

Guilherme Cantante de Carvalho Prata Ribeiro

# INFLUÊNCIA DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO NA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA

INFLUENCE OF DIGITAL TERRAIN MODELS ON SIMULATION OF HYDRAULIC  
BEHAVIOUR OF DRAINAGE SYSTEMS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil / Ambiente, na área de Especialização em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e pelo Doutor João Paulo Correia Leitão.

Fevereiro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Guilherme Cantante de Carvalho Prata Ribeiro

# **Influência de modelos digitais de terreno na simulação do comportamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana**

## **Influence of digital terrain models on simulation of hydraulic behaviour of drainage systems**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil / Ambiente, na área de Especialização em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e pelo Doutor João Paulo Correia Leitão.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam surgir

Coimbra, 13 de Fevereiro de 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Quero começar por agradecer ao Professor Doutor Nuno Eduardo de Cruz Simões e ao Doutor João Paulo Correia Leitão, por todo o entusiasmo, apoio e dedicação ao longo do período de tempo em que me entreguei a este trabalho.

Aos meus amigos Alexandre Aquino, André Moura, Daniel Pereira, Diogo Ferreira, Eric Inglês, Filipe Miranda, Filipe Rocha, Frutuoso Oliveira, Gonçalo Gomes, João Moreno, João Sena, José Peres, Manuel Portugal, Miguel Lucena, Pedro Marques, Tomás Gonçalves, Catarina Mouraz, Laura Sêco e, em especial, ao Artur Providência, pela magnífica companhia que foram e pela muita ajuda que prestaram ao longo do meu percurso académico.

Ao Professor Doutor José Alfeu Sá Marques, por me ter despertado o gosto pela Hidráulica ao longo do curso.

Aos meus amigos de sempre António Almeida, Carlos V. Santos, Francisco Sousa, João Barreto, João Carvalho, José D. Vieira, José M. Araújo, Manuel Pintanas, Manuel Queirós, Nuno Amante, Paulo Maranha, Pedro B. Rio, Pedro Maranha, Pedro Oliveira, Tomás Loureiro, Tomás Osório, Eugénia Cunha, Francisca C. Machado, Madalena Ataíde e Margarida M. Silva.

Ao Professor Doutor Anísio Alberto Martinho e ao Professor Doutor Paulo Providência e Costa por terem sido ajudas inigualáveis durante todo o curso, mostrando sempre muita amizade.

À minha mãe, ao Henrique, à Madalena e à restante família pelo apoio incondicional ao longo de todo este percurso.

Finalmente, à pessoa que ficará mais feliz e orgulhosa por finalmente chegar este dia, que será apenas a primeira pedra de um caminho de sucesso. Dedico-te este trabalho, embora seja pequeno face à grande pessoa que és. Muito obrigado Pai!

## RESUMO

O fenómeno de inundação urbana afecta parte significativa da população com grande frequência, podendo provocar grandes prejuízos socioeconómicos. Com o aumento da impermeabilização dos solos citadinos, devido às novas construções, tem aumentado também o risco de inundação. Assim, em alguns locais, estas são cada vez menos um acontecimento esporádico, para passar a ser quase uma fatalidade, particularmente em dias de precipitação mais elevada.

Tendo em vista a previsão dos danos decorrentes destas inundações, bem como a sua possível redução, podem ser realizadas simulações, utilizando modelos de drenagem urbana, para se prever o comportamento hidráulico da bacia em resultado da ocorrência de um fenómeno de precipitação representativo. Para a construção de um modelo é necessário um vasto leque de dados, sendo que a precisão destes é fulcral para a obtenção de resultados fiáveis e precisos.

Os *drones* são veículos aéreos não tripulados de baixo custo, que podem voar a baixa altitude. A incorporação de uma câmara fotográfica nos mesmos, torna possível a sua utilização para a criação de modelos digitais do terreno (MDT) por fotogrametria. A utilização de modelos baseados neste tipo de informação para simular redes de drenagem urbana, permite representar o escoamento superficial 2D com um elevado nível de precisão.

Na presente dissertação foram utilizados vários modelos de drenagem urbana, os quais foram corridos em diferentes programas de simulação hidráulica, tendo-se posteriormente comparado os respetivos resultados.

Palavras-chave: inundação urbana, drenagem urbana, *drones*, Modelo Digital do Terreno, SWMM, INFOWORKS.

## **ABSTRACT**

The phenomenon of urban flooding affects a significant part of the population with great frequency and can cause great socioeconomic losses. With the increase of waterproofing of the urban soils, due to the new constructions, also the risk of flooding has increased. Therefore, in some places, these are less and less a sporadic occurrence, to turn out to be almost a fatality, particularly on days of higher precipitation.

In order to predict the damage caused by these floods, as well as their possible reduction, simulations using urban drainage models can be carried out to predict the hydraulic behavior of the basin as a result of the occurrence of a representative precipitation phenomenon. For the construction of a model, a wider range of data is necessary, and the precision of these is crucial for reliable and accurate results.

Drones are low-cost, unmanned aerial vehicles that can fly at low altitude. The incorporation of a camera on drones, makes possible its use for the creation of digital terrain models (DTM) by photogrammetry. The use of models based on this type of information to simulate urban drainage networks, allowing the representation of 2D surface flow with a high level of precision.

In this dissertation, several urban drainage models were used, which were run in different hydraulic simulation programs, and the respective results were then compared.

**Keywords:** urban flood, urban drainage, drones, Digital Terrain Model, SWMM, INFOWORKS.

## ÍNDICE

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	ii
Abstract.....	iii
Índice .....	iiiv
Índice de Figuras .....	ivi
Índice de Quadros .....	viii
Abreviaturas.....	xii
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação .....	2
1.2 Objectivos .....	2
1.3 Estrutura da Dissertação .....	2
2 Revisão Bibliográfica e Estado da Arte.....	4
2.1 Drenagem Urbana .....	4
2.1.1 Drenagem Pluvial Urbana .....	5
2.2 Modelação em Hidráulica Urbana .....	8
2.2.1 Equações de Saint-Venant .....	10
2.2.2 Drenagem Dual.....	11
2.3 Modelos Digitais do Terreno .....	12
2.3.1 Formas de obtenção de Modelos Digitais do Terreno.....	12
2.3.2 Métodos de Fusão de Modelos Digitais do Terreno com diferentes resoluções	14
3 Caso de Estudo .....	17
3.1 Análise e Separação dos Eventos Pluviométricos .....	20
3.2 Análise dos Modelos Digitais do Terreno para construção de modelos 1D.....	24
3.3 Análise Dinâmica 1D.....	26
3.4 Análise Dinâmica 1D/2D.....	28
3.5 Avaliação do desempenho dos modelos hidrológicos .....	29
4 Apresentação e Análise dos Resultados .....	31
4.1 Evento 7 .....	32
4.1.1 Colectores a montante .....	32
4.1.2 Colectores Intermédios .....	35
4.1.3 Colectores a Jusante.....	38
4.2 Evento TR100.....	41
4.2.1 Colectores a Montante .....	42
4.2.2 Colectores Intermédios .....	45

---

4.2.3	Colectores a Jusante.....	48
4.3	Resumo dos resultados.....	51
5	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	56
	Referências Bibliográficas.....	58
	Anexo 1 Modelos Hidrológicos e Hidráulicos .....	63
A1.1	Armazenamento em Depressões .....	63
A1.2	Infiltração no Solo .....	63
A1.3	Evapotranspiração.....	65
A1.4	Coefficiente de Escoamento.....	65
A1.5	Método Racional.....	67
A1.6	Método do Hidrograma Unitário .....	67
A1.7	Método Curva Número .....	68
A1.8	Modelo de Reservatório.....	68
A1.9	Modelo de Muskingum.....	69
A1.10	Modelo do Reservatório Não Linear .....	70
	Anexo 2 Resultados para o Evento Pluviométrico 10 .....	71
A2.1	Evento 10.....	71
A2.1.1	Colectores a Montante .....	71
A2.1.2	Colectores Intermédios .....	74
A2.1.3	Colectores a Jusante.....	77
	Anexo 3 - Resultados para o evento pluviométrico TR10 .....	81
A3.1	Evento TR10.....	81
A3.1.1	Colectores a Montante .....	81
A3.1.2	Colectores Intermédios .....	84
A3.1.3	Colectores a Jusante.....	87
	Anexo 4 - Resultados para Os Indicadores de Diferentes Comparações .....	91
A4.1	Evento 7 .....	91
A4.2	Evento 10 .....	93
A4.3	Evento TR10.....	95
A4.4	Evento TR100.....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Apresentação os efeitos da urbanização no escoamento superficial (Urban Drainage, David Butler, 2011).....	6
Figura 2.2 – Apresentação dos hidrogramas hipotéticos para áreas rurais, semi urbanas e urbanas (Urban Drainage, David Butler, 2011).....	6
Figura 3.1 – Apresentação da rede de drenagem pluvial urbana.....	17
Figura 3.2 – Imagem de Lucerna, Suíça.....	18
Figura 3.3 – Localização dos colectores 99824, 3282,2389 e 388580.....	19
Figura 3.4 – Localização dos colectores 25, 39, 493938, 3192, 47, 21, 376171 e 1941.....	19
Figura 3.5 – Localização dos colectores 130, 344979, 3498, 446976, 1350, 1263 e 16.....	20
Figura 3.6 - Apresentação dos valores de intensidade do evento pluviométrico 2.....	21
Figura 3.7 – Apresentação dos valores de intensidade do evento pluviométrico 7.....	22
Figura 3.8 - Apresentação dos valores de intensidade do evento pluviométrico 10.....	22
Figura 3.9 - Apresentação dos valores de intensidade do evento pluviométrico TR10.....	23
Figura 3.10 - Apresentação dos valores de intensidade do evento pluviométrico TR100.....	24
Figura 3.11 – Apresentação do Modelo Digital do Terreno UAV de Wartegg.....	24
Figura 3.12 – Apresentação do raster de declives UAV de Wartegg.....	25
Figura 3.13 – Apresentação das sub-bacias que fazem parte da rede de drenagem.....	25
Figura 3.14 – Apresentação de modelos <i>Semi-Distributed</i> (a) e <i>Fully-Distributed</i> (b).....	28
Figura 3.15 – Exemplo de escoamento superficial numa malha 2D.....	29
Figura 4.1 – Valores de caudal para o colector 99824 para o evento 7.....	32
Figura 4.2 – Valores de altura de escoamento para o colector 99824 para o evento 7.....	32
Figura 4.3 – Valores de caudal para o colector 47 para o evento 7.....	34
Figura 4.4 – Valores de altura de escoamento para o colector 47 para o evento 7.....	34
Figura 4.5 – Valores de caudal para o colector 2389 para o evento 7.....	35
Figura 4.6 – Valores de altura de escoamento para o colector 2389 para o evento 7.....	36
Figura 4.7 – Valores de caudal para o colector 376171 para o evento 7.....	37
Figura 4.8 – Valores de altura de escoamento para o colector 376171 para o evento 7.....	37
Figura 4.9 – Valores de caudal para o colector 21 para o evento 7.....	39
Figura 4.10 – Valores de altura de escoamento para o colector 21 para o evento 7.....	39
Figura 4.11 – Valores de caudal para o colector 1263 para o evento 7.....	40
Figura 4.12 – Valores de altura de escoamento para o colector 1263 para o evento 7.....	40
Figura 4.13 – Valores de caudal para o colector 99824 para o evento TR100.....	42
Figura 4.14 – Valores de altura de escoamento para o colector 99824 para o evento TR10.....	42

---

Figura 4.15 – Valores de caudal para o colector 47 para o evento TR100.....	43
Figura 4.16 – Valores de altura de escoamento para o colector 47 para o evento TR100.....	44
Figura 4.17 – Valores de caudal para o colector 2389 para o evento TR100.....	45
Figura 4.18 – Valores de altura de escoamento para o colector 2389 para o evento TR100...	45
Figura 4.19 – Valores de caudal para o colector 376171 para o evento TR100.....	46
Figura 4.20 – Valores de altura de escoamento para o colector 376171 para o evento TR100.....	47
Figura 4.21 – Valores de caudal para o colector 21 para o evento TR100.....	48
Figura 4.22 – Valores de altura de escoamento para o colector 21 para o evento TR100.....	48
Figura 4.23 – Valores de caudal para o colector 1263 para o evento TR100.....	49
Figura 4.24 – Valores de altura de escoamento para o colector 1263 para o evento TR100...	50
Figura A2.1 – Valores de caudal para o colector 99824 para o evento 10.....	71
Figura A2.2 – Valores de altura de escoamento para o colector 99824 para o evento 10.....	72
Figura A2.3 – Valores de caudal para o colector 47 para o evento 10.....	73
Figura A2.4 – Valores de altura de escoamento para o colector 47 para o evento 10.....	73
Figura A2.5 – Valores de caudal para o colector 2389 para o evento 10.....	74
Figura A2.6 – Valores de altura de escoamento para o colector 2389 para o evento 10.....	75
Figura A2.7 – Valores de caudal para o colector 376171 para o evento 10.....	76
Figura A2.8 – Valores de altura de escoamento para o colector 376171 para o evento 10.....	76
Figura A2.9 – Valores de caudal para o colector 21 para o evento 10.....	77
Figura A2.10 – Valores de altura de escoamento para o colector 21 para o evento 10.....	78
Figura A2.11 – Valores de caudal para o colector 1263 para o evento 10.....	79
Figura A2.12 – Valores de altura de escoamento para o colector 1263 para o evento 10.....	79
Figura A3.1 – Valores de caudal para o colector 99824 para o evento TR10.....	81
Figura A3.2 – Valores de altura de escoamento para o colector 99824 para o evento TR10...	82
Figura A3.3 – Valores de caudal para o colector 47 para o evento TR10.....	83
Figura A3.4 – Valores de altura de escoamento para o colector 47 para o evento TR10.....	83
Figura A3.5 – Valores de caudal para o colector 2389 para o evento TR10.....	84
Figura A3.6 – Valores de altura de escoamento para o colector 2389 para o evento TR10...	85
Figura A3.7 – Valores de caudal para o colector 376171 para o evento TR10.....	86
Figura A3.8 – Valores de altura de escoamento para o colector 376171 para o evento TR10.....	86
Figura A3.9 – Valores de caudal para o colector 21 para o evento TR10.....	87
Figura A3.10 – Valores de altura de escoamento para o colector 21 para o evento TR10.....	88
Figura A3.11 – Valores de caudal para o colector 1263 para o evento TR10.....	89
Figura A3.12 – Valores de altura de escoamento para o colector 1263 para o evento TR10...	89

---

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Colectores a estudar em detalhe nos capítulos seguintes.....	18
Quadro 3.2 – Valores de Evaporação mensal de Lucerna.....	26
Quadro 3.3 – Modelos feitos para a análise 1D utilizando o <i>software</i> SWMM.....	27
Quadro 3.4 – Modelos feitos para a análise 1D utilizando o <i>software</i> INFOWORKS.....	28
Quadro 3.5 – Tabela de intervalos para os indicadores SD, NSE e Nt.....	30
Quadro 4.1 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes (m <sup>3</sup> ) para o colector 99824 durante o evento 7.....	33
Quadro 4.2 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 99824 durante o evento 7.....	33
Quadro 4.3 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes (m <sup>3</sup> ) para o colector 47 durante o evento 7.....	35
Quadro 4.4 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 47 durante o evento 7.....	35
Quadro 4.5 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes (m <sup>3</sup> ) para o colector 2389 durante o evento 7.....	36
Quadro 4.6 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 2389 durante o evento 7.....	36
Quadro 4.7 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes (m <sup>3</sup> ) para o colector 376171 durante o evento 7.....	38
Quadro 4.8 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 376171 durante o evento 7.....	38
Quadro 4.9 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes (m <sup>3</sup> ) para o colector 21 durante o evento 7.....	39
Quadro 4.10 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 21 durante o evento 7.....	40
Quadro 4.11 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes (m <sup>3</sup> ) para o colector 1263 durante o evento 7.....	41
Quadro 4.12 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 1263 durante o evento 7.....	41
Quadro 4.13 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 99824 durante o evento TR100.....	43
Quadro 4.14 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 99824 durante o evento TR100.....	43

Quadro 4.15 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes (m <sup>3</sup> ) para o colector 47 durante o evento TR100.....	44
Quadro 4.16 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 47 durante o evento TR100.....	44
Quadro 4.17 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 2389 durante o evento TR100.....	46
Quadro 4.18 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 2389 durante o evento TR100.....	46
Quadro 4.19 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 376171 durante o evento TR100.....	47
Quadro 4.20 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 376171 durante o evento TR100.....	47
Quadro 4.21 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 21 durante o evento TR100.....	49
Quadro 4.22 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 21 durante o evento TR100.....	49
Quadro 4.23 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 1263 durante o evento TR100. ....	50
Quadro 4.24 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 1263 durante o evento TR100.....	50
Quadro 4.25 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, para o evento 7.....	51
Quadro 4.26 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, para o evento 10.....	52
Quadro 4.27 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, para o evento TR10.....	52
Quadro 4.28 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, para o evento TR100....	52
Quadro 4.29 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, descritos no Anexo 4, para o evento 7.....	53
Quadro 4.30 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, descritos no Anexo 4, para o evento 10.....	53
Quadro 4.31 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, descritos no Anexo 4, para o evento TR10.....	54
Quadro 4.32 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, descritos no Anexo 4, para o evento TR100.....	54
Quadro A2.1 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 99824 durante o evento 10.....	72
Quadro A2.2 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 99824 durante o evento 10.....	72
Quadro A2.3 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 47 durante o evento 10.....	74

Quadro A2.4 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 47 durante o evento 10.....	74
Quadro A2.5 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 2389 durante o evento 10.....	75
Quadro A2.6 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 2389 durante o evento 10.....	75
Quadro A2.7 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 376171 durante o evento 10.....	75
Quadro A2.8 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 376171 durante o evento 10.....	77
Quadro A2.9 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 21 durante o evento 10.....	78
Quadro A2.10 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 21 durante o evento 10.....	78
Quadro A2.11 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 1263 durante o evento 10.....	80
Quadro A2.12 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 1263 durante o evento 10.....	80
Quadro A3.1 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 99824 durante o evento TR10.....	82
Quadro A3.2 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 99824 durante o evento TR10.....	82
Quadro A3.3 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 47 durante o evento TR10.....	83
Quadro A3.4 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 47 durante o evento TR10.....	84
Quadro A3.5 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 2389 durante o evento TR10.....	85
Quadro A3.6 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 2389 durante o evento TR10.....	85
Quadro A3.7 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 376171 durante o evento TR10.....	86
Quadro A3.8 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 376171 durante o evento TR10.....	87
Quadro A3.9 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 21 durante o evento TR10.....	88
Quadro A3.10 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 21 durante o evento TR10.....	88

