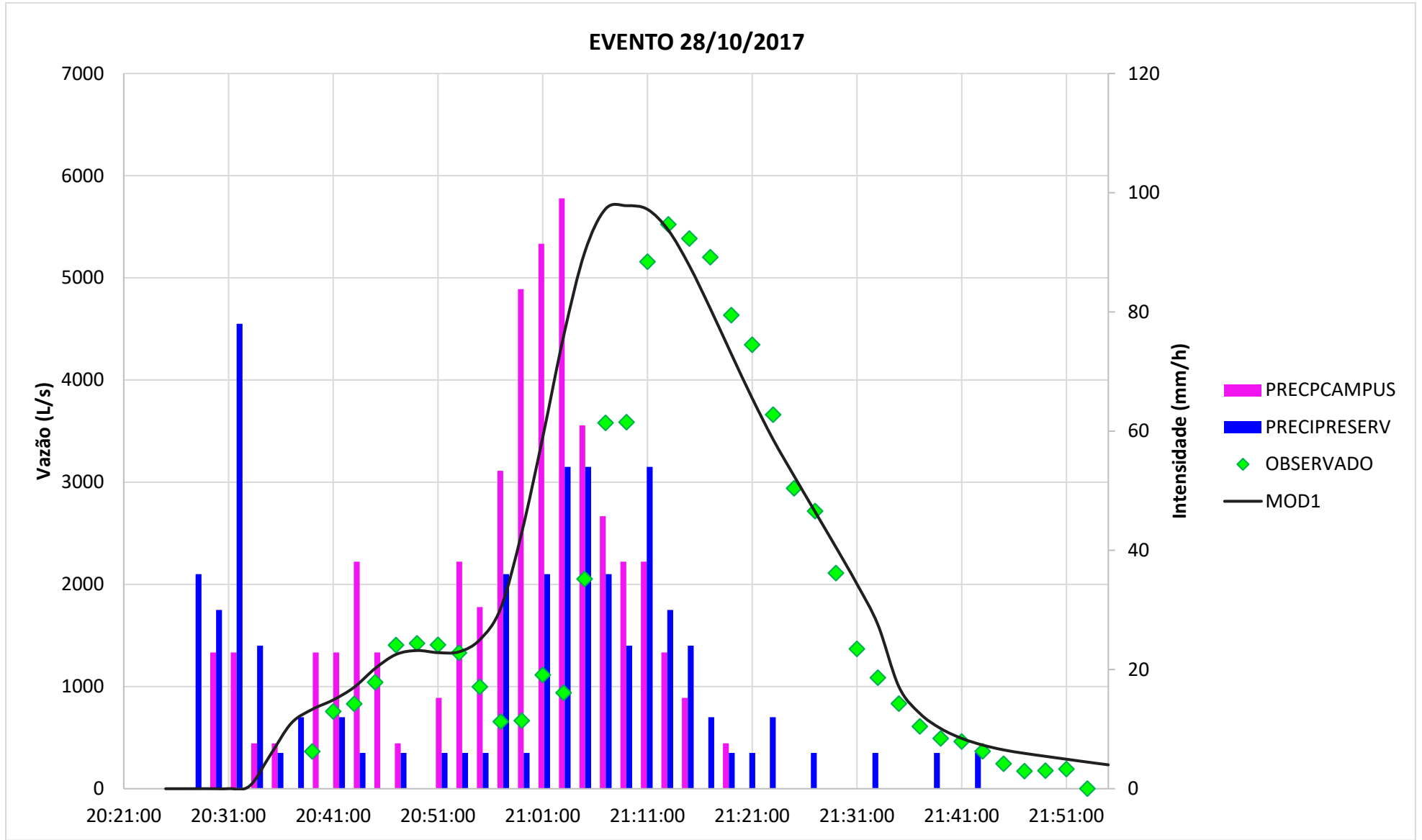


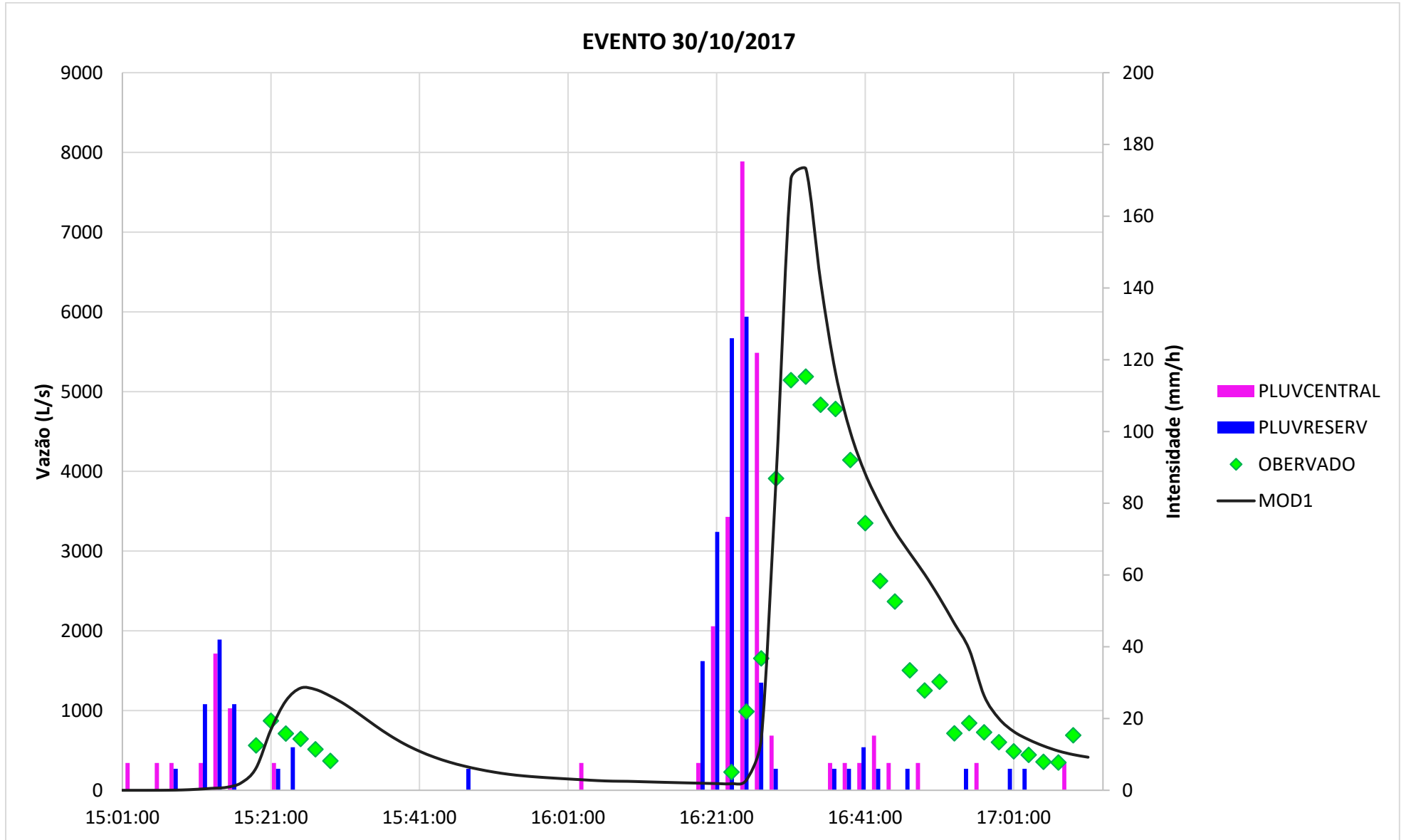


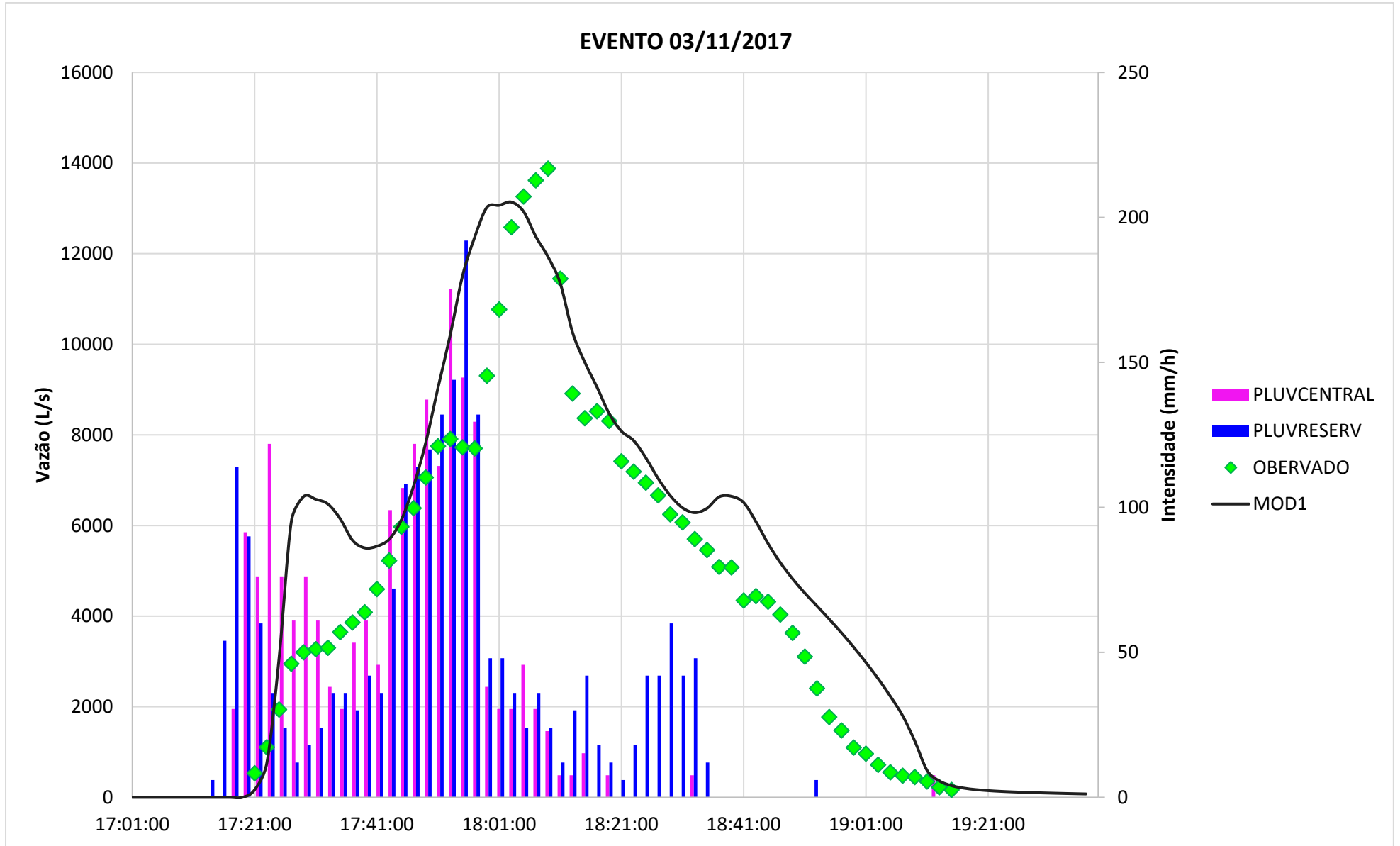


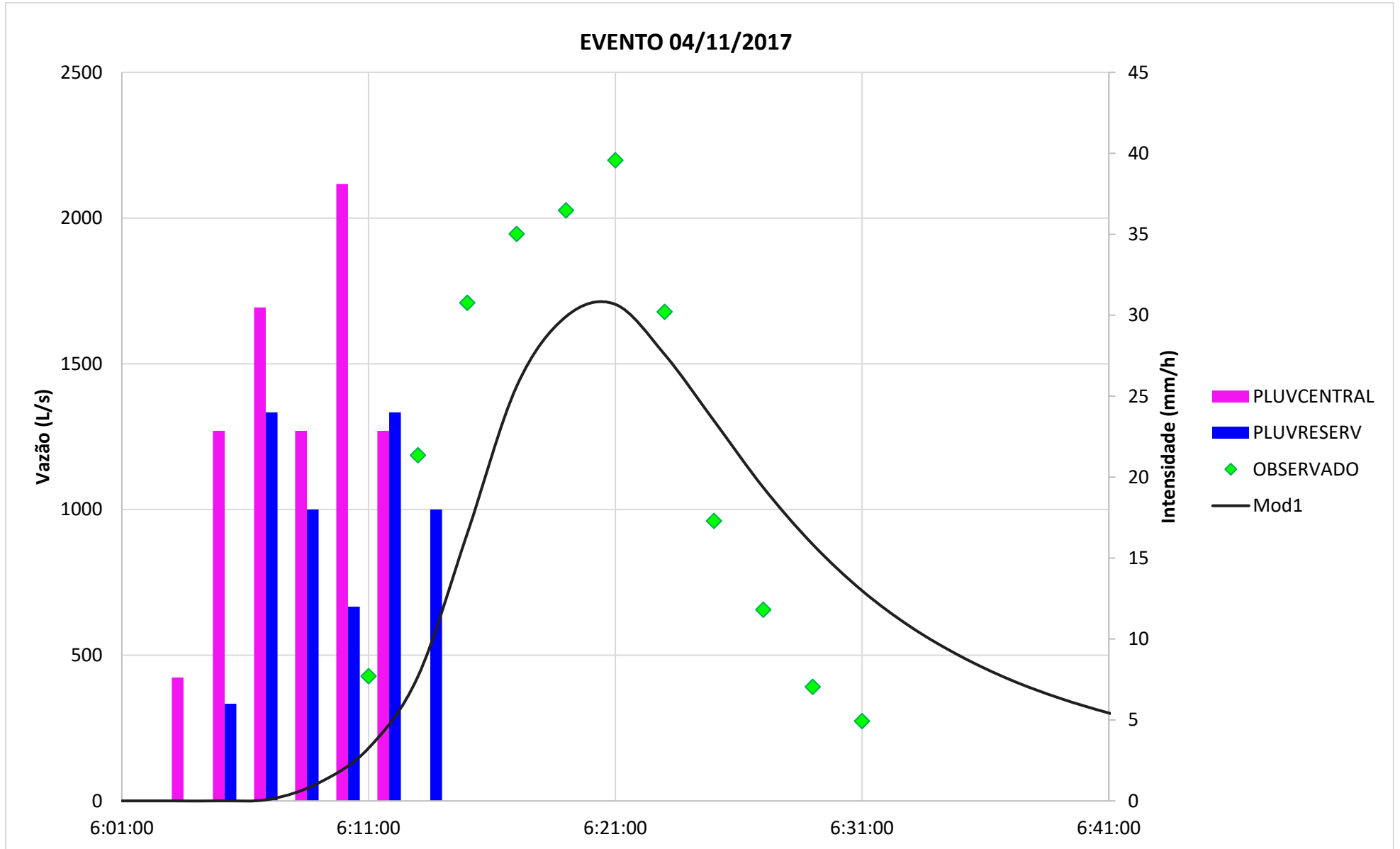


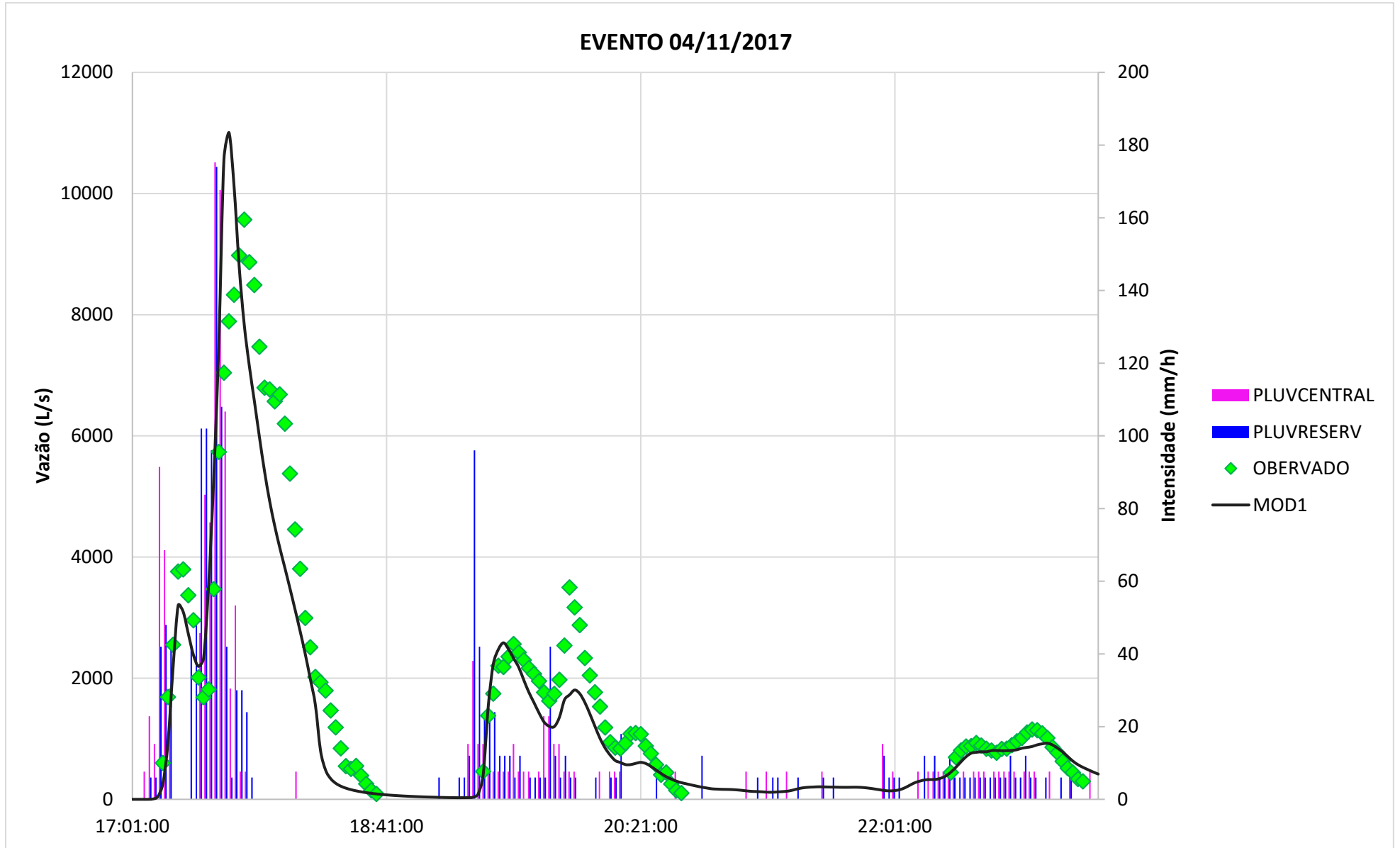