---

Quadro A3.11 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m <sup>3</sup> ) para o colector 1263 durante o evento TR10.....	89
Quadro A3.12 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 1263 durante o evento TR10.....	90
Quadro A4.1- Valores dos parâmetros para o colector 21 durante o evento 7.....	91
Quadro A4.2- Valores dos parâmetros para o colector 47 durante o evento 7.....	91
Quadro A4.3- Valores dos parâmetros para o colector 1263 durante o evento 7.....	92
Quadro A4.4- Valores dos parâmetros para o colector 2389 durante o evento 7. ....	92
Quadro A4.5- Valores dos parâmetros para o colector 99824 durante o evento 7. ....	92
Quadro A4.6- Valores dos parâmetros para o colector 376171 durante o evento 7. ....	92
Quadro A4.7- Valores dos parâmetros para o colector 21 durante o evento 10. ....	93
Quadro A4.8- Valores dos parâmetros para o colector 47 durante o evento 10. ....	93
Quadro A4.9- Valores dos parâmetros para o colector 1263 durante o evento 10. ....	93
Quadro A4.10- Valores dos parâmetros para o colector 2389 durante o evento 10. ....	94
Quadro A4.11- Valores dos parâmetros para o colector 99824 durante o evento 10. ....	94
Quadro A4.12- Valores dos parâmetros para o colector 376171 durante o evento 10. ....	94
Quadro A4.13- Valores dos parâmetros para o colector 21 durante o evento TR10. ....	95
Quadro A4.14- Valores dos parâmetros para o colector 47 durante o evento TR10. ....	95
Quadro A4.15- Valores dos parâmetros para o colector 1263 durante o evento TR10. ....	95
Quadro A4.16- Valores dos parâmetros para o colector 2389 durante o evento TR10.....	96
Quadro A4.17- Valores dos parâmetros para o colector 99824 durante o evento TR10. ....	96
Quadro A4.18- Valores dos parâmetros para o colector 376171 durante o evento TR10.....	96
Quadro A4.19- Valores dos parâmetros para o colector 21 durante o evento TR100.....	97
Quadro A4.20- Valores dos parâmetros para o colector 47 durante o evento TR100.....	97
Quadro A4.21- Valores dos parâmetros para o colector 1263 durante o evento TR100.....	97
Quadro A4.22- Valores dos parâmetros para o colector 2389 durante o evento TR100.....	98
Quadro A4.23- Valores dos parâmetros para o colector 99824 durante o evento TR100.....	98
Quadro A4.24- Valores dos parâmetros para o colector 376171 durante o evento TR100.....	98

## **ABREVIATURAS**

DTM – *Digital Terrain Model*

MDT – *Modelo Digital do Terreno*

RE – *Relative peak error*

RMSE – *Root mean square error*

SD – *Standard deviation*

NSE – *Nash-Sutcliffe efficiency*

## 1 INTRODUÇÃO

Vivemos num século em que desde cedo somos alertados para a importância que a água tem para a vida humana, assim como para todos os ecossistemas que a rodeiam. Tendo em conta que a água é um bem indispensável para toda a vida presente no planeta Terra, o seu valor tem aumentado com o passar dos anos e, face à consciencialização para o grave problema da sua escassez, novas técnicas de aproveitamento e reutilização surgem com regularidade, de modo a garantir a todos os homens o acesso a água potável. Paradoxalmente, a água, também pode ter efeitos profundamente negativos para o homem, ao nível socioeconómico, de saúde pública, etc. Devido aos extremos hidrológicos induzidos pelas alterações climáticas, (Hydrabayashi et al. 2013; Hall et al. 2014; Rojas et al. 2013), o encaminhamento de água pluvial para fora da zona urbana ou a construção de soluções que permitam evitar inundações, assumem, apesar da sua dificuldade, uma importância crescente. Neste âmbito, conclui-se que é fundamental uma correcta modelação e previsão da drenagem no meio urbano.

Os sistemas de drenagem são essenciais nos meios urbanos, uma vez que são um dos elos de ligação entre a actividade humana e o ciclo natural da água. Com o aumento da impermeabilização do solo nas cidades, fruto de um crescimento contínuo das mesmas, os sistemas de drenagem de águas pluviais têm vindo a representar um papel cada vez mais importante. Por outro lado, do ponto de vista da engenharia, com a melhoria de capacidade computacional registada nos últimos anos, os programas que acoplam modelos hidráulicos e hidrológicos tornaram-se ferramentas indispensáveis para a análise, compreensão e previsão do comportamento destes sistemas.

Um dos dados de entrada nestes programas são os Modelos Digitais do Terreno (MDT), que são utilizados para representar espacialmente a distribuição de variáveis contínuas e qualitativas, para os quais foi necessário procurar novos métodos de captação de imagens, com maior detalhe e menos dispendiosos. Com os *drones*, surgiu um novo método de captação de imagens que, posteriormente, utilizando fotogrametria, permite gerar Modelos Digitais do Terreno. As imagens captadas pelos drones apresentam grande precisão e resolução, uma vez que eles efectuam voos a altitudes menores que outros métodos de captação de imagens considerados convencionais como Satélite e LiDAR, permitindo gerar MDT's também com uma grande precisão. No entanto, é necessário avaliar as diferenças entre esses métodos convencionais de captação de imagens e este novo método, para uma

análise de possíveis melhorias ou diferenças significativas utilizando estes Modelos Digitais do Terreno.

## 1.1 Motivação

O futuro da Humanidade depende cada vez mais das novas tecnologias e do seu uso eficiente e responsável. Sem uma forte consciência ética e a interação permanente com as técnicas mais inovadoras, de que são exemplo os *drones*, a Engenharia compromete o seu próprio desenvolvimento e enfraquece a sua missão transformadora da vida das populações.

O presente estudo, cujo foco incide na modelação da drenagem urbana, revela no seu exercício de demonstração e qualificação dos dados em análise, a extraordinária importância destes e o seu assinalável impacto no quotidiano das comunidades.

O uso e domínio de duas ferramentas essenciais para a análise de drenagem urbana – INFOWORKS e SWMM – que o trabalho académico evidencia, constituem um inegável trunfo no competitivo mercado de trabalho.

## 1.2 Objectivos

Este trabalho visa a análise de possíveis melhorias em modelação de drenagem pluvial urbana na bacia de Wartegg, em Lucerna, através de imagens captadas por *drones*, por comparação com a utilização de dados obtidos por outros métodos, nomeadamente LiDAR e medições topográficas locais.

No início desta dissertação são apresentados os fundamentos teóricos que servirão de apoio para o trabalho realizado, apresentado e discutido nos capítulos posteriores. O trabalho consta de um primeiro tratamento de dados, para a construção de modelos, utilizando as inclinações de cada Modelo Digital do Terreno, passando a várias análises detalhadas para diversos eventos pluviométricos e com diferentes resoluções temporais. O propósito desta dissertação é averiguar se para o sistema de drenagem de Wartegg, que fica em Lucerna na Suíça, os MDT's de imagens captadas por *drones*, apresentam diferenças de precisão significativas, utilizando as análises 1D do programa SWMM e 1D e 2D/1D do programa INFOWORKS.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada em cinco capítulos, sendo que o primeiro, que é o presente capítulo, apresenta o tema, os objectivos, a estrutura do documento e a motivação. No

segundo capítulo é efectuada uma revisão bibliográfica dos aspectos mais relevantes da drenagem urbana, focada no trabalho prático. O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada em todo o trabalho prático. No quarto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados. Finalmente, no último capítulo, é apresentada uma súpula das principais conclusões decorrentes da análise de resultados, assim como sugeridos alguns trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

### 2.1 Drenagem Urbana

Os sistemas de drenagem de água são essenciais em meios urbanos, uma vez que são um dos elos de ligação entre a actividade humana e o ciclo natural da água, constituindo ainda uma peça fundamental para as condições de higiene e saúde pública.

Tudo tem início numa separação da água do seu ciclo natural que, após o seu tratamento, é fornecida à população para as suas diversas actividades diárias. No entanto, grande parte da água fornecida é devolvida, através de sistemas de drenagem. A água que circulará nos colectores dessa rede de drenagem, proveniente do consumo doméstico, é denominada água residual doméstica e é caracterizada por poluentes de carácter maioritariamente orgânico e facilmente biodegradáveis. Os sistemas de drenagem de águas residuais domésticas encaminham-nas para Estações de Tratamento de Águas Residuais, ETAR, que após o seu tratamento segundo directivas nacionais, as devolvem ao seu ciclo natural.

Devido aos fenómenos naturais de precipitação, é igualmente necessário considerar a água pluvial, que cai e escoar nas áreas das bacias urbanas, sendo posteriormente captada por um dispositivo de entrada, passando por colectores até (i) uma saída directa para um efluente, ou (ii) uma ETAR ou outra solução, caso seja necessário, devido não só à contaminação da mesma por poluentes existentes na superfície da bacia hidrográfica mas também por outros poluentes presentes na água evaporada.

Finalmente, é importante referir as águas residuais provenientes da actividade industrial, que se caracterizam por uma composição que abrange uma grande diversidade de compostos físicos e químicos, dependendo do tipo de processamento industrial, e que podem sofrer variações com o decurso do tempo. Caso cumpram as imposições previstas por lei, estas águas poderão ser lançadas na rede pública.

Porém, há vários tipos de sistemas de drenagem, com diferentes características. Segundo o artigo 116º do Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais, de agora em diante abreviadamente designado por RGSPPDADAR, os sistemas podem ser:

1. Separativos, os quais são constituídos por duas redes de colectoras distintas, uma destinada às águas residuais domésticas e industriais e outra à drenagem das águas pluviais ou similares.
2. Unitários, os quais são constituídos por uma única rede de colectores, onde são admitidas conjuntamente as águas residuais domésticas, industriais e pluviais;
3. Mistos, que combinam os dois tipos anteriores, funcionando parte da rede de colectores como sistema unitário e a restante como sistema separativo
4. Separativos parciais ou pseudo-separativos, para os quais se admite, em condições excepcionais, a ligação de águas pluviais de pátios interiores ao colector de águas residuais domésticas.

### **2.1.1 Drenagem Pluvial Urbana**

Em qualquer bacia, parte da precipitação, que cai sobre a mesma será devolvida ao meio gasoso por evapotranspiração (que consiste na evaporação da água presente no solo e na transpiração da precipitação interceptada pelas plantas), acumular-se-á em diversas depressões do terreno e infiltrar-se-á nos solos até que estes atinjam a saturação, sendo que a restante precipitação participará no escoamento superficial. Uma vez que todas as parcelas estão ligadas, será de esperar que quando atingida a saturação do solo e a capacidade de armazenamento nas depressões, o escoamento superficial aumente. A água escoará pela superfície, adoptando caminhos preferenciais, sendo que estes geralmente são os com maior declive, até que encontrará um curso de água ou uma grande depressão. A água infiltrada nos solos será importante para todos os ecossistemas presentes no subsolo, assim como para o equilíbrio hidráulico de aquíferos e lençóis de água.

Contudo, com o aumento da impermeabilização do solo, fruto da urbanização, parte do volume que inicialmente se infiltrava no solo, ou que era evapotranspirado, transforma-se em escoamento superficial,

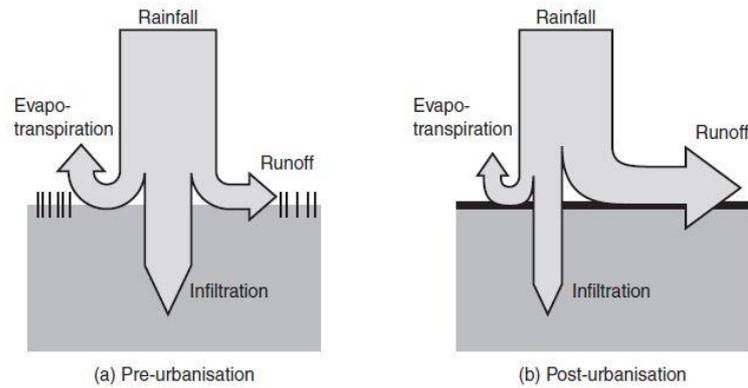


Figura 2.1 – Apresentação os efeitos da urbanização no escoamento superficial (Butler & Davies, 2011).

Por conseguinte, o escoamento superficial, para as situações de terreno rural, terreno semi urbano e urbano, pode ser representado com base em três hidrogramas hipotéticos.

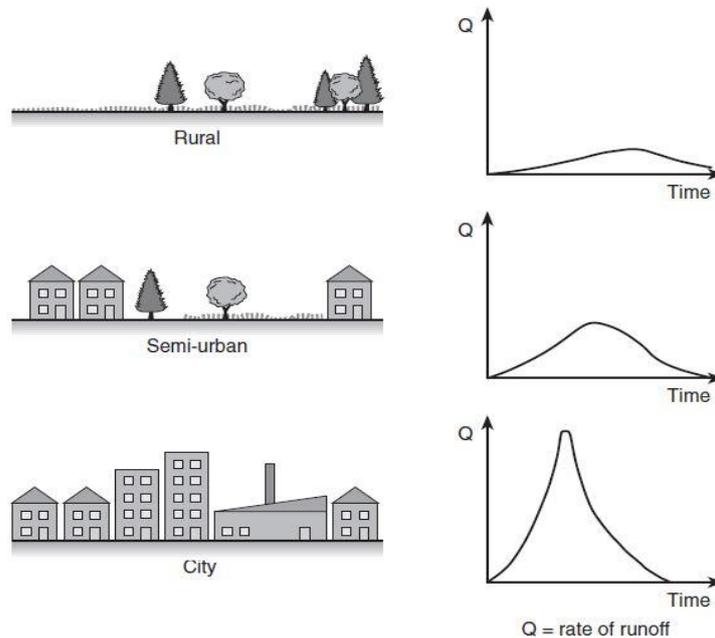


Figura 2.2 – Apresentação dos hidrogramas hipotéticos para áreas rurais, semi urbanas e urbanas (Butler & Davies, 2011).

Pela análise destes três hidrogramas hipotéticos, conclui-se que o aumento da impermeabilização do solo, através da urbanização, não só aumenta o escoamento superficial, como poderá também reduzir significativamente o tempo para que toda a bacia esteja a contribuir para o escoamento superficial no ponto mais a jusante, designado por tempo de concentração. De modo a reduzir o impacto da precipitação na área urbana foram criados sistemas de drenagem de águas pluviais captando o escoamento superficial através de dispositivos de entrada, encaminhando-a, por uma rede de colectores enterrados, para fora da zona urbana. No entanto, é recomendável aplicar medidas correctivas na construção do tecido urbano (telhados verdes, pavimentos com permeabilidade, bacias de retenção, entre outros...), para que o hidrograma após a urbanização com as medidas correctivas se aproxime o mais possível do hidrograma natural, minimizando assim os impactes da urbanização. Por ser no tecido urbano que existe maior densidade populacional, assim como onde a maior parte das actividades económicas ocorrem, o escoamento superficial elevado, na forma de inundação, poderá afectar significativamente a vida quotidiana dos cidadãos.

Porém, todos os dispositivos constituintes de uma rede de drenagem têm uma capacidade de vazão limitada, pelo que a capacidade de vazão pode ser excedida aquando uma chuvada (Maksimovic et al., 2009). O escoamento superficial ganha ainda mais importância ao considerar a insuficiente capacidade hidráulica dos vários dispositivos constituintes do sistema de drenagem, o que fará com que haja, por vezes, escoamento no sentido inverso ao desejado, fazendo com que água que a montante se tivesse encontrado dentro de colectores regresse novamente à superfície, percorrendo-a novamente até voltar, ou não, a entrar nos colectores, contribuindo para o agravamento dos fenómenos de inundação urbana.

Inicialmente, os sistemas de drenagem de águas pluviais eram dimensionados apenas para encaminhar os caudais de ponta de cheia, provocados por precipitações de curta duração e intensidade elevada, para o curso de água mais próximo, não considerando eventuais consequências a jusante. Por vezes, devido à falta de análise desse balanço hídrico, um sistema que evite uma inundação num aglomerado poderá contribuir para um fenómeno de cheia a jusante. Por volta de 1980 este padrão foi alterado, introduzindo várias abordagens importantes (Chocat et al., 2001).

1 – Introdução do conceito de sustentabilidade na hidráulica urbana, e consequentemente de sistemas de drenagem urbana sustentáveis.

2 – Introdução de abordagens ecossistémicas na gestão de recursos hídricos.

3 – Análise detalhada dos impactos causados por descarga de águas residuais nos corpos hídricos.

4 – Necessidade de ter uma visão holística referente aos sistemas de saneamento básico.

Contudo, as alterações de abordagem no dimensionamento na década de 1980 não foram as únicas alterações significativas, tendo aparecido a possibilidade de modelação de sistemas de drenagem por computador. Embora tenham surgido inicialmente na década de 1970, apenas nos anos 1980 a capacidade computacional ficou disponível para uma utilização adequada. Estas ferramentas vieram alterar profundamente as práticas de engenharia. Os modelos computacionais para drenagem urbana tiveram grandes vantagens associadas, tais como levantamentos topográficos das cidades e das redes de drenagem (numero de condutas, local dos dispositivos de entrada, diâmetros das mesmas... etc), e motivaram uma maior compreensão do funcionamento do sistema de drenagem. Entrava então em vigor uma filosofia onde a análise de problemas através de alta tecnologia poderia reduzir em grande parte custos de construção e prever os danos causados por precipitação em sistemas existentes.

Concluindo, os modelos computacionais de drenagem urbana são determinantes na previsão de fenómenos de inundações assim como numa possível análise atempada dos seus potenciais danos e/ou na construção de soluções de forma a minorar esses danos. São, portanto, uma ferramenta indispensável para os engenheiros ou qualquer outra profissão que necessite de tomar medidas quanto às inundações em meio urbano.

## **2.2 Modelação em Hidráulica Urbana**

A modelação pretende simular um fenómeno real através de um conjunto de equações matemáticas, podendo ser de grande complexidade. Em modelação existem dois grandes grupos, os modelos físicos e os modelos matemáticos. Por norma, os modelos de sistemas de drenagem urbana são constituídos por modelos hidrológicos, geralmente empíricos, de modo a prever a quantidade de precipitação que se transforma em precipitação útil, isto é, a quantidade de precipitação que se transforma em escoamento superficial, e modelos hidráulicos, que utilizam como dado de entrada os resultados obtidos nos modelos hidrológicos, modelando o escoamento superficial e na rede de colectores.

Os modelos hidrológicos têm o propósito de representar o comportamento de bacias hidrológicas, no entanto, existem vários tipos de modelos, em que a grande divisão é feita entre modelos matemáticos e físicos.