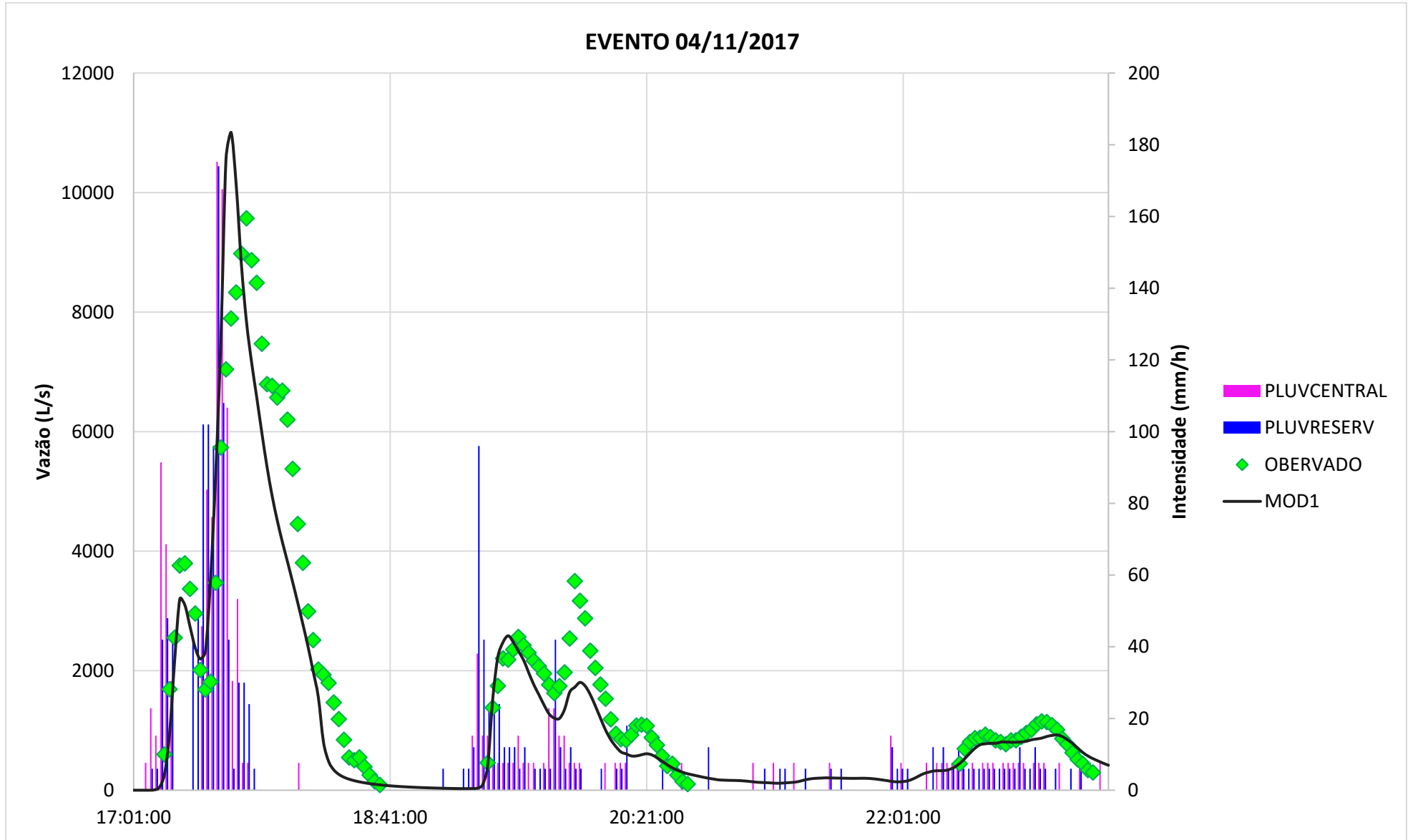


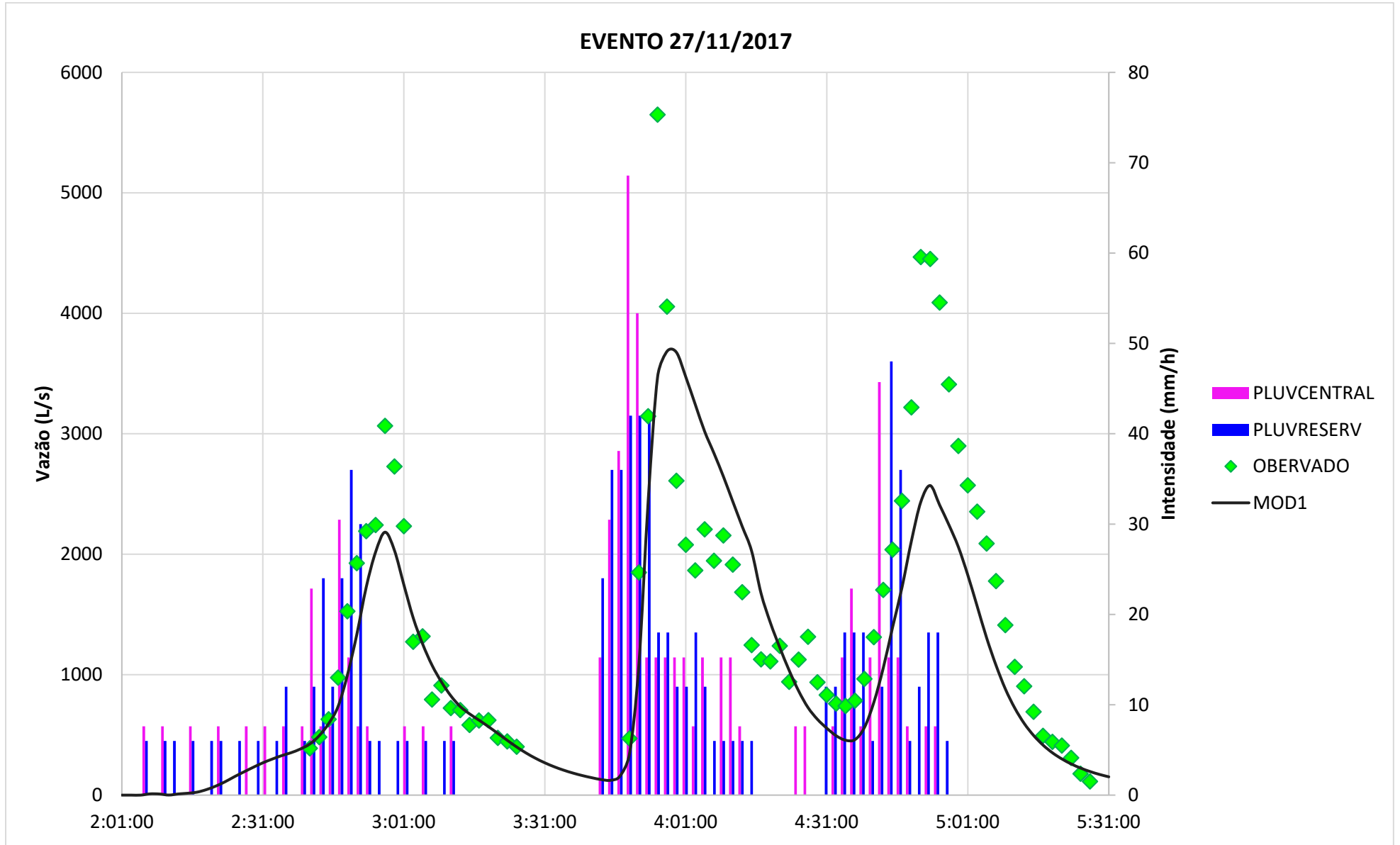


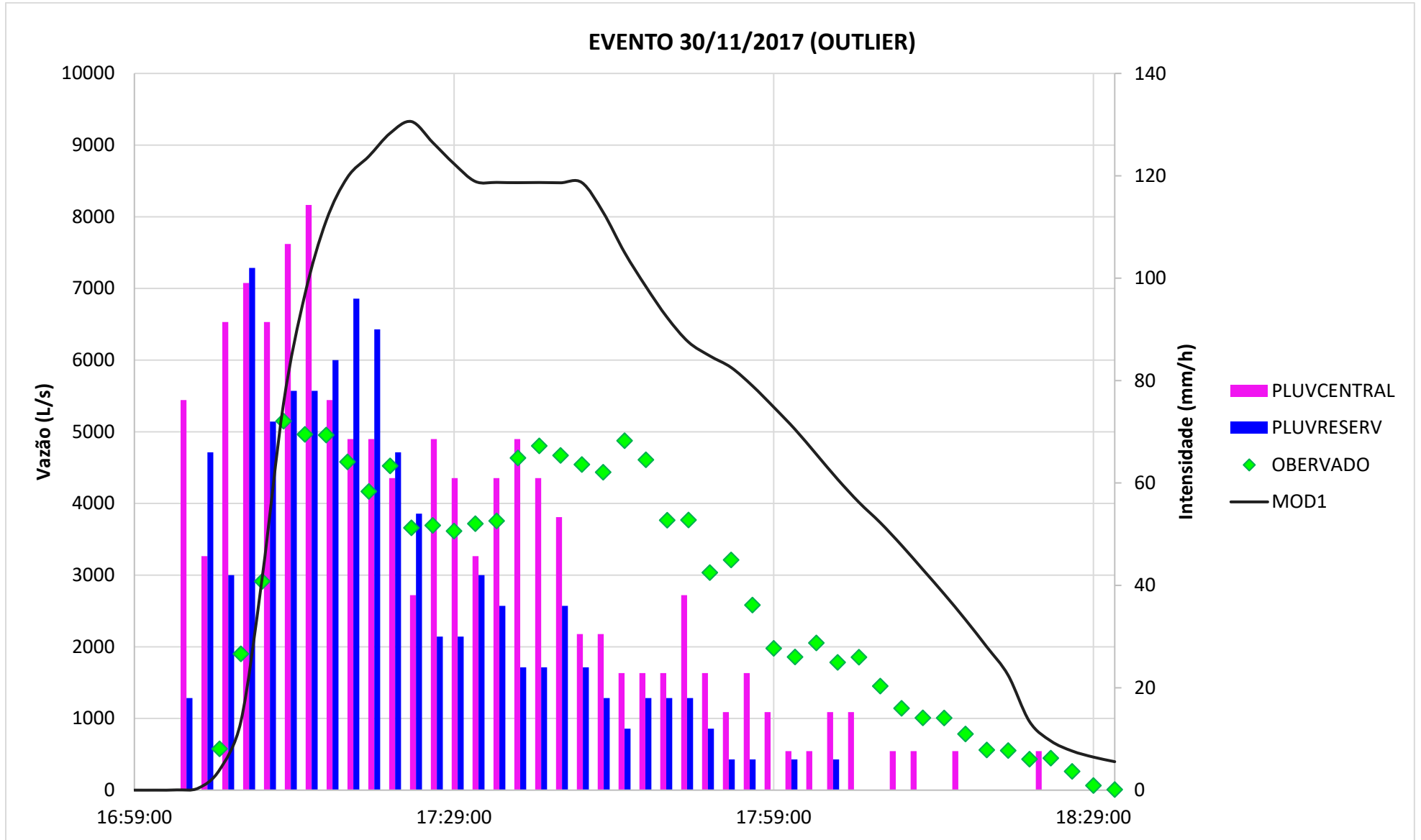


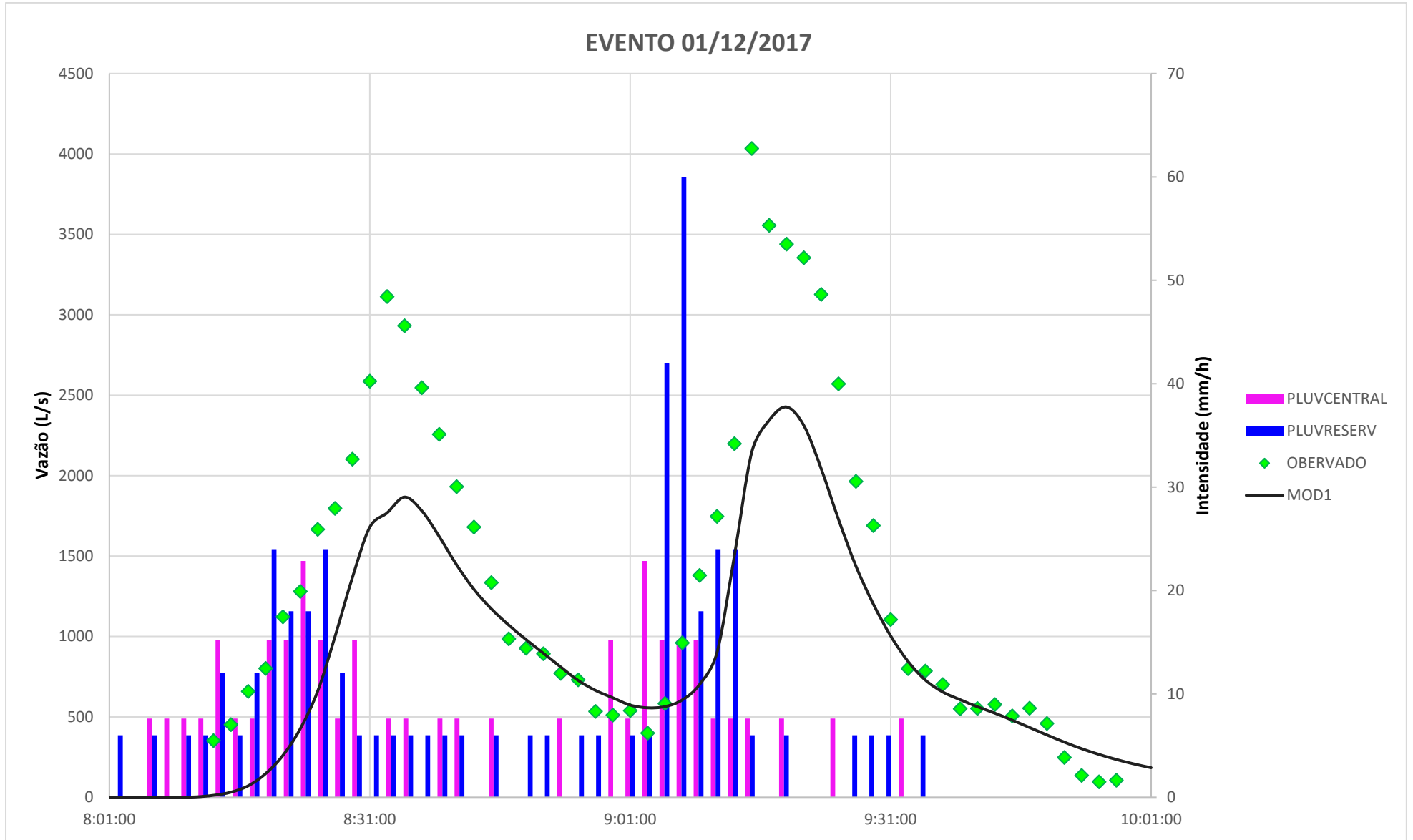


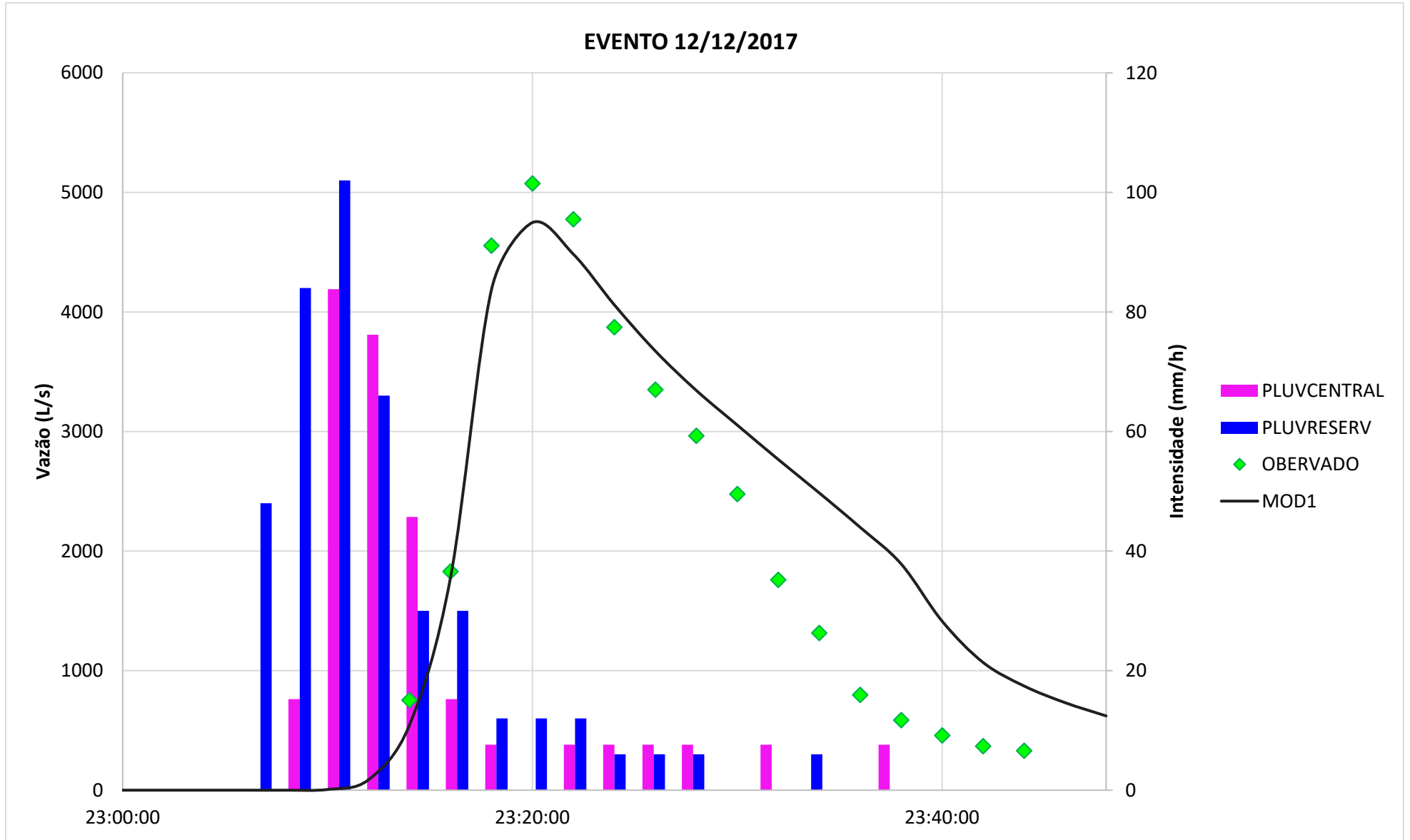