Os modelos como SWMM, InfoWorks, MIKE URBAN, entre outros, são modelos determinísticos de precipitação-escoamento (acoplando um modelo hidrológico a um modelo hidráulico), uma vez que para os mesmos dados de entrada teremos sempre os mesmos resultados, baseados em relações matemáticas aceites entre parâmetros físicos, com o propósito de responder com fiabilidade à criação de cenários reais ou hipotéticos com diferentes condições. Investigação recente em modelação de inundações em meio urbano, (eg. Leitão, 2009; Maksimović et al. 2009) permitem simulações fidedignas de todo o sistema de drenagem, incluindo sistemas de drenagem superficial e de drenagem artificiais. Cunha (2006) identifica as fases constituintes de um modelo,

- 1-Identificação (Seleção do modelo que melhor se adequa à realidade);
- 2-Especificação (Formalização do modelo);
- 3-Calibração (Obtenção dos valores dos parâmetros que intervêm nas equações);
- 4-Validação (Análise e comparação entre resultados obtidos através do modelo e resultados reais do sistema);

A extrapolação tem particular aplicabilidade nos modelos precipitação-escoamento, como fase complementar às acima descritas (Stravoula, 2008). Esta nova fase visa a análise da bacia hidrográfica em estudo, ou uma com características semelhantes, a valores de intensidade de precipitação distintos dos utilizados nas fases de calibração e validação.

Uma vez que os modelos físicos utilizam simplificações matemáticas e ignoram aleatoriedades associadas a potenciais erros de medição e previsão (a intensidade das chuvadas varia de ponto para ponto, assim como o tempo de início e fim não é igual para todos os pontos), sempre presentes nos dados de entrada, nem sempre os modelos poderão produzir os resultados correctos, pelo que estes deverão sempre que ser confrontados por um especialista.

Os dados de entrada para modelos de simulação de drenagem urbana são normalmente os dados de precipitação (intensidade e duração), assim como os registos esperados para águas residuais domésticas e/ou águas residuais industriais, no caso de o sistema ser unitário, pseudo-separativo ou misto.

### 2.2.1 Equações de Saint-Venant

A circulação de água nos colectores é modelada utilizando as equações de Saint-Venant, sendo que estas apresentam uma aproximação adequada das equações da conservação de massa e de conservação da quantidade de movimento. De facto, o escoamento superficial nestas bacias é, por norma, não uniforme e variável, pelo que se pode admitir que a água escoar ao longo de grandes canais formados no terreno (Yen, 1986). Estas equações são aplicáveis a escoamentos superficiais unidimensionais, 1D, realizado ao longo de canais e bidimensionais, 2D, analisado em toda a malha, em todas as direcções.

Para o escoamento nos colectores, é razoável admitir que apenas circula no eixo dos mesmos, e que a altura da lâmina líquida, assim como a sua velocidade se mantêm constantes ao longo dos colectores. Ainda assim, equações são formuladas com base nas seguintes hipóteses (Antunes do Carmo, 2004)

- 1 – O fluido é considerado homogéneo e incompressível
- 2 – O escoamento é unidimensional
- 3 – A pressão é considerada hidrostática
- 4 – Os efeitos da turbulência e atrito no fundo são consideradas, embora simulados por leis de resistência validas para regime permanente uniforme
- 5 – A declividade média do leito do canal é pequena

Estas equações do tipo hiperbólico podem ser deduzidas a partir das equações de Navier Stokes ou usando a técnica do volume de controlo e o teorema de transporte de Reynolds, apresentando as seguintes expressões

Apresentando a equação da conservação de massa

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \quad (1)$$

Apresentando a equação de conservação da quantidade de movimento

$$\gamma A \left( \frac{\partial h}{\partial x} - i \right) + \gamma AJ + \rho \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q \beta V}{\partial x} \right) = 0 \quad (2)$$

Na qual, o primeiro termo corresponde às forças actuantes sobre o volume de controlo, o segundo termo às forças tangenciais e o terceiro à aceleração local e convectiva do escoamento, e em que,

Q – caudal ( $m^3/s$ )  
A – secção de escoamento ( $m^2$ )  
x – distancia longitudinal (m)  
t – tempo (s)  
 $q_L$  – caudal de entrada por unidade de comprimento ( $m^2/s$ )  
 $\gamma$  – peso volúmico da água  
h – altura do escoamento  
i – inclinação do colector  
J – perda de carga unitária (m/m)  
 $\rho$  – massa volúmica da água  
 $\beta$  – coeficiente de quantidade de movimento  
V – velocidade uniforme fictícia em cada secção transversal

As equações de Saint-Venant só têm solução analítica em problemas muito específicos pelo que, no caso geral, têm que ser resolvidas numericamente, sendo os mais comuns, método de elementos finitos e método das diferenças finitas.

A utilização integral da equação da conservação da quantidade de movimento e da conservação da massa, denomina-se por onda dinâmica, sendo que, este modelo inclui todos os efeitos principais da hidrodinâmica (efeitos de propagação das ondas dinâmicas para montante e jusante, efeitos de amortecimento, atraso e deformação nas variações de caudal e altura nos colectores. Outro modelo geralmente utilizado, é o modelo da onda difusa, onde os termos da aceleração convectiva e local são desprezados, sendo capaz de simular efeitos de propagação das ondas dinâmicas para jusante, efeitos de armazenamento e simulação de fenómenos de atraso na atenuação e na propagação. Finalmente, o modelo da onda cinemática considera as acelerações nulas (convectiva e local) e a diferença de pressões entre duas secções extremas do volume de controlo. Segundo Lança e Rodrigues (2000) este modelo apenas apresenta resultados quando a altura de lâmina líquida é baixa e não são verificadas variações bruscas de caudal.

### 2.2.2 Drenagem Dual

A drenagem dual é o acoplamento dos modelos hidrológicos que representam o comportamento da bacia hidrográfica com sistemas hidráulicos que representam a rede de colectores. O escoamento superficial pode ser representado em escoamento 1D ou escoamento 2D enquanto que é razoável admitir a altura de água constante assim como a sua velocidade no escoamento constante nos colectores, fazendo com que apenas seja utilizada a

abordagem 1D. No escoamento superficial 1D, a superfície da bacia urbana é considerada como um conjunto de canais abertos. Já o escoamento superficial 2D é feito através de pequenas células que contém informação como área, rugosidade, altitude entre outras, criando, através dessas características uma sequência lógica para o sentido e direção do escoamento célula a célula, representando o escoamento superficial numa forma mais realista. Estes modelos utilizam as equações de Saint Venant quer para a abordagem 1D/2D ou 1D/1D, sendo que estes representam os modelos de drenagem dual 1D dos coletores e 1D ou 2D do escoamento superficial.

É ainda de referir que os modelos 1D/2D, requerem maior tempo de cálculo, assim como capacidade computacional, sendo que a sua calibração grande parte das vezes não é realizada devido ao elevado tempo de cálculo (Leitão et al., 2008).

## **2.3 Modelos Digitais do Terreno**

### **2.3.1 Formas de obtenção de Modelos Digitais do Terreno**

Outro dado de entrada dos modelos hidrológicos e hidráulicos são os modelos digitais do terreno, que pretendem uma representação real e fidedigna da superfície da bacia. A sua resolução e precisão são essenciais para uma previsão fidedigna e detalhada não só do escoamento superficial, como também para toda a rede de colectores.

Modelos de Elevação do Terreno (MET) como Modelos Digitais do Terreno (MDT) são a primeira fonte de dados usada para a maioria das análises de terreno, como escoamento superficial ou outros fenómenos que tenham influência no terreno (Sanders 1999; Wilson and Gallant 2000; Baghdadi et al, 2005).

Os MDT's inserem-se nos modelos digitais de elevação sendo que os MDT's apenas representam a superfície de terrenos com as suas altitudes e propriedades. Os modelos digitais de elevação, embora geralmente estejam associados a superfície terrestre, referem-se à elevação de qualquer tipo de superfície, como superfícies de lagos ou elevação de água em aquíferos. Há várias estruturas de modelos digitais de elevação, sendo que os mais comuns são: modelo de linha, que descreve as elevações do terreno pelos seus contornos (isolinhas de elevação); rede triangular irregular (TIN), descrevendo a superfície através de um conjunto de elementos triangulares irregulares; rede em grelha, sendo que este é o mais comum, e que consiste num plano com células, cada uma com a sua elevação.

Os dados de MDTs podem ser obtidos através de medições feitas no local (através de pontos geo-referenciados), fotogrametria, imagens de satélite, varrimento por laser, ou passagem de formatos de papel para digital (analógico). Leitão et al. (2015) refere as técnicas consideradas tradicionais para a obtenção de dados para gerar MDT's (Satélite, LiDAR...) limitadoras em modelos de escoamento superficial detalhados e fiáveis face ao facto de os mesmos apresentarem uma precisão baixa relativamente à complexidade dos modelos de simulação de hidráulica urbana.

Ao longo dos últimos anos, os satélites têm sido utilizados para quantificar fenómenos físicos relativos a movimentos da crosta terrestre. A construção de MDTs de imagens captadas por satélite consiste na imagem de dois satélites em órbita situados a 680km de altitude em localizações diferentes da mesma superfície. No entanto, embora satélites de elevada resolução espacial possam obter imagens com grande resolução, são bastante vulneráveis à cobertura de nuvens. Segundo Tokarczyk et al. (2015), esta tecnologia é bastante dispendiosa, e os períodos de actualização que deveriam ser anuais, não são cumpridos.

O método LiDAR (Light Detection and Ranging), vulgo varrimento por laser, funciona através de um laser, que emite feixes de luz para a superfície, sendo que a elevação é medida através do tempo que o feixe de luz demora a voltar ao receptor, geralmente colocado no avião, e a sua posição é determinada através de um sistema de GPS incorporado no mesmo. Este sistema apresenta células entre 0.5 e 5m e uma precisão horizontal de 0.3m e vertical de 0.15m. Contudo, uma maior precisão do MDT poderá apresentar um tamanho maior do ficheiro até alguns gigabytes, o que não será limitador nos dias de hoje.

Os *Unmanned Aerial Veichles* (UAV's), conhecidos por *drones*, podem efectuar voos de forma autónoma ou ser controlados remotamente. Devido ao baixo custo quando comparados com outros aparelhos para obtenção de imagens para criar MDT's, assim como a flexibilidade incorporada, são uma alternativa que apresenta algumas vantagens (Tokarczyk et al., 2015).

Leitão et al. (2015), refere os *drones* como bons para estudo e captação de imagens de zonas de pequena dimensão, enquanto Tokarczyk et al., (2015) afirma que, para os drones de pequena dimensão, a autonomia e velocidade dos voos são baixas, limitando a área fotografável durante o percurso.

Uma das grandes vantagens apresentadas por este método é a resolução das imagens, geralmente inferior a 1 metro, podendo ir até aos 5cm. Tokarczyk et al. (2015), refere que ainda terá que haver vários testes para garantir melhorias dos MDT's captados por este método em modelação de hidráulica urbana. Leitão et al. (2015), concluíram que o factor mais importante para uma melhor resolução de MDT's é a altitude de voo.

Segundo, Leitão (2009), a representação realista da superfície de terreno é fundamental na modelação da superfície do terreno, incluindo o comportamento do escoamento superficial. A representação do terreno é cada vez mais utilizada como dado de entrada para modelos de escoamento superficial 1D, 2D ou de drenagem dual. A análise de escoamento superficial avançada requer Modelos Digitais do Terreno de boa qualidade (Leitão et al, 2009).

A resolução e precisão das fontes de dados são de máxima importância em processos de modelação baseados no terreno. O estudo do escoamento superficial não pode ser realizado quando partes da bacia são excluídas devido a falta de MDTs de alta resolução (Leitão, 2009) Ainda assim, não é recomendado a utilização de um conjunto de dados de MDT de baixa resolução para toda a bacia quando partes são cobertas por MDTs de alta resolução (Leitão et al., 2016)

### **2.3.2 Métodos de Fusão de Modelos Digitais do Terreno com diferentes resoluções**

Nem sempre os Modelos Digitais do Terreno disponíveis cobrem toda a área de interesse ou a resolução é a pretendida. Devido a esses factos, é necessário a junção de vários MDT's. Durante o processo de fusão de MDT's é possível criar MDT's que cubram maiores áreas ou tornar mais precisos MDT's existentes (Ruiz et al 2011).

Os problemas surgem quando os MDT's são combinados, por exemplo, com diferentes métodos de aquisição, uma vez que os MDT's podem conter diferentes características como resolução espacial ou domínio nos eixos coordenados. Estas diferenças poderão criar inconsistências de elevação que poderão posteriormente criar outras inconsistências no MDT, como inclinações do terreno, e conseqüentemente afectar caminhos de água no escoamento superficial.

De modo a limitar essas inconsistências, devem ser definidos limites para a diferença de alturas entre MDT's. Porém, embora as diferenças de elevação entre MDT's estejam dentro De modo a limitar essas inconsistências, devem ser definidos limites para a diferença de alturas entre MDT's. Porém, embora as diferenças de elevação entre MDT's estejam dentro dos limites para os valores de elevação, poderão produzir valores inconsistentes de inclinação nos limites dos MDT's (Katzil e Doytsher, 2003).

Modelos de fusão simples de MDT's poderão aumentar essas inconsistências (Luedeling et al 2007), e poderão produzir resultados incorrectos, como por exemplo escoamento superficial

irreal. Por esse facto é necessário que novos métodos sejam capazes de gerar MDT's completos e com precisão. Esses métodos deverão ser capazes de extrair apenas os dados correctos dos diferentes conjuntos de dados de elevação (Ravanbakhsh and Fraser 2013). Esses métodos deverão conter factores chave dos MDT's mais precisos como localização exacta, entre outros.

Com várias fontes de dados, o objectivo da fusão entre dois ou mais MDT's é que cada área seja representada com maior precisão possível (Bourgine et al 2004). Software de Informação Geográfica (SIG) fornece funções de fusão para dois ou mais conjuntos de dados desde que apresentem o mesmo género e tamanho de célula e que tenham o mesmo sistema de coordenadas.

Os métodos convencionais de fusão de MDT's são,

- 1- Métodos de cobertura – *cover type methods*.
- 2- Métodos que ponderam a média – *average type methods*.
- 3- Métodos que utilizam funções matemáticas – *blend function methods*.

Os métodos *cover* não ajustam a elevação entre MDT's, e apenas sobrepõe o MDT desejado (geralmente o de maior resolução) ao outro ou outros. Isto poderá fazer com que haja grandes discontinuidades “penhascos” entre as fronteiras dos MDT's criando erros de inclinação entre outros valores (Hickey 2000).

Os métodos que fazem a média entre MDT's criam uma transição suave entre os locais de sobreposição dos MDT's, fazendo com que os valores do MDT de maior resolução sejam alterados e, conseqüentemente, fazendo com que aquela área perca precisão de valor. Os métodos *blend* usam uma função média com pesos na área sobreposta dos MDT's sendo que as curvas podem ser lineares, cúbicas, bi-cúbicas ou descontínuas.

Assim como os métodos *average*, os *blend*, trocam a elevação dos pontos de transição entre MDT's, fazendo com que seja perdida a precisão dos MDT's de maior qualidade. Damon (2002) apresentou uma abordagem de fusão entre LiDAR e IFESAR, baseada na confiança dos metadados, concluindo que estes têm uma grande relevância na fusão de MDT's quando se analisa a sua precisão de fusão. Esta abordagem pode ser classificada como um tipo do método *cover*.

Warriner e Mandlbürger (2005) apresentaram um método semelhante ao *blend*, limitando as diferenças de alturas de maneira a conseguir uma transição mais suave entre os MDT's. Por

outro lado, o MDT terá que ser ajustado manualmente, e os autores não sugeriram nenhuma abordagem de modo a definir automaticamente as tolerâncias das bandas. Recentemente foi apresentado por Leitão et al., (2016) um novo método de fusão de MDT's o *Mblend*, alterando as elevações do MDT de menor resolução, mantendo as elevações do de maior resolução, e criando uma transição suave

.

### 3 CASO DE ESTUDO

Com o passar dos anos foram surgindo vários métodos de captação de imagens para a geração Modelos Digitais do Terreno, com nível de resolução crescente. No entanto, os MDT's são apenas um dos dados de entrada nos modelos de drenagem urbana, sendo que a qualidade dos resultados que podem ser determinados com estes últimos depende da sua complexidade.

O presente caso de estudo refere-se a Lucerna, ver figura 3.1, uma cidade situada no centro da Suíça, numa zona de vale banhada pela parte norte do Lago Lucerna. Uma das bacias desta cidade, a bacia de Wartegg, apresenta 308 sub-bacias, 423 colectores circulares ou rectangulares fechados, 384 nós de ligação, 6 nós de saída e 3 bacias de retenção, conforme representado na figura 3.2.



Figura 3.1 – Imagem da cidade Suíça de Lucerna.

Para efetuar o estudo foram utilizados dados relativos às sub-bacias e a todo o sistema de drenagem, assim como os Modelos Digitais do Terreno relativos às imagens captadas por LiDAR e por UAV, como também os registos pluviométricos contínuos de cerca de 47 dias com resolução de dez minutos. Para uma análise mais detalhada foram seleccionados seis colectores, cujas características se apresentam no quadro 3.1. Os critérios para a escolha destes colectores foram (i) a sua localização em pontos distintos da rede e (ii) apresentarem valores diferentes de caudal, comprimento, diâmetro e área de influência.

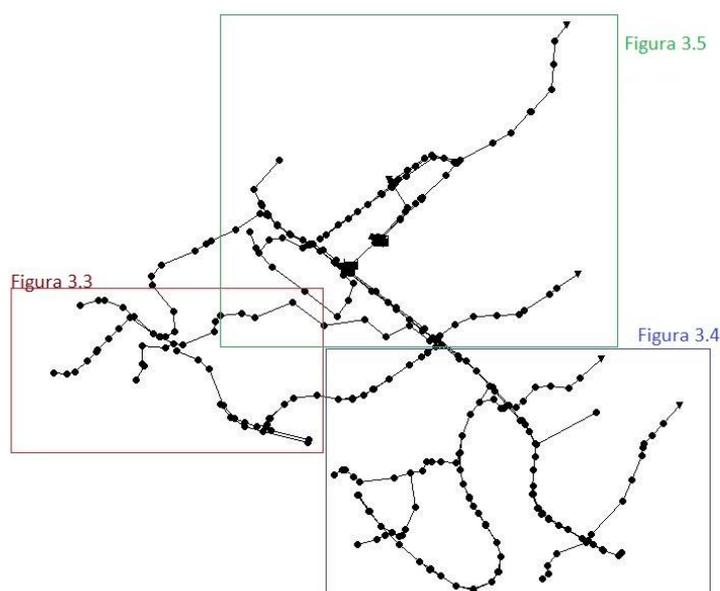


Figura 3.2 – Apresentação da rede de drenagem pluvial urbana

Colector	inlet	outlet	L (m)	D (m)	Ks	A (ha)
<b>21</b>	100757	166457	58.31	0.8	0.013	16.29
<b>47</b>	129702	101912	16.12	0.6	0.013	1.06
<b>1263</b>	130040	144791	40.28	1.75	0.013	7.59
<b>2389</b>	101603	101604	42.07	0.45	0.013	8.15
<b>99824</b>	101034	101033	27.48	0.3	0.013	1.04
<b>376171</b>	101915	141234	92.9	0.7	0.013	8.02

Quadro 3.1 – Colectores seleccionados para o estudo.

Subdividiu-se o mapa da figura 3.1 nos três mapas mais detalhados apresentados nas figuras 3.3, 3.4 e 3.5, de modo a identificar a localização dos colectores.

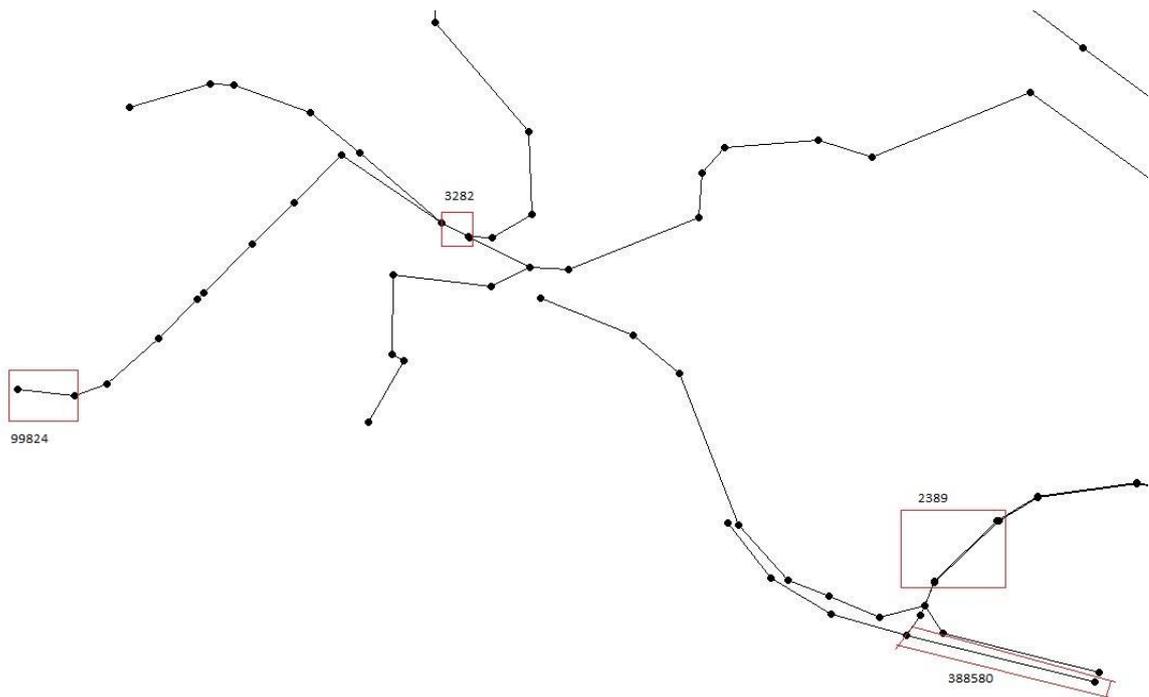


Figura 3.3 – Localização dos coletores 99824, 3282,2389 e 388580.

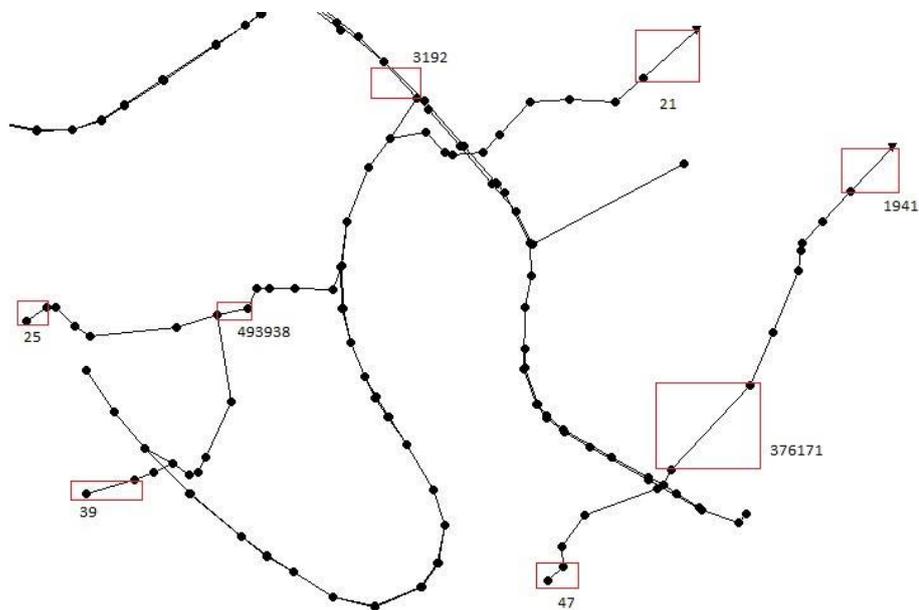


Figura 3.4 – Localização dos coletores 25, 39, 493938, 3192, 47, 21, 376171 e 1941.

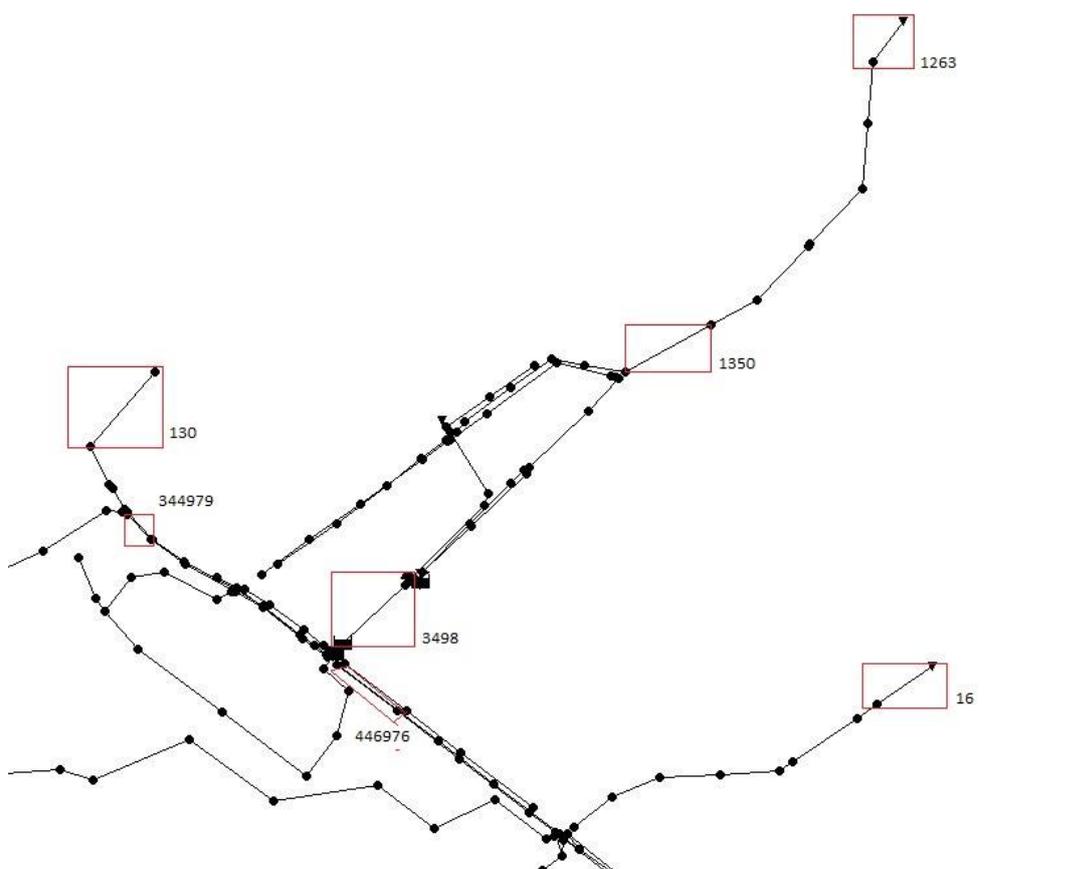


Figura 3.5 – Localização dos colectores 130, 344979, 3498, 446976, 1350, 1263 e 16.

### 3.1 Análise e Separação dos Eventos Pluviométricos

O reconhecimento de eventos pluviométricos é crucial no estudo de fenómenos de drenagem urbana. O objectivo do estudo de séries temporais é sumarizar as variáveis de interesse, como o valor absoluto, duração e intensidade destes eventos. São vários os métodos existentes, teóricos e empíricos, para a separação de eventos pluviométricos, Bidin and Chappel (2006), Blame et al. (2006), Fornis et al. (2005). Desta forma, foram estudados os dados contínuos de uma série temporal que decorreu de 20/07/2014 às 00:00 até à mesma hora de 05/09/2014, com resolução de dez minutos.

Os eventos pluviométricos deverão ser delimitados em termos de independência estatística para analisar as séries temporais das chuvadas. Segundo Joo et al. (2011), eventos com períodos de intensidade de precipitação de menor duração baixa ou nula são mais apropriados para estudar a resposta de bacias hidrográficas de menores dimensões, com pequena

capacidade de armazenamento, enquanto que eventos apresentando períodos desse tipo com uma maior duração são mais adequados a bacias hidrográficas de maiores dimensões.

Para o presente estudo, foi utilizado o método sugerido por Vernimmen et al. (2007), com duração de períodos com precipitação nula ou de baixa intensidade de quinze minutos. Deste método resulta que, se durante o período de registo contínuo houver quinze ou mais minutos com intensidade igual ou inferior a 0.2 mm, há uma quebra entre eventos.

Desta forma, foram analisados os dados contínuos relativos a Lucerna, tendo sido seleccionados os três eventos que, na opinião do autor, são os mais gravosos para o estudo de escoamento superficial e nos colectores, dentro dos eventos superiores a cento e trinta minutos e respeitando a metodologia apresentada no parágrafo anterior, os quais se passa a apresentar.

O evento 2, figura 3.6, teve início às 23:10 de 21-07-2014, e apresentou uma duração de 502 minutos, tendo terminado às 07:31 de 22-07-2014. Este evento apresentou uma intensidade máxima de 13.8 mm/h, que ocorreu entre os minutos 52 e 61, e uma intensidade média de 2.4 mm/h.

O evento 7, apresentado na figura 3.7, é semelhante ao evento 2, apresentado no parágrafo anterior, mas tem uma duração ligeiramente inferior, de 462 minutos. Este evento teve início às 21:10 de 10-08-2014 e terminou às 04:51 de 11-08-2014, apresentando uma intensidade máxima de 53.4 mm/h e uma intensidade média de 4.2 mm/h, ambas superiores às que caracterizam o evento anterior.

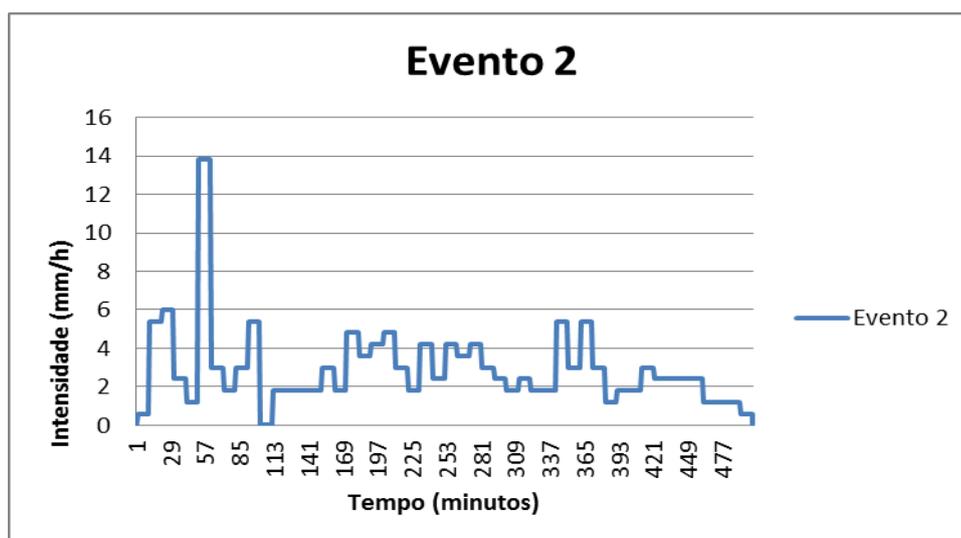


Figura 3.6 – Valores de intensidade do evento pluviométrico 2.

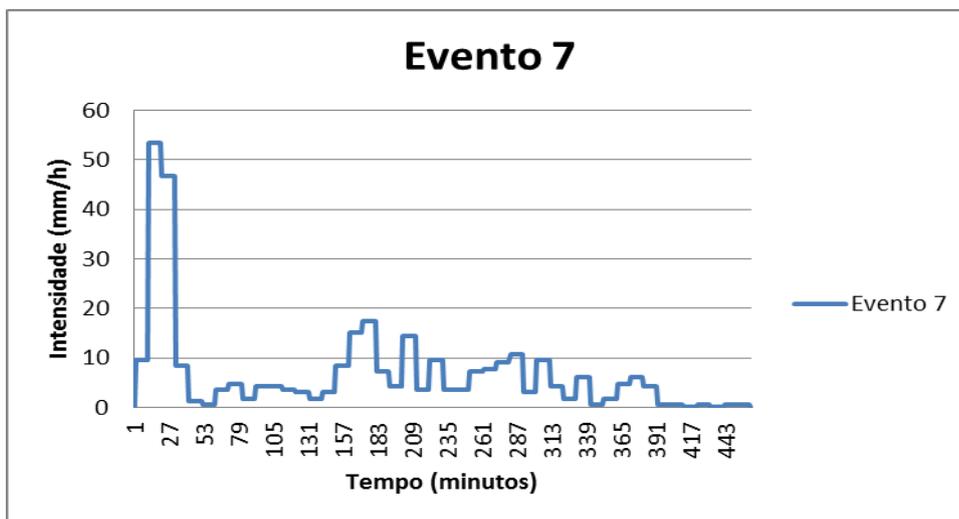


Figura 3.7 – Valores de intensidade do evento pluviométrico 7.

O evento 10, representado na figura 3.8, é significativamente mais curto que os apresentados anteriormente, tendo apenas 392 minutos. Teve início no dia 31-08-2014 às 13:00 e terminou às 19:31 do mesmo dia, tendo como valor de intensidade máxima 13.8 mm/h, um valor baixo quando comparado com o evento 7. Contudo, o que teve um peso na escolha do evento, dada a sua relevância para os cálculos posteriores, foi o facto de durante 80 minutos consecutivos, de 162 a 241, inclusive, a intensidade apresentar valores iguais ou superiores a 6 mm/h.

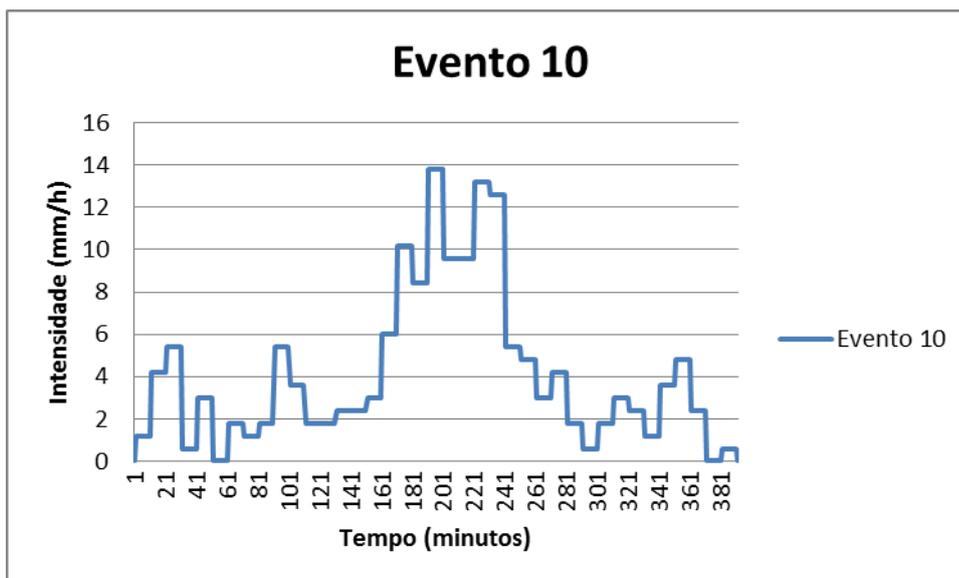


Figura 3.8 – Valores de intensidade do evento pluviométrico 10.

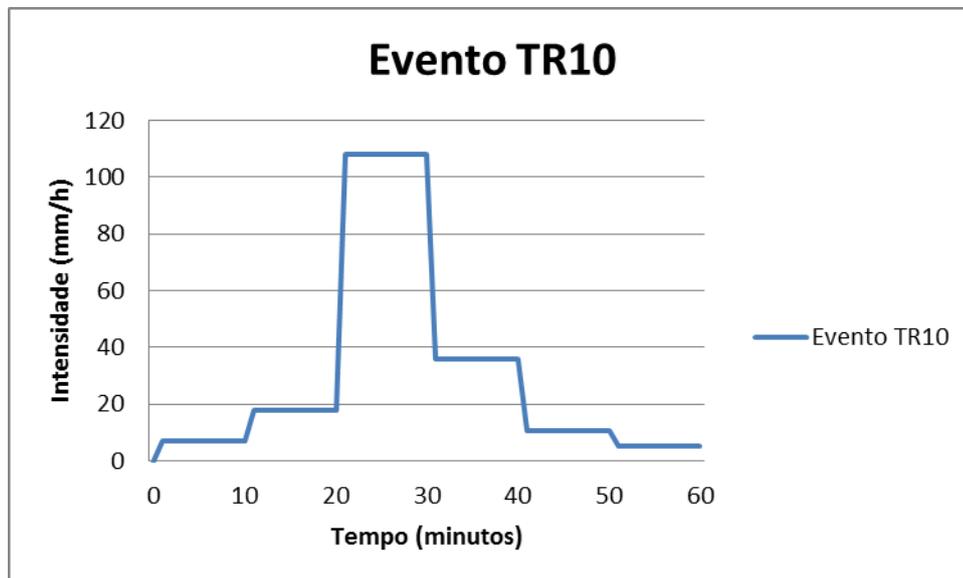


Figura 3.9 – Valores de intensidade do evento pluviométrico TR10.