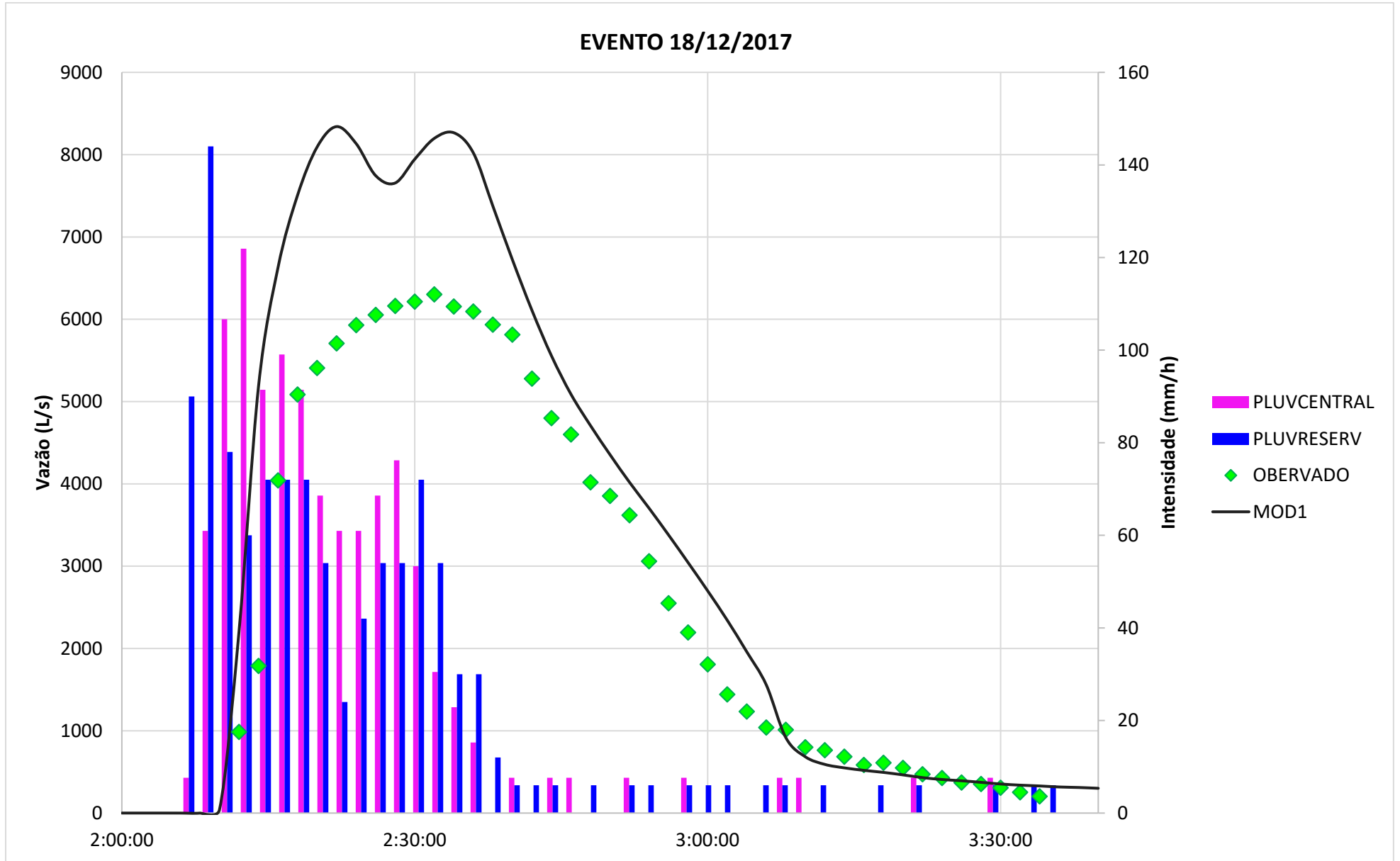


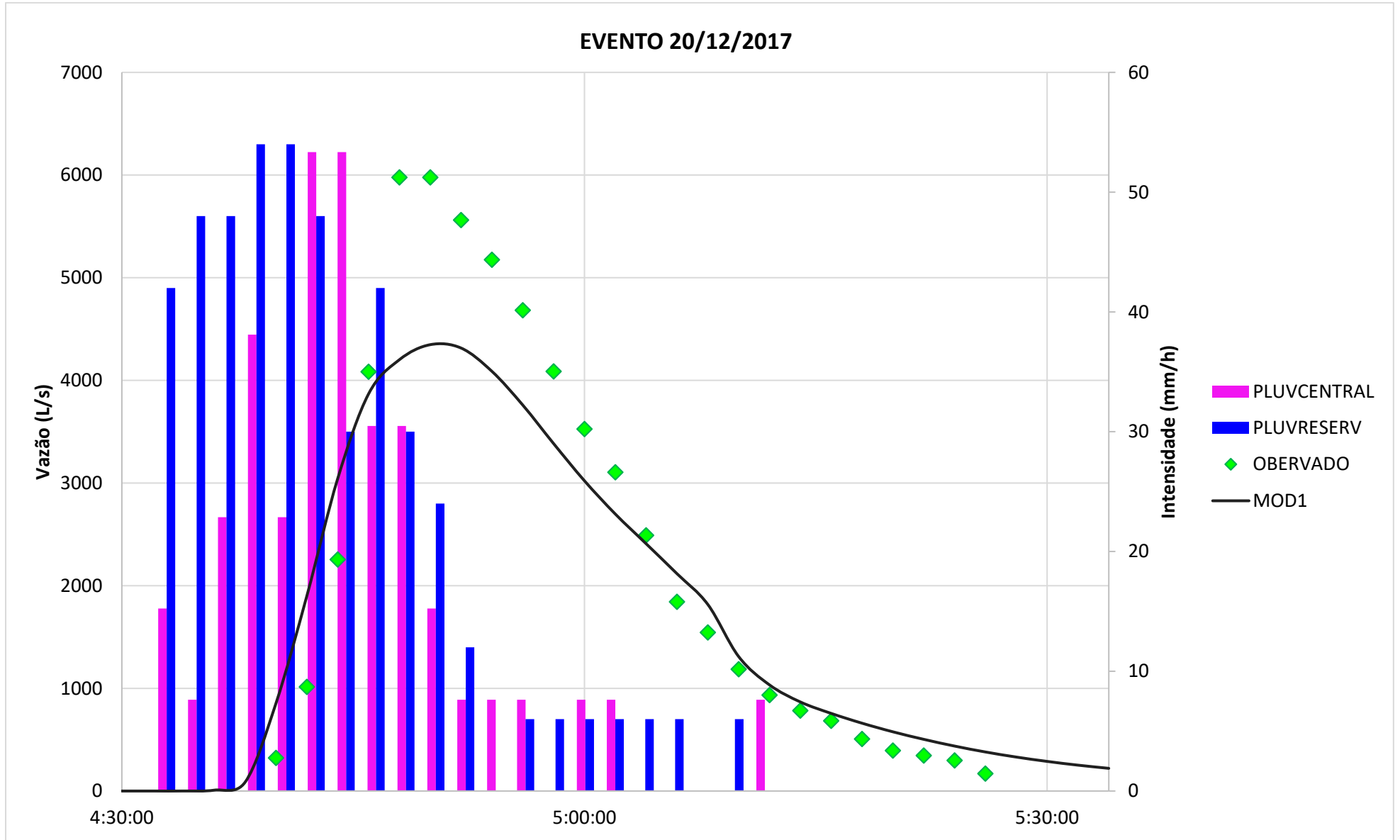


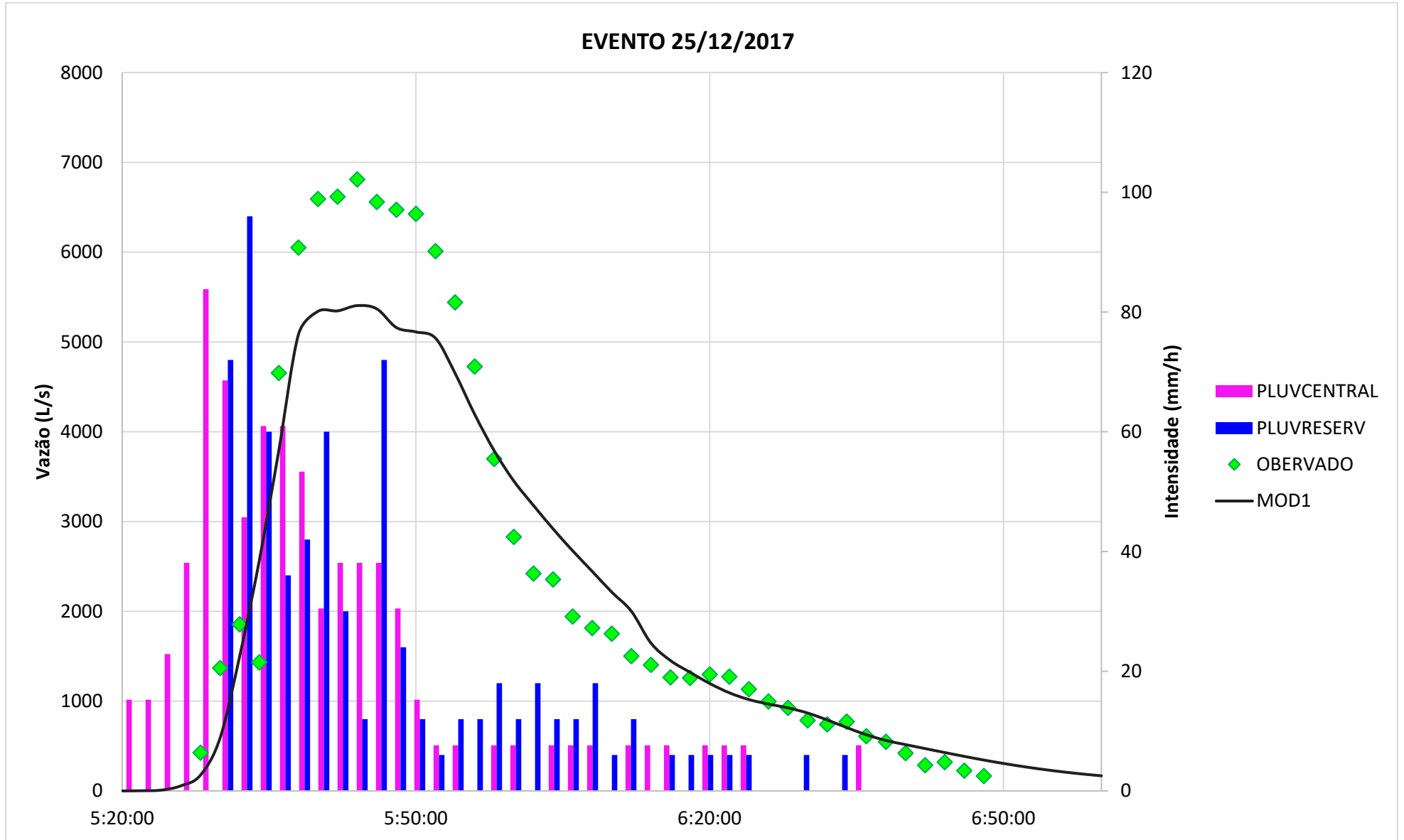


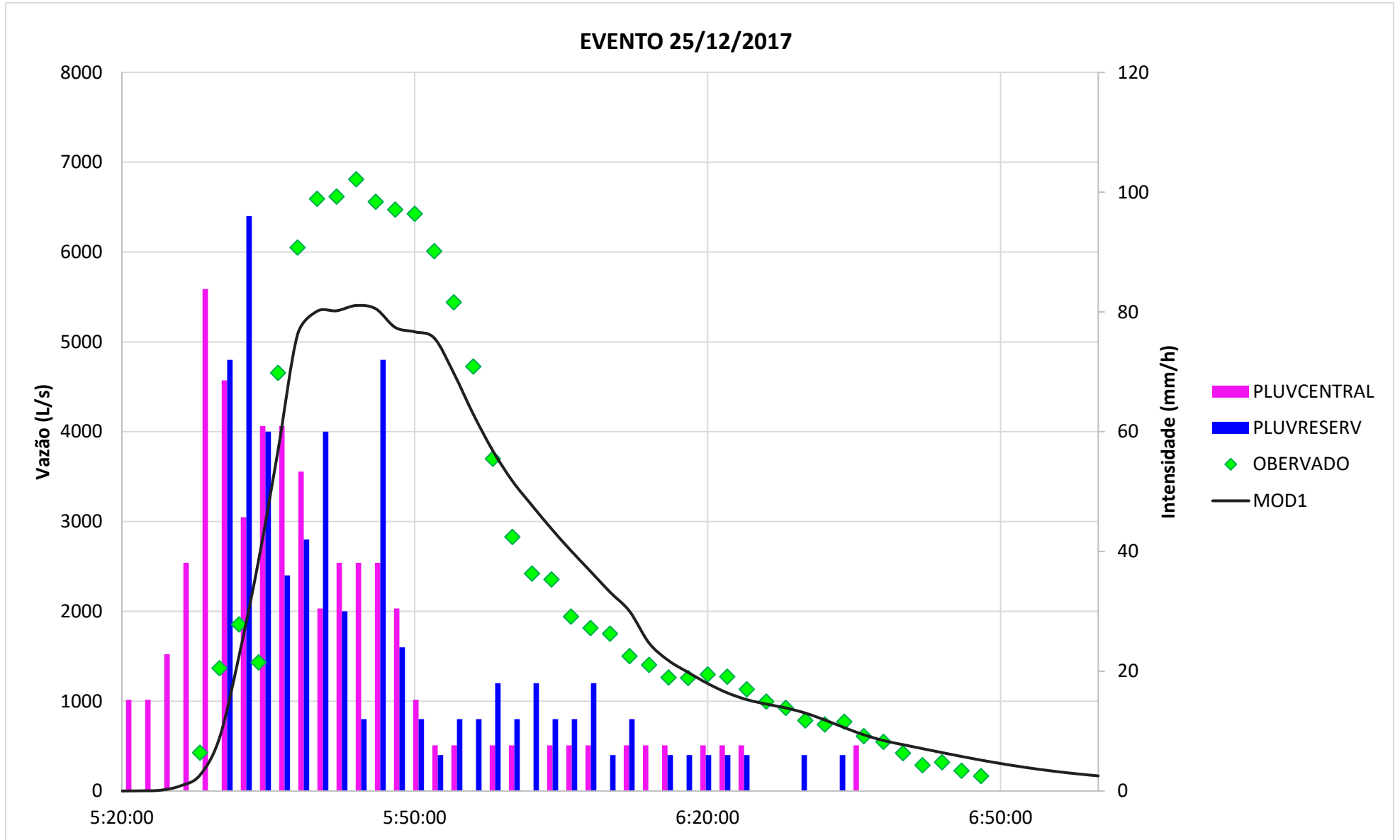


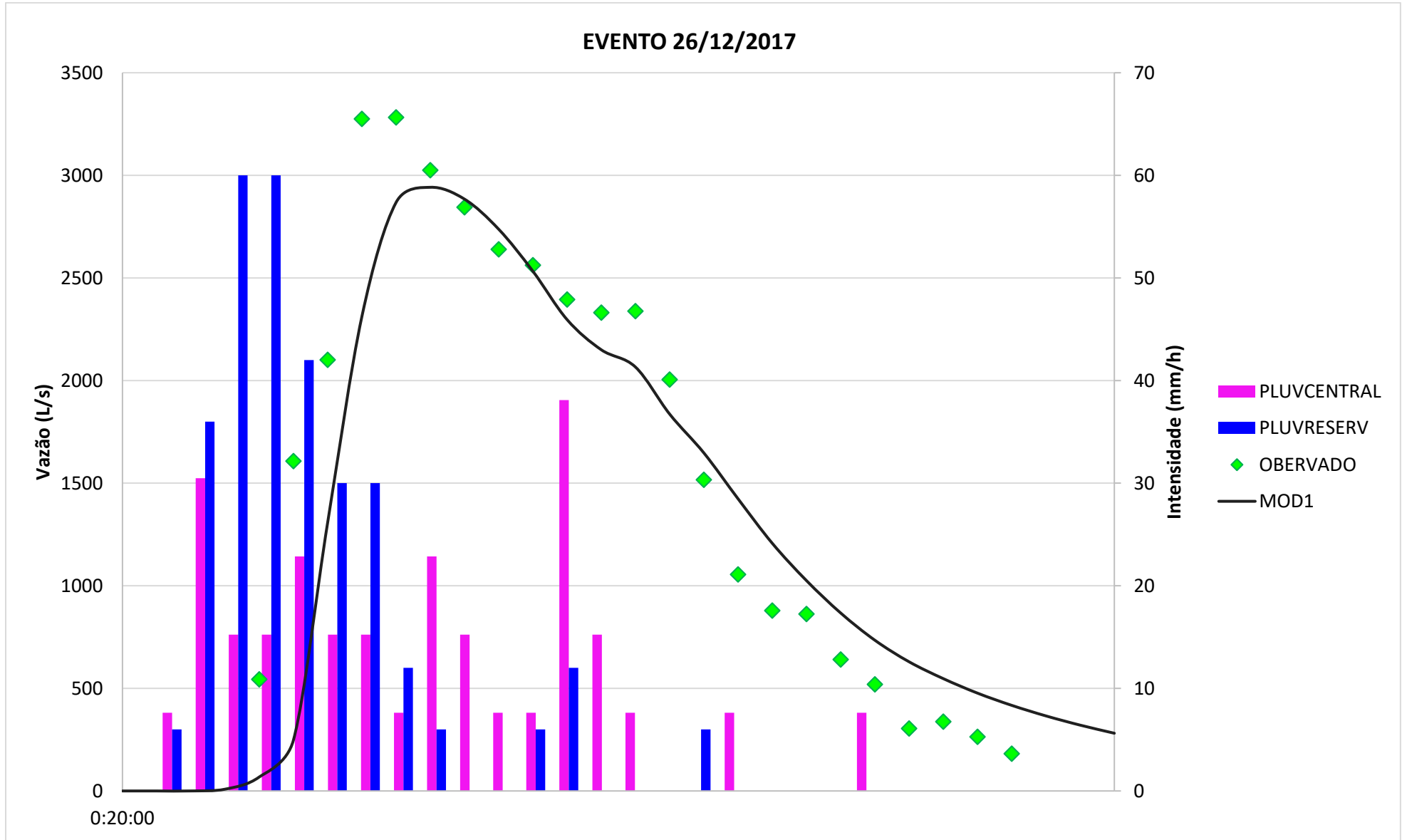


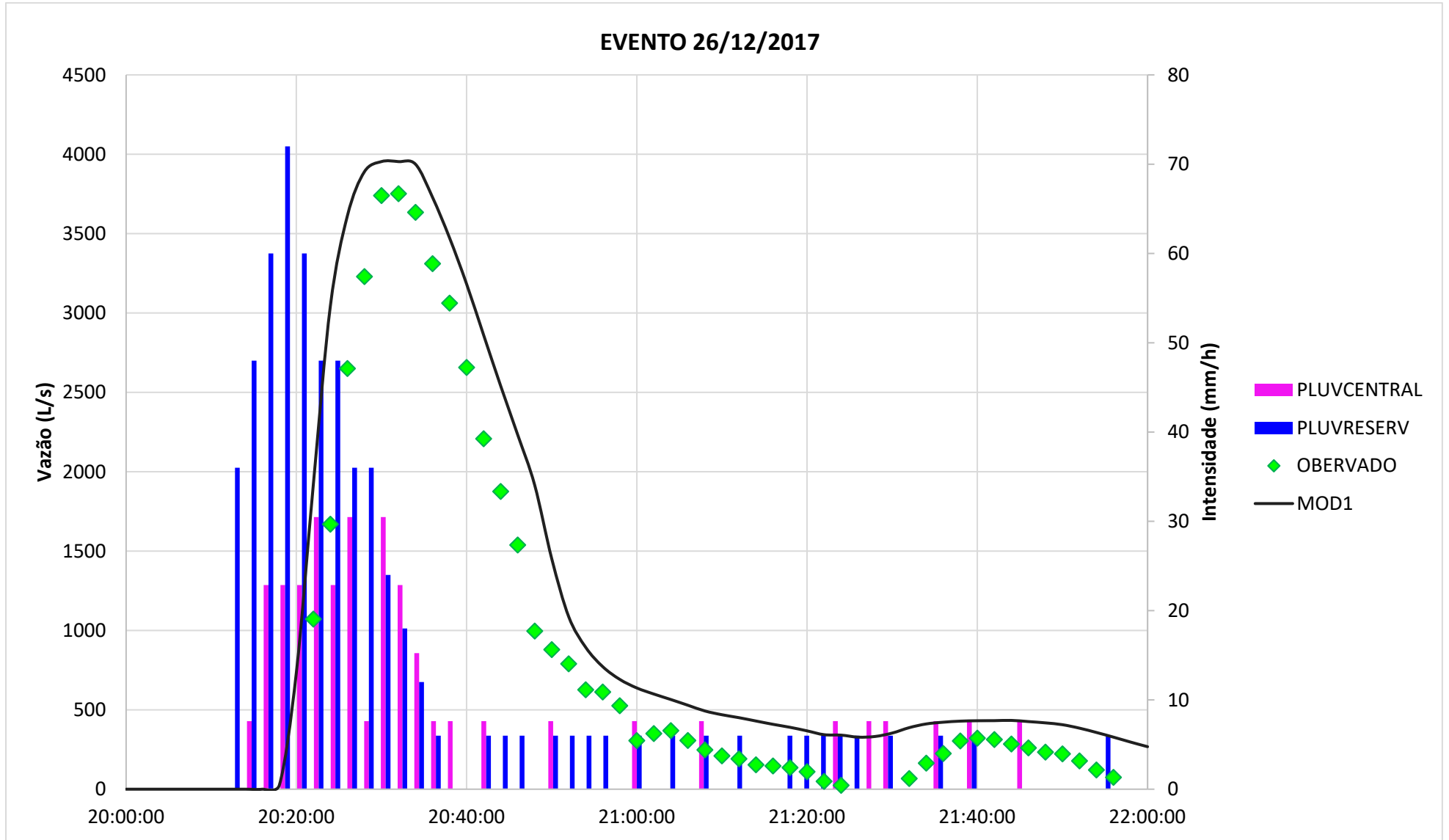








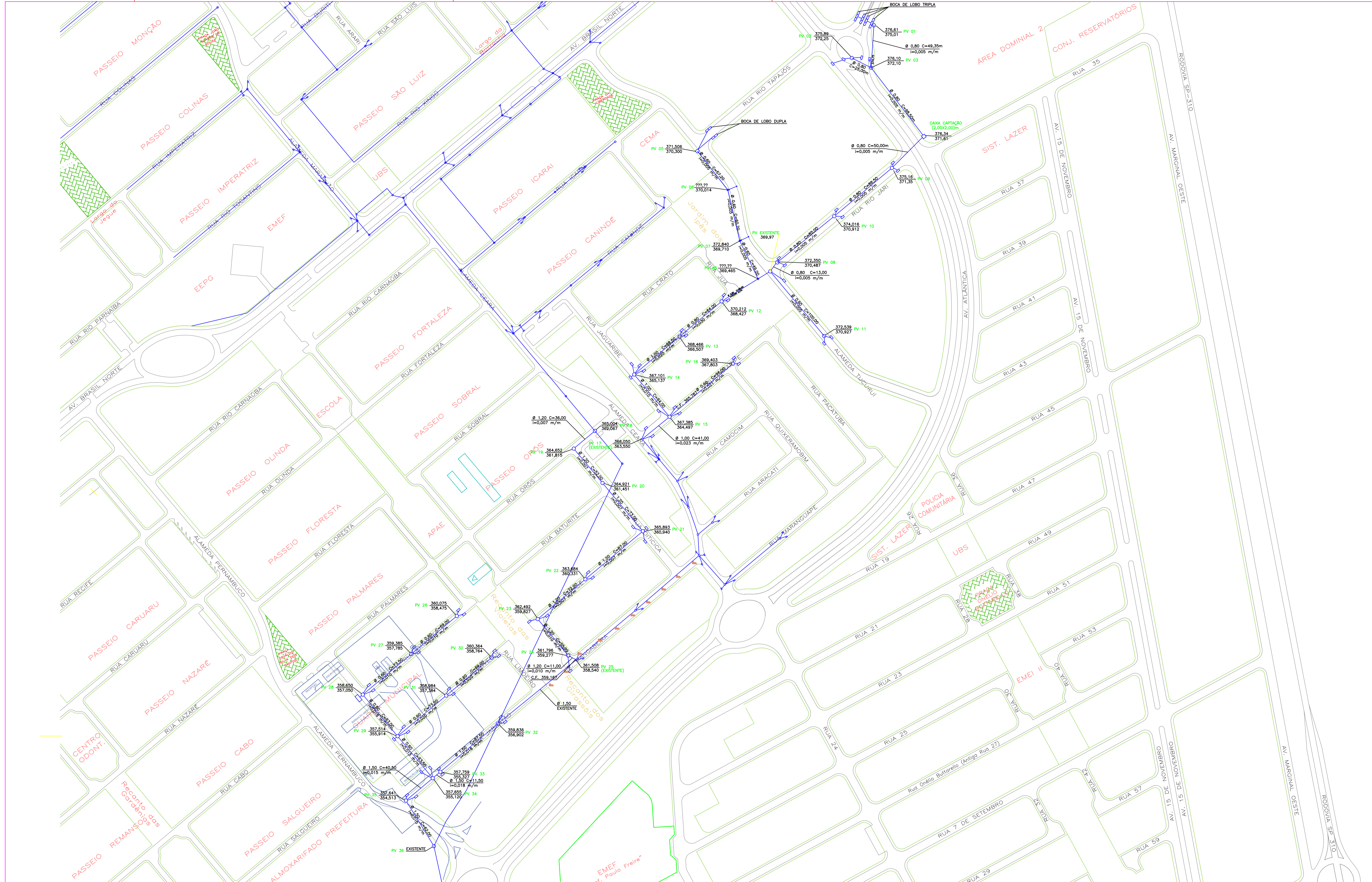






- LEGENDA**
- GALERIA EXISTENTE - Ø400
 - GALERIA EXISTENTE - Ø500
 - GALERIA EXISTENTE - Ø600
 - GALERIA EXISTENTE - Ø700
 - GALERIA EXISTENTE - Ø800