O evento TR10, é um evento sintético de precipitação, criado com base no tempo de retorno de 10 anos, isto é, é um evento criado com base em medições reais, fazendo com que, neste caso, seja provável que apenas uma vez em cada 10 anos haja um evento que o iguale ou ultrapasse. Fazendo apenas uma comparação breve com os eventos naturais apresentados anteriormente, este evento apresenta uma duração menor, de 60 minutos, uma vez que é o tempo de concentração da bacia, e intensidades máxima e média bastante superiores, respectivamente, 108 e 14.4 mm/h.

Foi criado um evento sintético com base no tempo de retorno de 100 anos. Este evento foi criado utilizando as curvas IDF presentes no livro Hidráulica Urbana ( SáMarques e Sousa, 2011 ), uma vez que (i) não foram encontradas curvas IDF para a região de Lucerna e (ii) os resultados com os parâmetros  $a$  e  $b$  definidos para a zona C dessas mesmas curvas, para um tempo de retorno de 10 anos aproximavam os resultados da chuvada TR10. A construção deste evento consiste numa equação exponencial do tipo

$$I = a * t^b \quad (3)$$

em que  $I$  é a intensidade média, em milímetros por hora, para o tempo  $t$  em minutos. Os parâmetros adimensionais  $a$  e  $b$  são, respectivamente, 438.75 e -0.508.

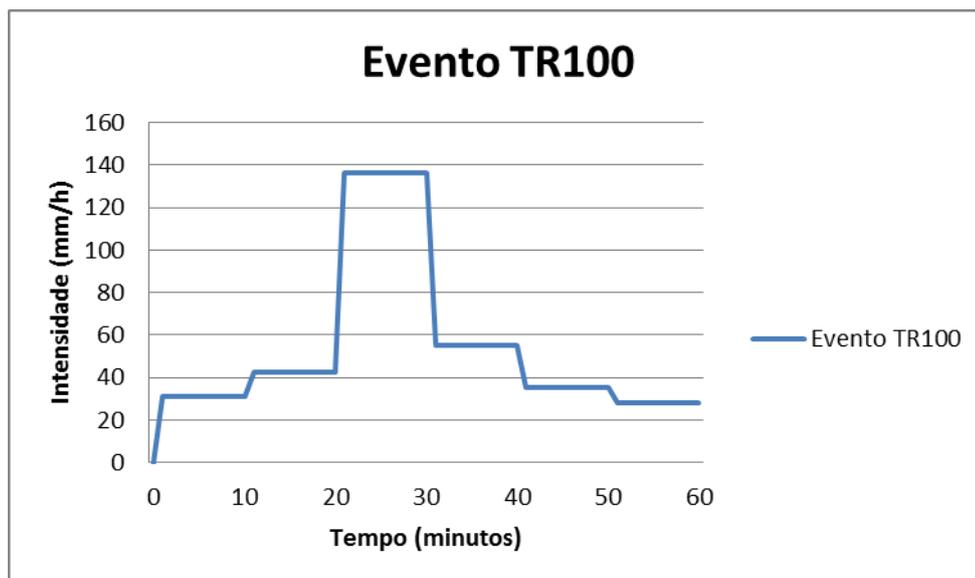


Figura 3.10 – Valores de intensidade do evento pluviométrico TR100.

O evento TR100 é semelhante ao evento TR10, com a mesma duração, apresentando intensidades médias e máximas superiores, respectivamente de 39 e 136 milímetros por hora.

### 3.2 Análise dos Modelos Digitais do Terreno para construção de modelos 1D

Para a análise dos Modelos Digitais para a construção dos modelos, recorreu-se ao programa ArcGIS da ESRI.

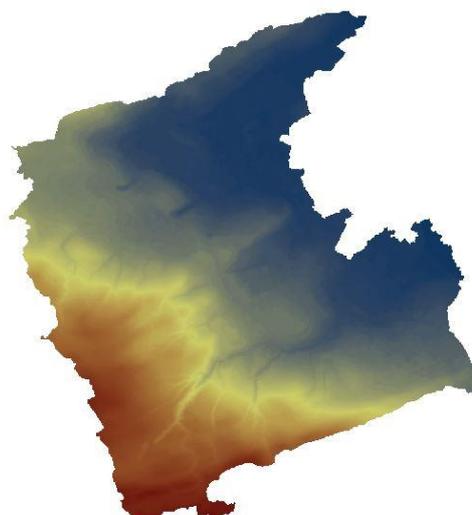


Figura 3.11 – Modelo Digital do Terreno UAV de Wartegg.



Figura 3.12 – Raster de declives UAV de Wartegg.

A figura 3.11 ilustra o MDT criado através das imagens captadas com o *drone* da bacia de Wartegg em Lucerna. A análise deste modelo permite concluir que apresenta uma grande variação de altitudes. Do raster inicial da bacia, criou-se um raster de declives, figura 3.11, e posteriormente, sobrepondo as sub-bacias, figura 3.12, no ficheiro, cria-se um tabela com as novas inclinações das mesmas. Este procedimento foi realizado para os Modelos Digitais do Terreno criados por LiDAR e *drone* (UAV).

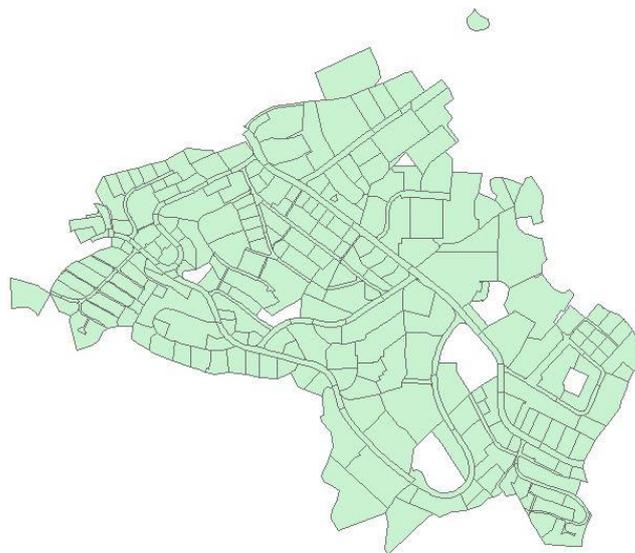


Figura 3.13 – Sub-bacias constituintes da rede de drenagem.

Após o cálculo das inclinações de cada sub-bacia, estas foram alteradas no ficheiro inp (ficheiro de entrada de dados no programa SWMM assim como nos modelos *Semi Distributed* criados utilizando o programa INFOWORKS). As inclinações das sub-bacias podem ter impactos grandes, não nos volumes de caudal a circular nos colectores ou escoamento superficial, mas sim na alteração da velocidade de escoamento, reduzindo ou aumentando o tempo de entrada no sistema de drenagem, e alterando, consequentemente o tempo de concentração do mesmo. Uma maior precisão no cálculo das mesmas, poderá levar a uma maior aproximação da realidade pelos modelos.

### 3.3 Análise Dinâmica 1D

A análise dinâmica 1D foi realizada utilizando o o programa SWMM, versão 5.1, criado pela EPA, *Environmental Protection Agency of US*, traduzido para português, Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos da América. Todas as análises foram feitas, recorrendo ao modelo da onda dinâmica (o mais completo presente no programa), o método de infiltração de Horton, e valores de evaporação mensal usuais para o local em análise, presentes no quadro 3.2. Em todas as análises foram utilizados, para cada sub-bacia o valor de inclinação média da mesma, presente no MDT calculados através do programa ArcGIS, como explicado na secção anterior. Contudo, os modelos foram construídos com base num modelo enviado pelo Professor Doutor João Paulo Leitão, com muitas outras características importantes das sub-bacias incluindo área, percentagem impermeável, e, valores de inclinação, construídos com base em levantamentos topográficos locais. Desse modo foram contabilizados os três conjuntos de inclinações, Inicial, LiDAR e UAV.

Valores de Evaporação	
Janeiro	0.1 mm
Fevereiro	0.6 mm
Março	1.3 mm
Abril	3 mm
Mai	3.7 mm
Junho	4.9 mm
Julho	4.9 mm
Agosto	4.3 mm
Setembro	3.1 mm
Outubro	0.9 mm
Novembro	0.4 mm
Dezembro	0.1 mm

Quadro 3.2 – Valores de Evaporação mensal de Lucerna.

Inicialmente foram construídos modelos para realizar uma análise para os valores contínuos de precipitação das 00:00 de 20-07-2014 às 00:00 de 05-09-2014. No entanto, ao registo de dados relativamente ao caudal, altura da lâmina líquida no colector e percentagem da capacidade da secção do colector utilizada, para os 19 colectores apresentados no início do presente capítulo, foi feito a cada cinco minutos, tendo tido início apenas às 00:00 do dia 21-07-2014, e final coincidente com os registos pluviométricos.

Foi construído um modelo para analisar o impacto que o evento 2, apresentado na secção 3.1, teria na presente rede de drenagem urbana. Embora se tenha feito coincidir o início da análise com o início do evento pluviométrico, ou seja, às 23:10 de 21-07-2014, a análise decorreu até às 10:00 do dia 22-07-2014, tendo excedido os 502 minutos do evento, pois a chuva terminou às 07:31 deste dia. Do modelo foram retirados os valores dos mesmos parâmetros descritos no parágrafo anterior para os mesmos colectores, sendo que estes foram registados num intervalo de tempo menor, de um minuto, para maior precisão dos resultados.

À semelhança do realizado no parágrafo anterior, foram construídos nove modelos, três para cada um dos restantes eventos pluviométricos apresentados na secção 3.1. Todos os modelos têm início coincidente com o início do respectivo evento pluviométrico. Para isso, foi necessário fixar uma data para os eventos sintéticos TR10 e TR100. Foi definida a data 08-07-2016, com início às 00:00, sendo que análise foi realizada até às 05:00 do mesmo dia, quatro horas após o final do evento. No evento 7, o período de análise excedeu os 402 minutos, prolongando-se até 06:00 de 11-08-2014. Finalmente, no evento 10, a análise terminou às 22:00 de 31-08-2014, excedendo o evento em 149 minutos.

Em todas as análises dos eventos apresentados na secção 3.1, o tempo de análise excedeu o tempo do evento, garantindo-se assim, para uma análise mais rigorosa e correcta, que a água que circula na rede de colectores chega aos pontos mais a jusante.

Inclinações Médias das sub-bacias	SWMM
LiDAR	x
UAV	x
Topográficas (iniciais)	x

Quadro 3.3 – Modelos feitos para a análise 1D utilizando o *software* SWMM.

### 3.4 Análise Dinâmica 1D/2D

A análise dinâmica 1D/2D foi realizada recorrendo ao programa INFOWORKS ICM 6.5 da INNOVYZE. Todas as análises foram realizadas para os eventos pluviométricos apresentados na secção 3.1, para o mesmo intervalo de tempo que as análises realizadas na secção anterior. De encontro com o realizado anteriormente, foram utilizados os dados das inclinações médias das sub-bacias para a construção dos modelos *Semi-Distributed*. Estes modelos, ao encontro do apresentado na figura 3.14, têm entrada directa das sub-bacias na rede de drenagem, e apenas haverá água a circular na malha criada através dos dados do Modelo Digital do Terreno no caso de o sistema entrar em carga. Já para os modelos *Fully-Distributed*, a precipitação é directamente aplicada na malha, onde entrará, caso as disposições de relevo o permitam no sistema de drenagem. À semelhança do que acontece nos modelos SD, no caso de o sistema entrar em carga, a água voltará para a malha 2D.

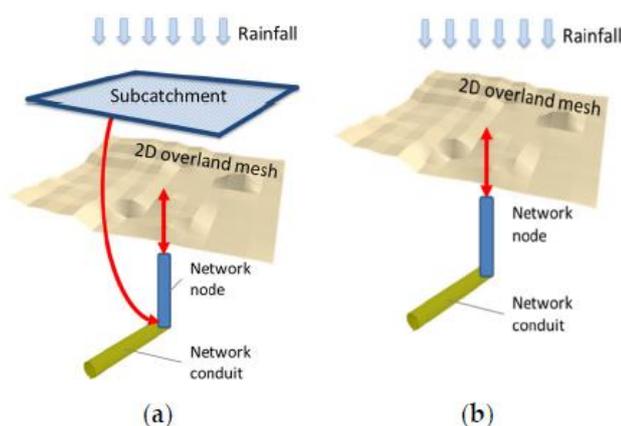


Figura 3.14 – Apresentação de modelos *Semi-Distributed* (a) e *Fully-Distributed* (b).

Modelo Digital do Terreno	INFOWORKS	
	SD	FD
LiDAR	x	x
UAV	x	x

Quadro 3.4 – Modelos feitos para a análise 1D utilizando o *software* INFOWORKS.

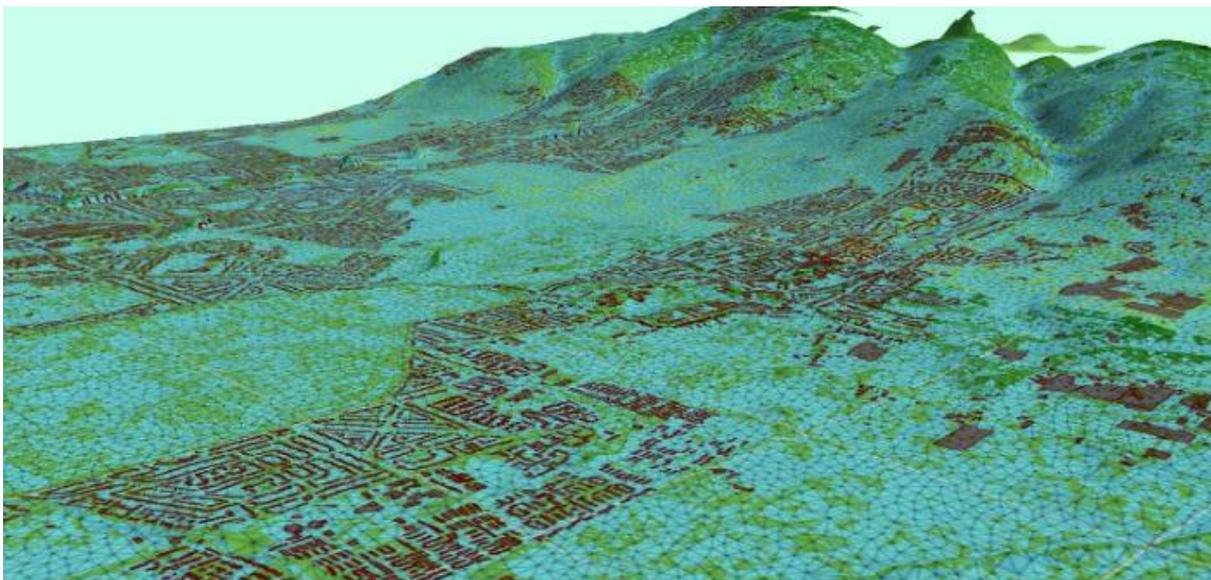


Figura 3.15 – Exemplo de escoamento superficial numa malha 2D.

### 3.5 Avaliação do desempenho dos modelos hidrológicos

Para avaliação do desempenho dos modelos hidrológicos, foram utilizados os indicadores presentes no artigo *Performance evaluation of hydrological models: statistic significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments* (Ritter, A. e Muñoz-Carpena, R., 2012). Estes indicadores têm o propósito de tornar as comparações entre modelos hidrológicos menos subjectivas. No cálculo destes indicadores, com resultados apresentados no próximo capítulo, os volumes observados foram considerados os presentes no ficheiro com as inclinações iniciais (topográficas), fazendo com que todas as comparações sejam feitas face aos resultados obtidos para esse modelo. Em todas as equações abaixo apresentadas,  $O$  representa o volume do modelo de referência para a comparação e  $P$  o volume do modelo a comparar.

$$RE = \frac{|O_{max} - P_{max}|}{O_{max}} \quad (4)$$

O primeiro indicador, RE representa uma relação em termos absolutos entre os volumes máximos apresentados por cada modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (5)$$

O indicador seguinte, RMSE, apresentado na equação 5, é a raiz quadrada do somatório do erro médio.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \hat{O})^2}{N}} \quad (6)$$

O indicador SD, equação 6, representa o desvio padrão.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \hat{O})^2} \quad (7)$$

Na equação 7 é apresentado o indicador NSE que representa o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe.

$$Nt = \frac{SD}{RMSE} - 1 \quad (8)$$

Nt é o número de vezes que a variabilidade é maior que o erro médio.

Contudo, estes valores devem ser confrontados com uma tabela, também presente no artigo, apresentada no quadro 3.5.

	SD	NSE	Nt
<b>Muito Bom</b>	>=3.2 RMSE	>=0.9	>2.2
<b>Bom</b>	<3.2 RMSE-2.2 RMSE	<0.9-0.8	<2.2-1.2
<b>Aceitável</b>	<2.2 RMSE-1.2 RMSE	<0.8-0.65	<1.2-0.7
<b>Insatisfatório</b>	<1.2 RMSE	<0.65	<0.7

Quadro 3.5 – Tabela de intervalos para os indicadores SD, NSE e Nt.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos para as condutas modeladas. De modo a facilitar a exposição, foram agrupados para o evento pluviométrico em estudo. A análise foi realizada para os eventos pluviométricos apresentados na secção 3.1.

A análise foi realizada para todos os colectores apresentados no quadro 3.1, contudo, devido ao limite de páginas imposto para a presente dissertação, optou-se por apresentar os resultados apenas para os colectores 99824, 47, 2389, 3716171, 1263 e 21. Os dois primeiros colectores foram seleccionados por quase se encontram em extremos opostos da bacia e apresentarem valores de caudal significativamente diferentes, podendo pois considerar-se representativos do grupo investigado. O colector 99824 tem um diâmetro de 0.3 m e um comprimento de 27.49 m, enquanto o colector 47, apresenta um diâmetro maior, 0.6 m, e um comprimento menor de 16.13 m.

Quanto aos colectores intermédios, foram seleccionados o colector 2389 e 376171. O colector 2389 é um colector com diâmetro de 0.45 metros e um comprimento de 42.07 metros. Já o colector 376171, apresenta um diâmetro e comprimento maiores, respectivamente de 0.7 metros e 92.90 metros. Estes dois colectores foram seleccionados por se encontram quase em zonas diferentes quando analisada a rede, e também, porque o colector 2389 se encontra numa zona mais perto do início da rede, ao invés do colector 376171 que se encontra mais perto do nó de saída.

Finalmente, os colectores a jusante seleccionados são 21 e 1263. O colector 21 é um colector com diâmetro de 0.8 metros e um comprimento de 58.32 metros. Já o colector 1263, apresenta um diâmetro maior, 1.75 metros, enquanto que, apresenta um comprimento menor de 40.29 metros. Estes dois colectores foram seleccionados por se encontram quase em extremos opostos da bacia, e com valores de caudal significativamente diferentes.

Logicamente que cada um destes colectores terá uma área de influência muito diferente, que, será um factor de grande importância para o caudal e volume que passaram por cada colector.

## 4.1 Evento 7

O evento 7, como apresentado na secção 3.1, apresenta uma duração de 462 minutos. O evento tem início às 21:10 de 10-08-2014, terminando às 04:51 de 11-08-2014, apresentando uma intensidade máxima de 53.4 mm/h e uma intensidade média de 4.2 mm/h. A análise foi realizada das 21:10 às 06:00 do dia seguinte.

### 4.1.1 Colectores a montante

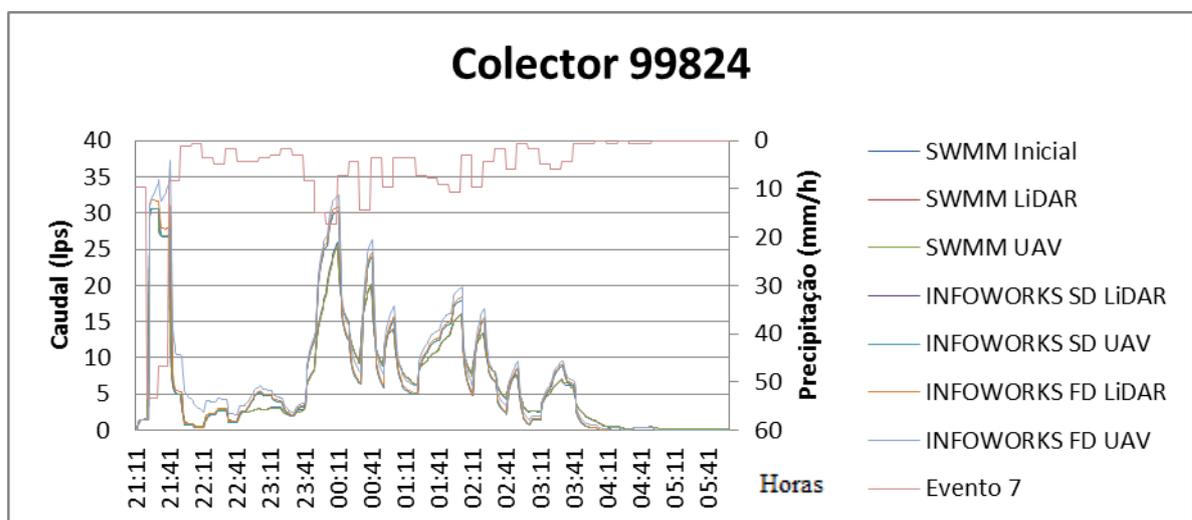


Figura 4.1 – Valores de caudal para o colector 99824 para o evento 7.

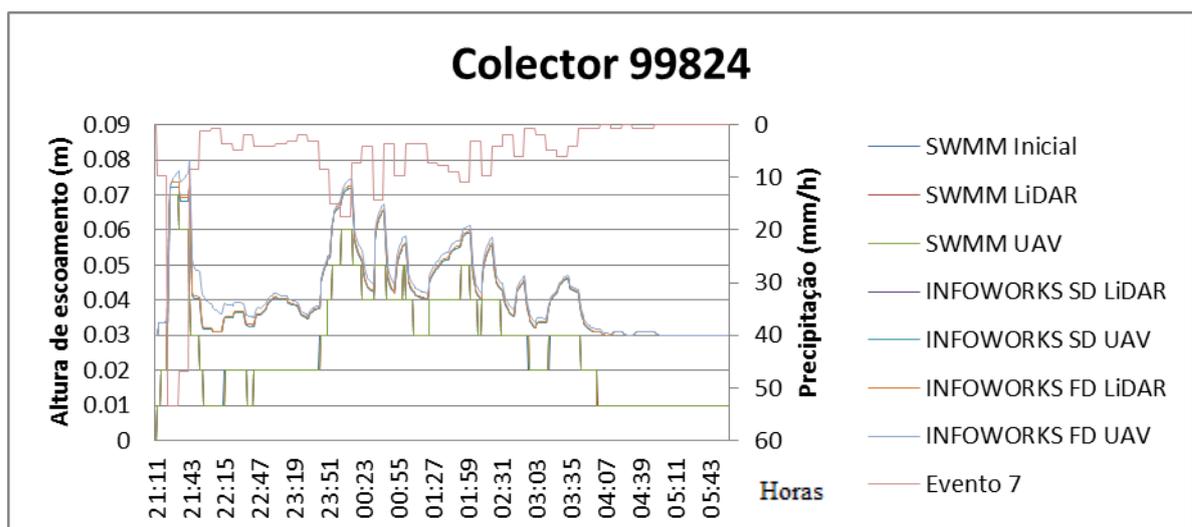


Figura 4.2 – Valores de altura de escoamento para o colector 99824 para o evento 7.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
Σ Diferenças	0.228	0.268	0.040	-0.005	-30.464
Σ Diferenças absolutas	1.964	1.767	0.346	0.179	30.505
Média Diferenças	4.30E-04	5.05E-04	7.47E-05	-1.02E-05	-5.75E-02
Média Diferenças absolutas	3.71E-03	3.33E-03	6.53E-04	3.38E-04	5.76E-02

Quadro 4.1 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes ( $m^3$ ) para o colector 99824 durante o evento 7.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.000	0.000	0.003	0.003	0.041	0.166
RSME ( $m^3/s$ )	0.007	0.006	0.116	0.116	0.126	0.173
SD ( $m^3/s$ )	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465
NSE	1.000	1.000	0.938	0.937	0.926	0.862
Nt	69.984	77.769	3.009	2.996	2.682	1.692

Quadro 4.2 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 99824 durante o evento 7.

Como se pode analisar através das figuras 4.1 e 4.2, assim como do quadro 4.1, onde a diferença de Modelos Digitais de Terreno apresenta maiores diferenças é nos modelos FD construídos através do INFOWORKS. Seria desde logo expectável, uma vez que nos modelos SWMM apenas utilizamos um parâmetro (inclinação média das sub-bacias), como também modelos SD INFOWORKS, sendo que a água apenas circulará na malha criada pelo MDT no caso de o sistema entrar em carga. Face aos valores de altura de água apresentados anteriormente, e, sabendo que a altura máxima de água no colector equivale ao seu diâmetro, 0.3 m, conclui-se que o colector não entra em carga, pelo que não teremos água a circular na malha para este colector. Através do quadro 4.2, analisamos que os resultados de todos os modelos são bastante próximos.

A análise feita para o colector 47 é feita recorrendo às figuras 4.3 e 4.4 e ao quadro 4.3, desta análise conclui-se que, à semelhança do que ocorre para o colector 99824, onde se apresentam maiores diferenças é para os modelos FD de INFOWORKS.

A partir do descrito nos dois parágrafos anterior chega-se à conclusão que, para o evento 7 e nos colectores a montante, se chega a uma maior diferença em ambos os casos apresentados para os modelos FD construídos no INFOWORKS.

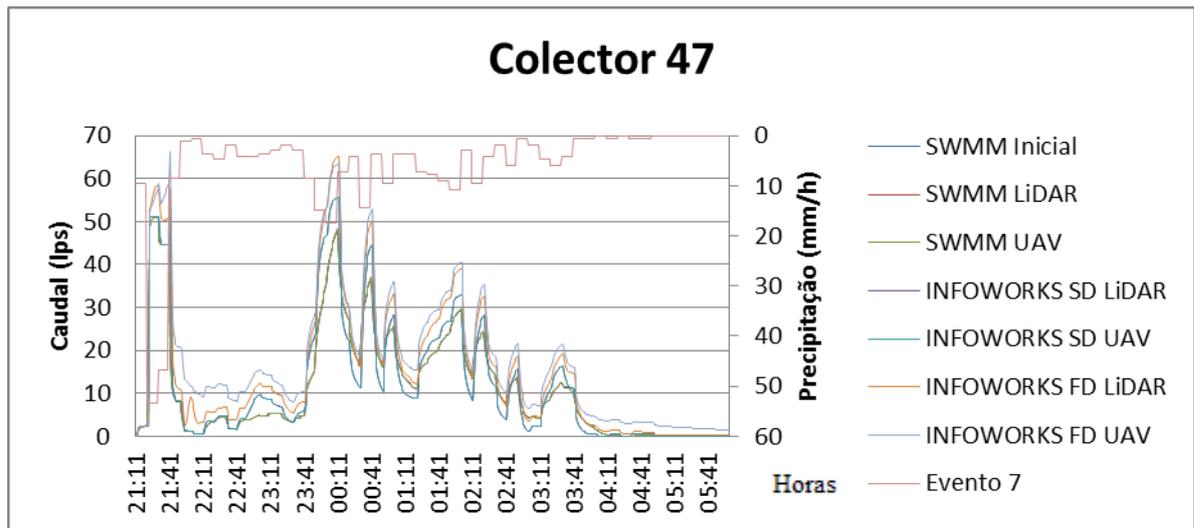


Figura 4.3 – Valores de caudal para o colector 47 para o evento 7.

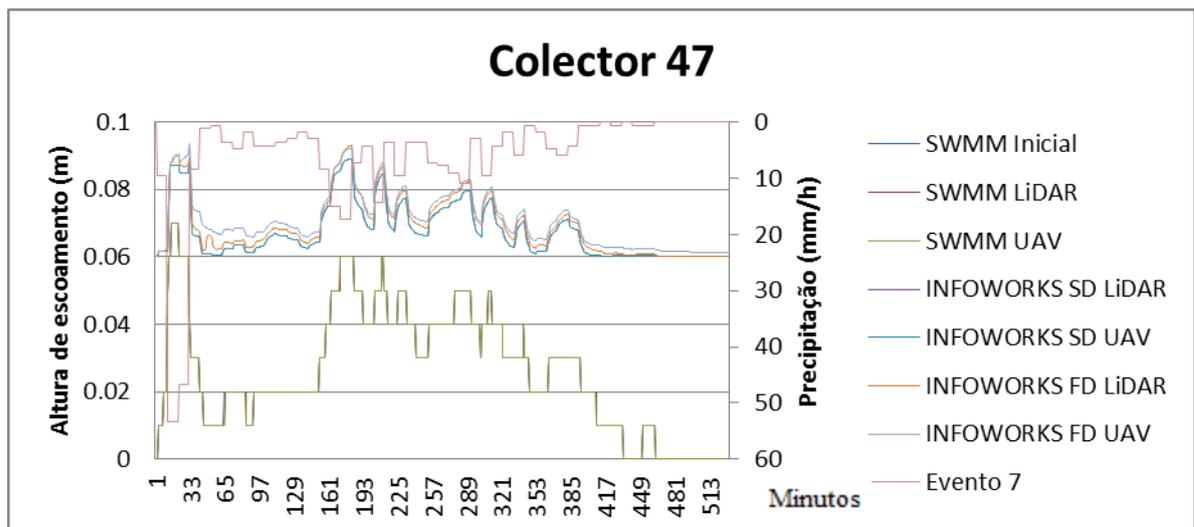


Figura 4.4 – Valores de altura de escoamento para o colector 47 para o evento 7.

Sabendo previamente que o diâmetro do colector 47 é de 0.6m, e, analisando a figura 4.4, depressa se conclui que o colector está muito longe de entrar em carga.

Finalizando com a análise do quadro 4.2, para o colector 99824, concluímos que os resultados se encontram dentro do intervalo entre muito bom e aceitável, assim como para o colector 47, com os resultados presentes no quadro 4.4.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-0.118	-0.109	0.009	-0.019	-81.926
$\Sigma$ Diferenças absolutas	1.019	1.629	0.941	0.533	85.703
Média Diferenças	-2.23E-04	-2.06E-04	1.70E-05	-3.62E-05	-1.55E-01
Média Diferenças absolutas	1.92E-03	3.07E-03	1.78E-03	1.01E-03	1.62E-01

Quadro 4.3 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes ( $m^3$ ) para o colector 47 durante o evento 7.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.000	0.000	0.092	0.092	0.280	0.247
RSME ( $m^3/s$ )	0.006	0.007	0.225	0.226	0.355	0.478
SD ( $m^3/s$ )	0.830	0.830	0.830	0.830	0.830	0.830
NSE	1.000	1.000	0.926	0.926	0.817	0.669
Nt	129.677	123.823	2.687	2.668	1.338	0.737

Quadro 4.4 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 47 durante o evento 7.

#### 4.1.2 Colectores Intermédios

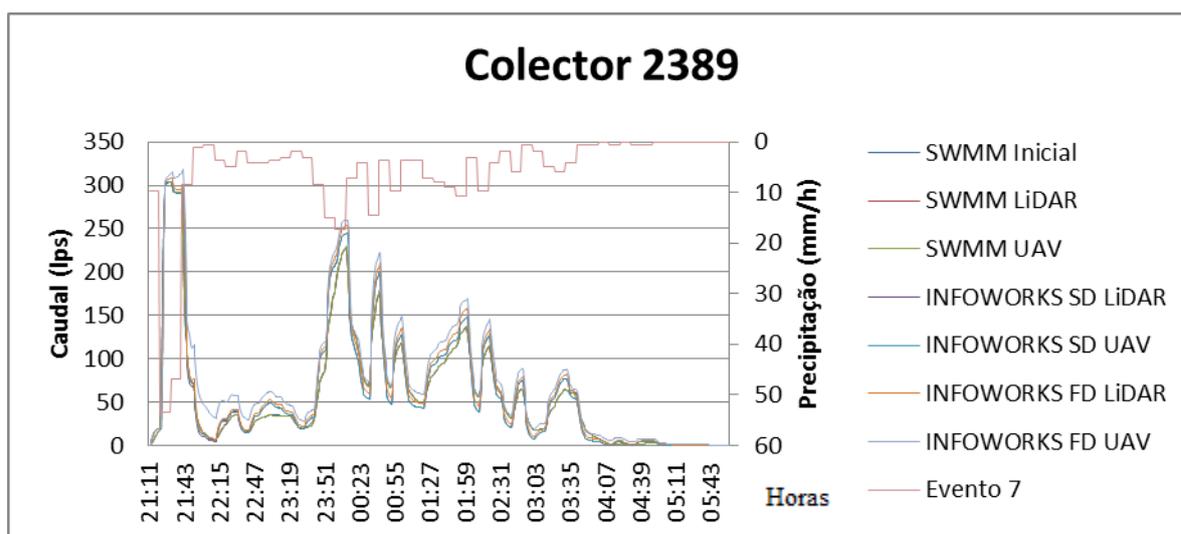


Figura 4.5 – Valores de caudal para o colector 2389 para o evento 7.

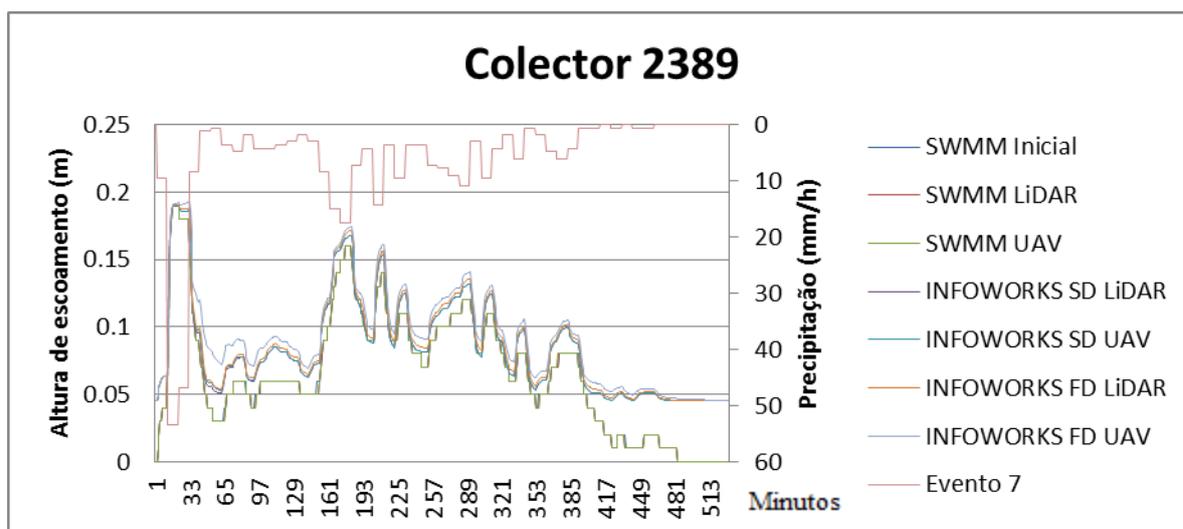


Figura 4.6 – Valores de altura de escoamento para o colector 2389 para o evento 7.

Com a leitura das figuras 4.5 e 4.6, assim como do quadro 4.5 para avaliar os valores do colector 2389, conclui-se que as maiores diferenças se encontram nos modelos FD do INFOWORKS entre os Modelos Digitais Terreno de LiDAR e UAV.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	1.773	2.927	1.154	-8.416	-294.664
$\Sigma$ Diferenças absolutas	7.316	11.459	5.046	9.867	294.664
Média Diferenças	0.003	0.006	0.002	-0.016	-0.556
Média Diferenças absolutas	0.014	0.022	0.010	0.019	0.556

Quadro 4.5 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes ( $m^3$ ) para o colector 2389 durante o evento 7.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.000	0.000	0.002	0.001	0.013	0.041
RSME ( $m^3/s$ )	0.033	0.045	0.691	0.696	0.832	1.310
SD ( $m^3/s$ )	4.236	4.236	4.236	4.236	4.236	4.236
NSE	1.000	1.000	0.973	0.973	0.961	0.904
Nt	125.954	93.111	5.128	5.087	4.092	2.235

Quadro 4.6 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 2389 durante o evento 7.

Com o quadro 4.6, concluímos que os resultados dos diferentes modelos hidrológicos se encontram todos muito parecidos com o modelo hidrológico construído com as inclinações topográficas e corrido no programa SWMM.