 - GALERIA EXISTENTE - Ø900
 - GALERIA EXISTENTE - Ø1000
 - GALERIA EXISTENTE - Ø1200
 - GALERIA EXISTENTE - Ø2000
 - GALERIA NÃO ESPECIFICADA
 - BOCA DE LOBO EXISTENTE
 - CAIXA

 HIDRÁULICA E SANEAMENTO	FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL		
	SISTEMA DE DRENAGEM DE ILHA SOLTEIRA		
CENTRO – JARDIM AEROPORTO			
Mauricio A. Santini Junior	Data 2018/1SEM	Escala 1:5000	Folha 1-3




 HIDRAULICA E SANEAMENTO	FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL		
	SISTEMA DE DRENAGEM DE ILHA SOLTEIRA		
JARDIM MIRIM			
Mauricio A. Santini Junior	Data 2018/1SEM	Escala 1:2000	Folha 2-3

LEGENDA

- REDE DE DRENAGEM EXISTENTE
- REDE DE DRENAGEM A IMPLANTADA



 HIDRÁULICA E SANEAMENTO	FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL			
	SISTEMA DE DRENAGEM DE ILHA SOLTEIRA AVENIDA ATLÂNTICA			
Mauricio A. Santini Junior	Data 2018/1SEM	Escala 1:2000	Folha 3-3	