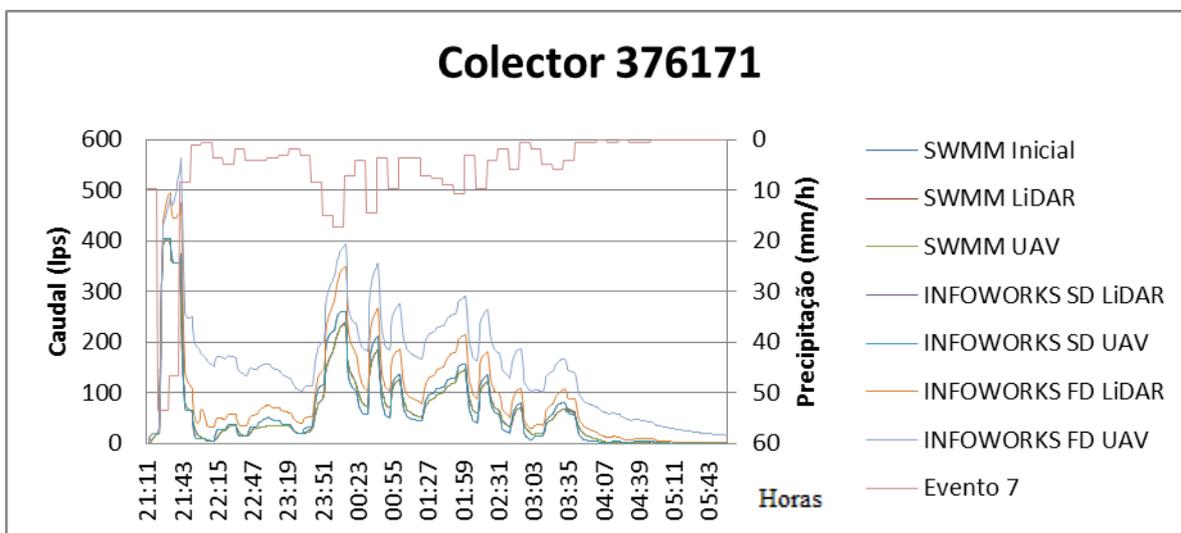


Figura 4.7 – Valores de caudal para o colector 376171 para o evento 7.

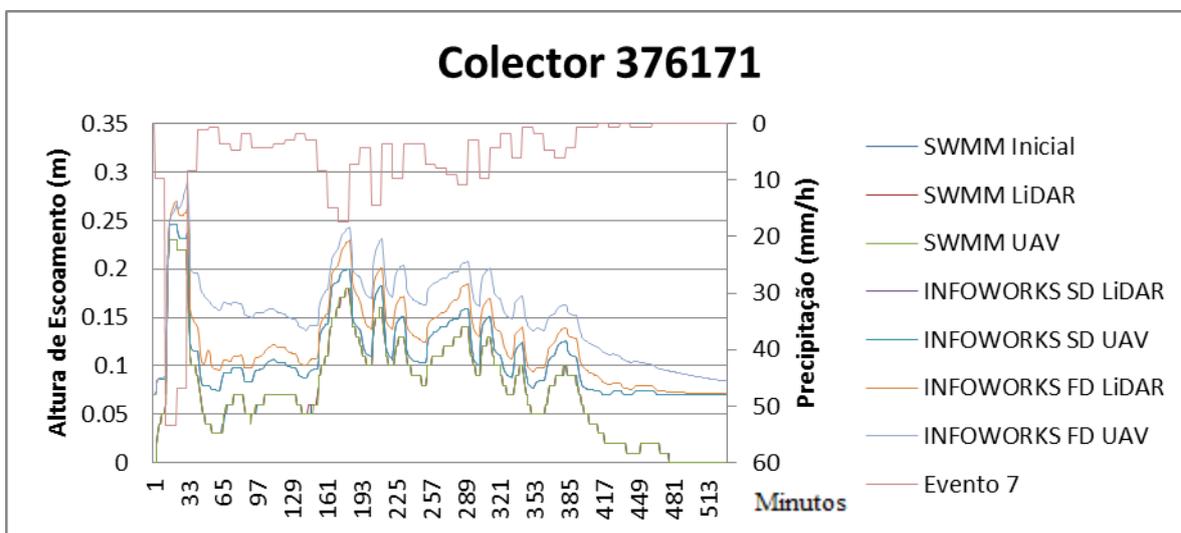


Figura 4.8 – Valores de altura de escoamento para o colector 376171 para o evento 7.

Ainda face ao colector 2389, conclui-se também que o modelo SD construído no INFOWORKS que deveria dar resultados de diferenças semelhantes aos modelos SWMM entre os Modelos Digitais do Terreno LiDAR e UAV, uma vez que o sistema não entra em carga. Quanto ao colector 376171, conclui-se, ao encontro do concluído para os anteriores

colectores, que a maior diferença entre modelos se encontra nos modelos FD do INFOWORKS entre os Modelos Digitais do Terreno LiDAR e UAV.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
Σ Diferenças	0.725	2.024	1.298	-0.093	-2046.562
Σ Diferenças absolutas	7.336	11.011	4.961	2.023	2060.185
Média Diferenças	1.37E-03	3.82E-03	2.45E-03	-1.75E-04	-3.86
Média Diferenças absolutas	1.38E-02	2.08E-02	9.36E-03	3.82E-03	3.89

Quadro 4.7 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes ( $m^3$ ) para o colector 376171 durante o evento 7.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.000	0.000	0.004	0.004	0.226	0.363
RSME ( $m^3/s$ )	0.041	0.050	0.795	0.800	2.574	6.493
SD ( $m^3/s$ )	4.999	4.999	4.999	4.999	4.999	4.999
NSE	1.000	1.000	0.975	0.974	0.735	-0.687
Nt	122.144	98.318	5.285	5.245	0.942	-0.230

Quadro 4.8 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 376171 durante o evento 7.

Através do quadro 4.8 conclui-se que os resultados dos modelos FD corridos no programa INFOWORKS, contém diferenças significativas do modelo com as inclinações iniciais. .

### 4.1.3 Colectores a Jusante

Analisando as figuras 4.9 e 4.10 juntamente com o quadro 4.9 conclui-se que as maiores diferenças se encontram entre os modelos FD com os modelos digitais do terreno LiDAR e UAV corridos no programa INFOWORKS. Do quadro 4.10 conclui-se que os resultados para os modelos SWMM e INFOWORKS SD, são muito parecidos, enquanto que os resultados dos modelos INFOWORKS FD apresentam resultados bastante diferentes do modelo SWMM com as inclinações topográficas.

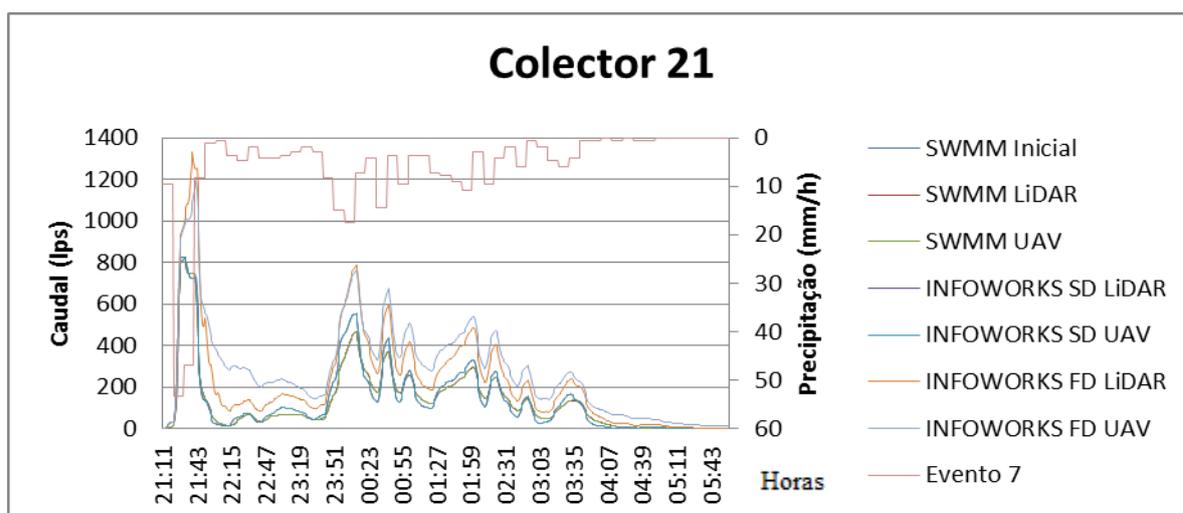


Figura 4.9 – Valores de caudal para o colector 21 para o evento 7.

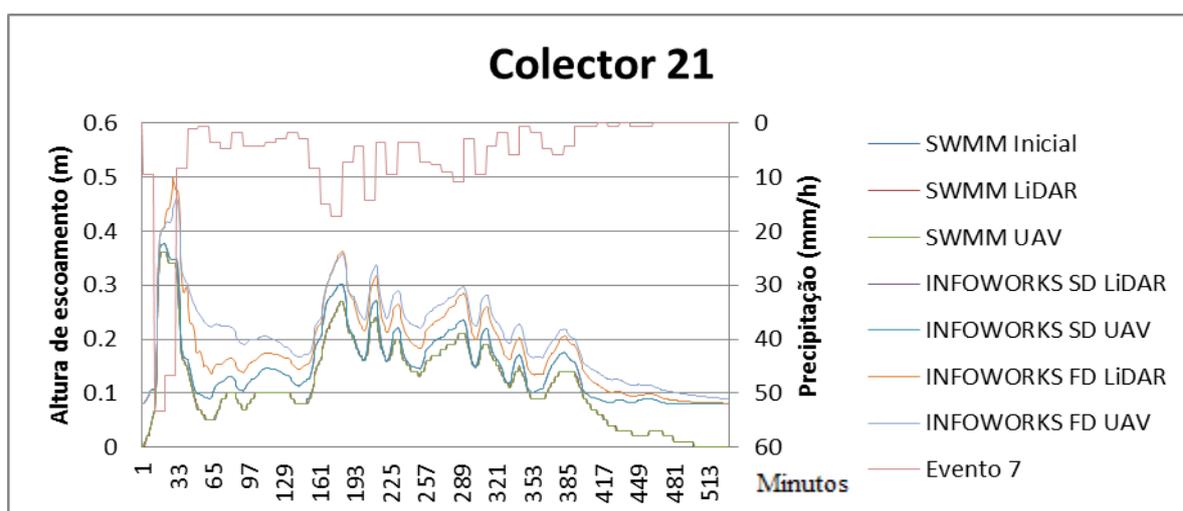


Figura 4.10 – Valores de altura de escoamento para o colector 21 para o evento 7.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
Σ Diferenças	5.077	5.968	0.891	-1.562	-1703.928
Σ Diferenças absolutas	15.536	15.568	14.243	6.408	1947.299
Média Diferenças	0.01	0.011	0.002	-0.003	-3.215
Média Diferenças absolutas	0.029	0.029	0.027	0.012	3.674

Quadro 4.9 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes ( $m^3$ ) para o colector 21 durante o evento 7.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.002	0.001	0.011	0.011	0.605	0.436
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.062	0.078	1.782	1.796	8.388	10.830
SD (m <sup>3</sup> /s)	10.189	10.189	10.189	10.189	10.189	10.189
NSE	1.000	1.000	0.969	0.969	0.322	-0.130
Nt	163.360	129.239	4.717	4.674	0.215	-0.059

Quadro 4.10 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 21 durante o evento 7.

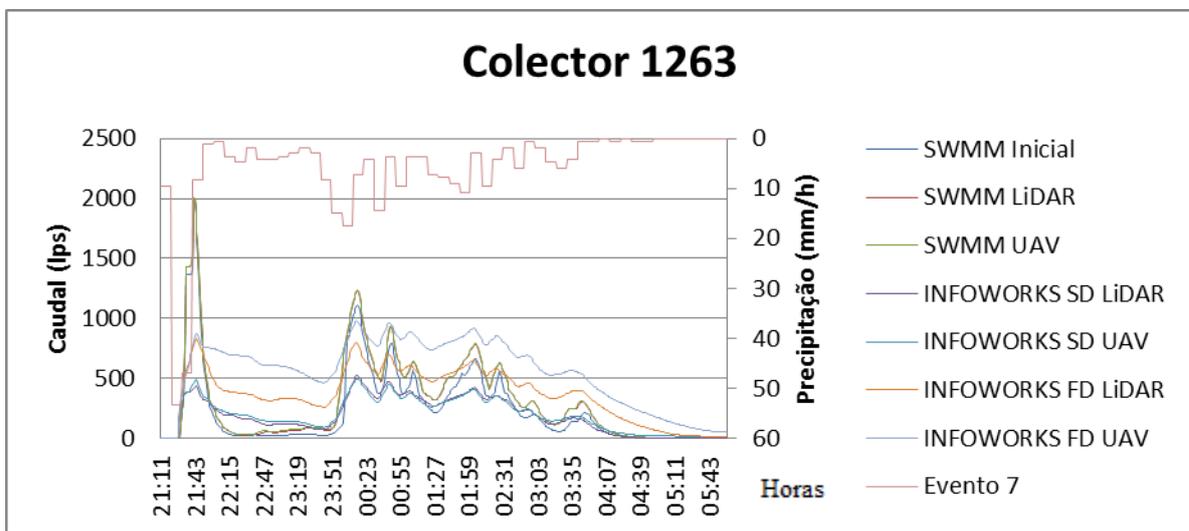


Figura 4.11 – Valores de caudal para o colector 1263 para o evento 7.

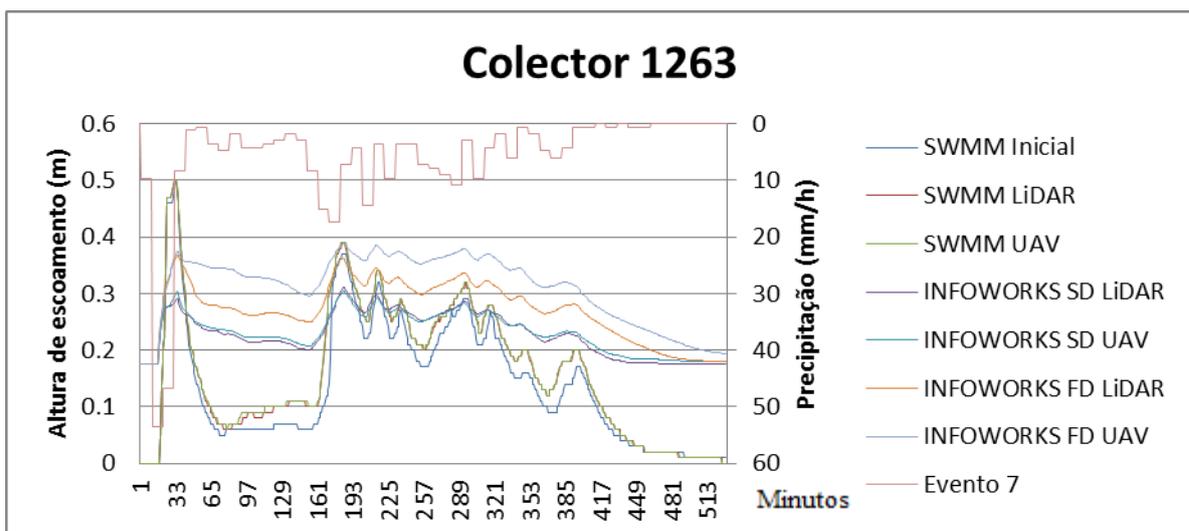


Figura 4.12 – Valores de altura de escoamento para o colector 1263 para o evento 7.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-1978.775	-2087.193	-108.418	-260.957	-5998.143
$\Sigma$ Diferenças absolutas	1982.826	2092.212	119.951	586.056	6022.250
Média Diferenças	-3.734	-3.938	-0.205	-0.492	-11.317
Média Diferenças absolutas	3.741	3.948	0.226	1.106	11.363

Quadro 4.11 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes ( $m^3$ ) para o colector 1263 durante o evento 7.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.009	0.007	0.735	0.750	0.578	0.507
RSME ( $m^3/s$ )	5.334	5.557	13.579	13.662	14.528	24.796
SD ( $m^3/s$ )	21.616	21.616	21.616	21.616	21.616	21.616
NSE	0.939	0.934	0.605	0.601	0.548	-0.316
Nt	3.052	2.890	0.592	0.582	0.488	-0.128

Quadro 4.12 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 1263 durante o evento 7.

Através das figuras 4.11 e 4.12 com a análise do quadro 4.11 facilmente se conclui que as maiores diferenças se encontram entre os modelos FD com os modelos digitais do terreno LiDAR e UAV corridos no programa INFOWORKS. Do quadro 4.12 conclui-se que os resultados dos modelos SD e FD corridos no programa INFOWORKS apresentam com grandes diferenças do modelo SWMM com as inclinações iniciais, que apresenta resultados, como expectável, muito semelhantes aos modelos corridos no mesmo programa com as inclinações dos modelos digitais de terreno LiDAR e UAV.

## 4.2 Evento TR100

O evento TR100 é um evento semelhante ao TR10, apresentado no Anexo 2, com a mesma duração, apresentando intensidades médias e máximas superiores, respectivamente de 39 e 136 milímetros por hora. Considerando que este evento teve início as 00:00, a análise foi feita até 5 horas depois do início do mesmo, de modo a garantir que a precipitação chegue ao final do sistema de drenagem.

### 4.2.1 Colectores a Montante

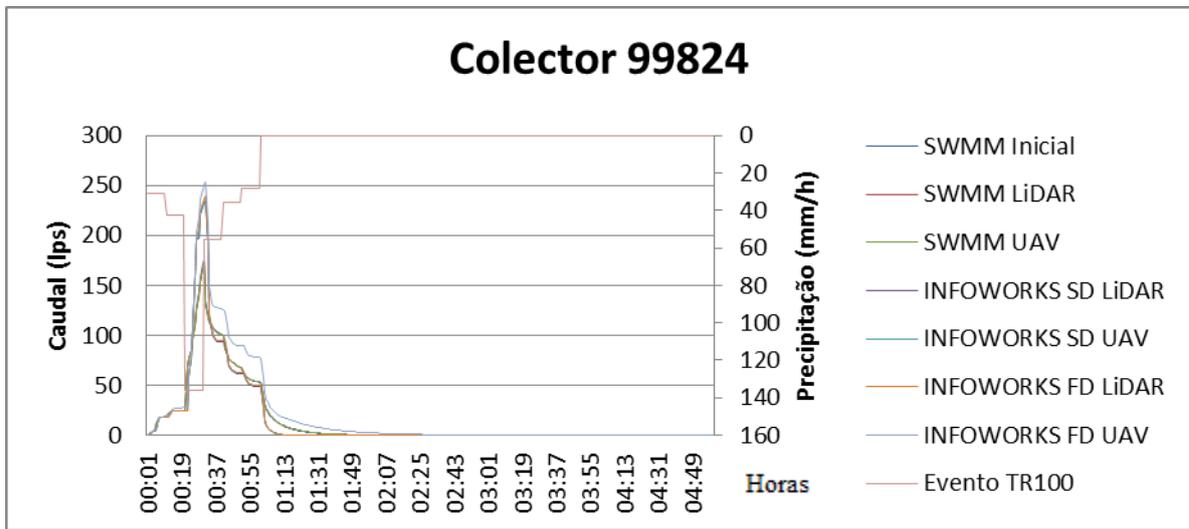


Figura 4.13 – Valores de caudal para o colector 99824 para o evento TR100.

Com a leitura das figuras 4.13 4.14 assim como dos quadros 4.13 e 4.14, conclui-se que para o evento TR100, o colector entra em carga, isto é, o escoamento atinge a altura máxima, e, os volumes de escoados em cada modelo têm valores e formatos semelhantes ao do ficheiro base.

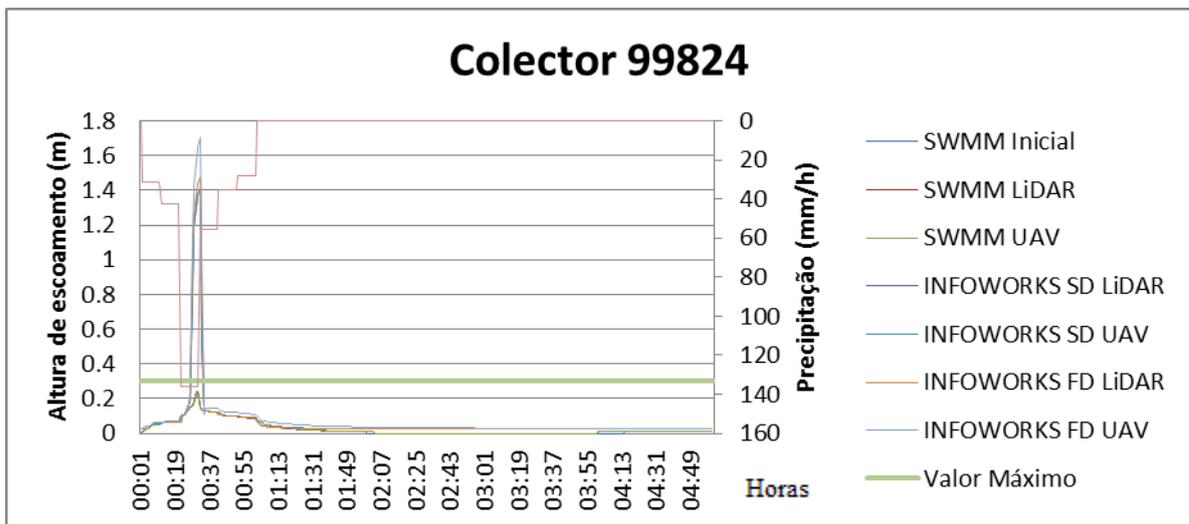


Figura 4.14 – Valores de altura de escoamento para o colector 99824 para o evento TR100.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	0.163	0.111	-0.052	-2.140	-93.899
$\Sigma$ Diferenças absolutas	4.121	3.569	0.572	2.270	93.989
Média Diferenças	0.001	0.000	0.000	-0.007	-0.313
Média Diferenças absolutas	0.014	0.012	0.002	0.008	0.313

Quadro 4.13 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 99824 durante o evento TR100.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.021	0.017	0.348	0.347	0.370	0.453
RSME ( $m^3/s$ )	0.036	0.030	0.681	0.680	0.713	0.936
SD ( $m^3/s$ )	2.132	2.132	2.132	2.132	2.132	2.132
NSE	1.000	1.000	0.898	0.898	0.888	0.807
Nt	58.508	69.287	2.129	2.134	1.992	1.278

Quadro 4.14 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 99824 durante o evento TR100.

Para o colector 47 a análise é feita recorrendo às figuras e quadros 4.15 e 4.16. Da análise conclui-se que os modelos dão aproximações entre muito bom e aceitável para todos os modelos, face ao modelo base, e que os modelos que apresentam maiores diferenças, entre os mesmos tipos de modelo são os modelos INFOWORKS FD com os MDT's LiDAR e UAV.

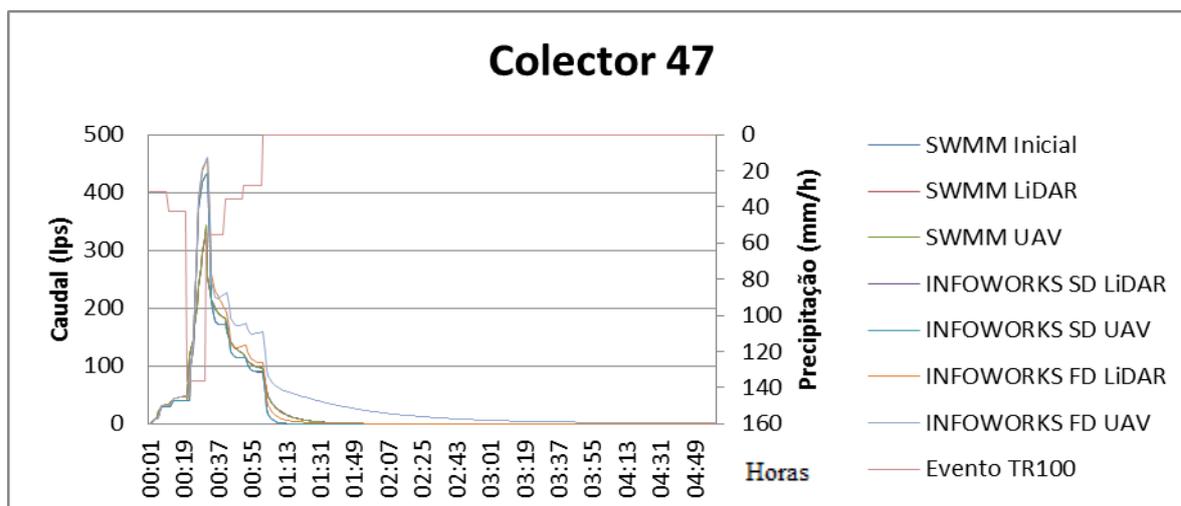


Figura 4.15 – Valores de caudal para o colector 47 para o evento TR100.

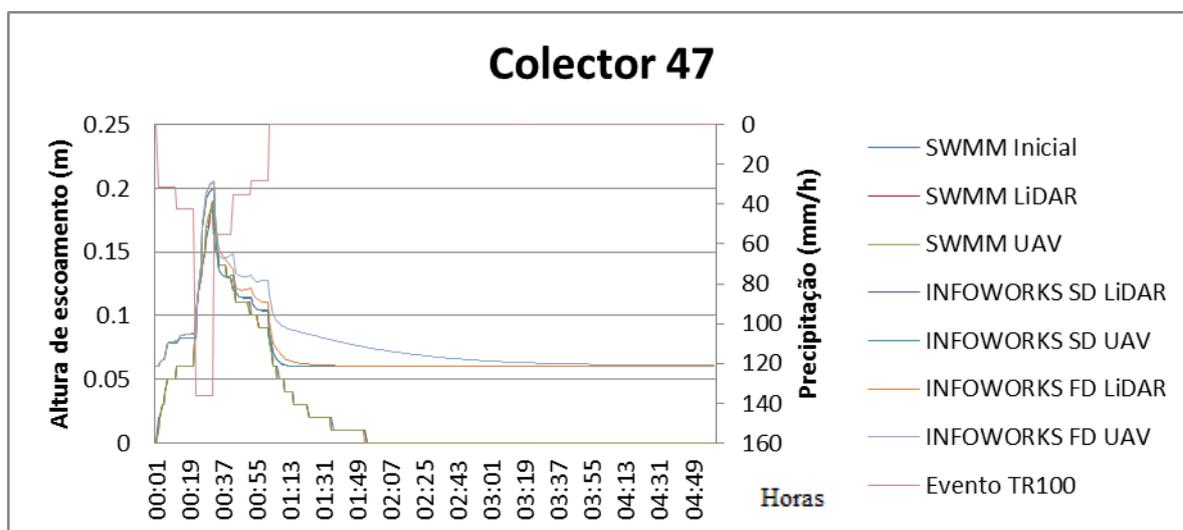


Figura 4.16 – Valores de altura de escoamento para o colector 47 para o evento TR100.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
Σ Diferenças	-0.257	-0.434	-0.176	-1.058	-247.734
Σ Diferenças absolutas	0.843	2.329	1.618	1.318	253.560
Média Diferenças	-0.001	-0.001	-0.001	-0.004	-0.826
Média Diferenças absolutas	0.003	0.008	0.005	0.004	0.845

Quadro 4.15 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volumes ( $m^3$ ) para o colector 47 durante o evento TR100.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.003	0.009	0.311	0.311	0.384	0.390
RSME ( $m^3/s$ )	0.009	0.025	1.244	1.247	1.437	1.926
SD ( $m^3/s$ )	3.937	3.937	3.937	3.937	3.937	3.937
NSE	1.000	1.000	0.900	0.900	0.867	0.761
Nt	440.206	158.974	2.166	2.157	1.740	1.044

Quadro 4.16 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 47 durante o evento TR100.

## 4.2.2 Colectores Intermédios

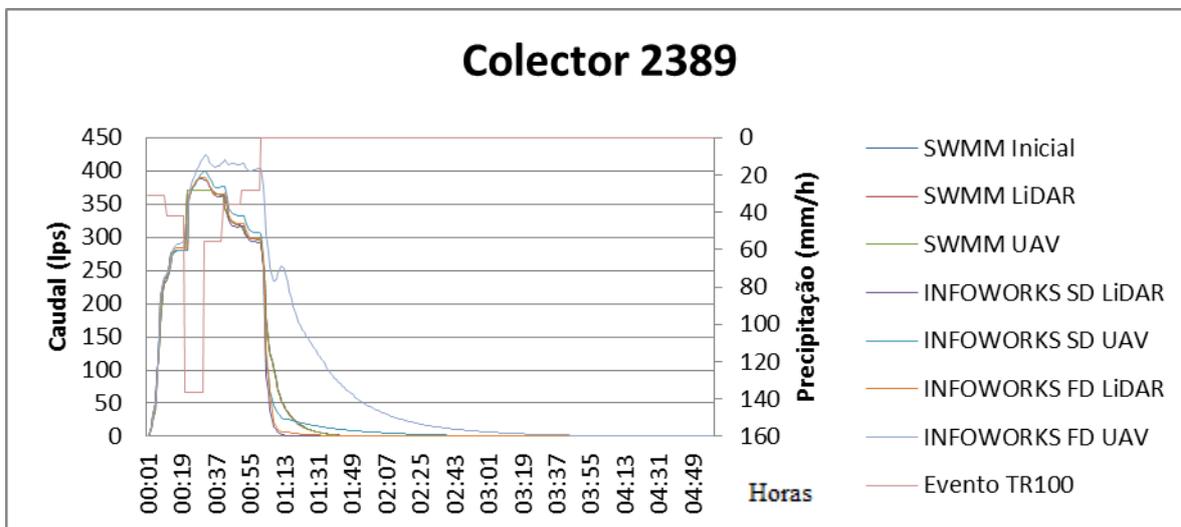


Figura 4.17 – Valores de caudal para o colector 2389 para o evento TR100.

Para o colector 2389 a análise é feita com a leitura das figuras 4.17 e 4.18 juntamente com os quadros 4.17 e 4.18. Desta análise conclui-se que onde se observam maiores diferenças entre MDT's é nos modelos INFOWORKS FD, assim como que todos os modelos apresentam semelhanças muito boas ou boas face ao ficheiro de referência.

Para o colector 376171, recorre-se às figuras 4.19 e 4.20, assim como aos quadros 4.19 e 4.20. Da observação dos mesmos, conclui-se que todos os modelos apresentam resultados semelhantes aos do ficheiro base, à excepção do modelo INFOWORKS FD com o MDT UAV.

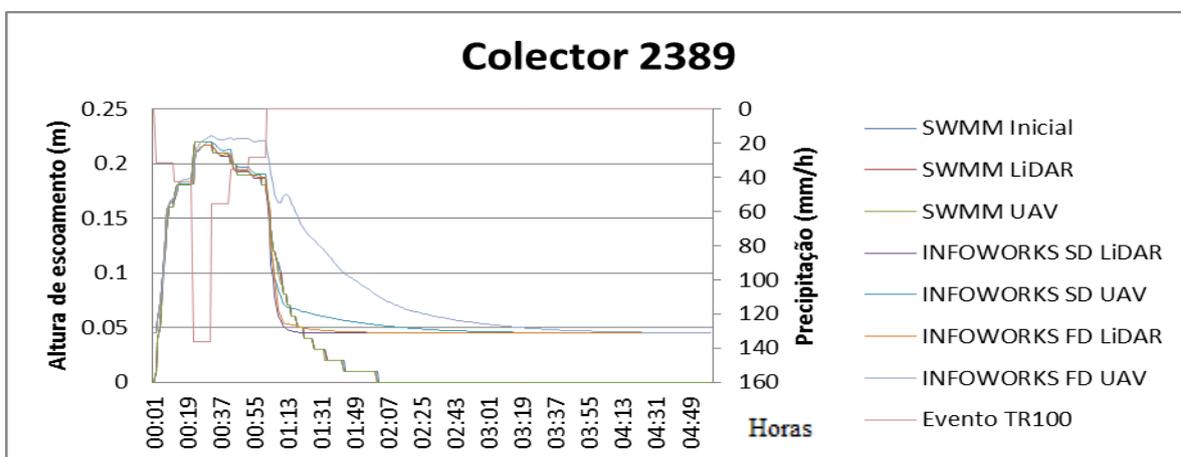


Figura 4.18 – Valores de altura de escoamento para o colector 2389 para o evento TR100.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
Σ Diferenças	0.282	1.666	1.384	-98.609	-679.299
Σ Diferenças absolutas	1.318	3.109	1.868	98.807	679.299
Média Diferenças	0.001	0.006	0.005	-0.329	-2.264
Média Diferenças absolutas	0.004	0.010	0.006	0.329	2.264

Quadro 4.17 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m<sup>3</sup>) para o colector 2389 durante o evento TR100.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.000	0.000	0.047	0.076	0.051	0.140
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.014	0.028	0.943	0.717	0.782	3.668
SD (m <sup>3</sup> /s)	8.399	8.399	8.399	8.399	8.399	8.399
NSE	1.000	1.000	0.987	0.993	0.991	0.809
Nt	581.464	295.275	7.905	10.715	9.733	1.290

Quadro 4.18 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 2389 durante o evento TR100.

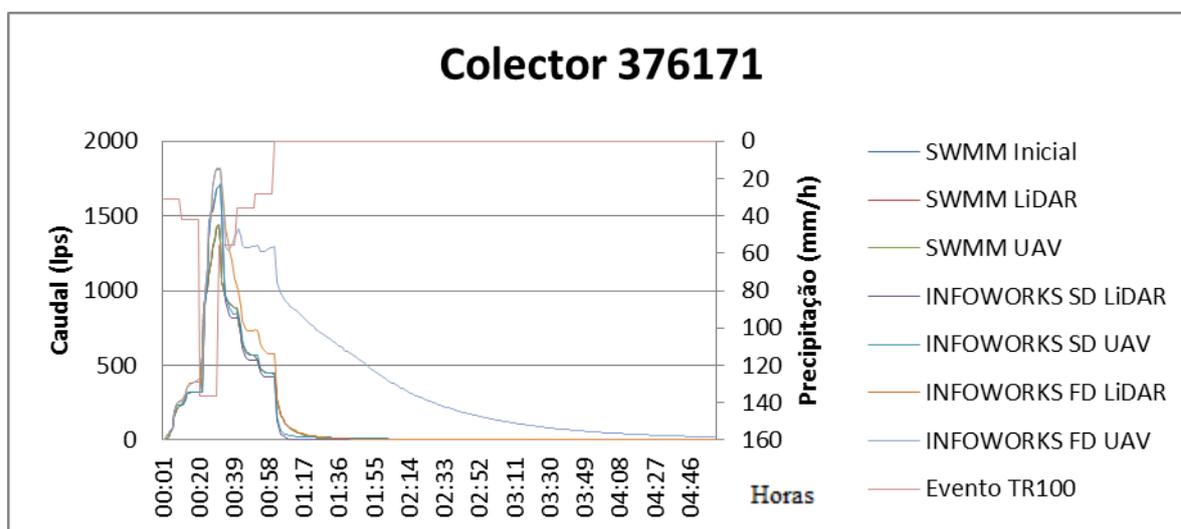


Figura 4.19 – Valores de caudal para o colector 376171 para o evento TR100.

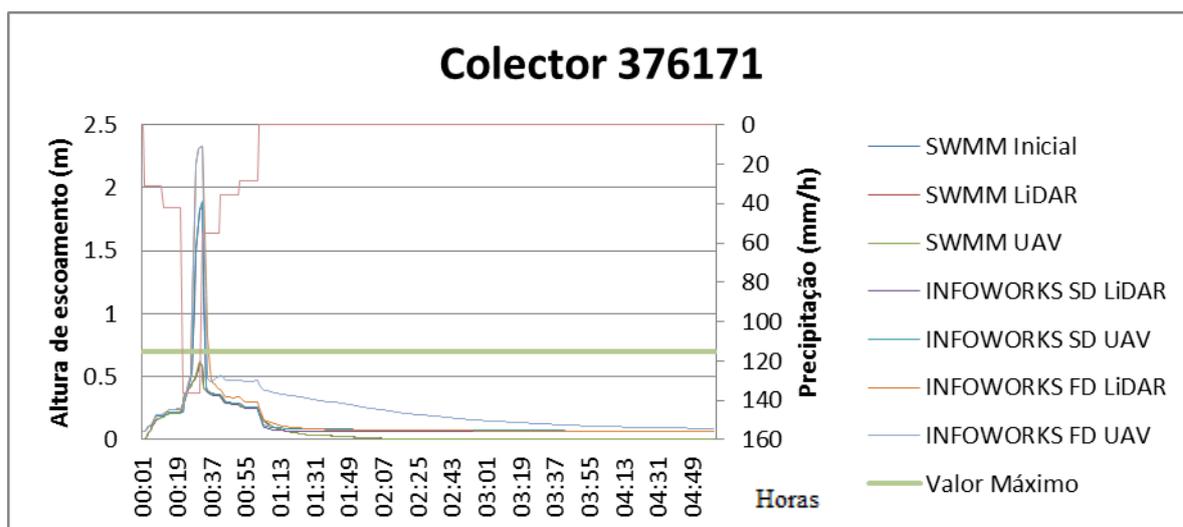


Figura 4.20 – Valores de altura de escoamento para o colector 376171 para o evento TR100.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
Σ Diferenças	-5.734	-6.482	-0.749	-147.396	-4383.729
Σ Diferenças absolutas	6.882	11.837	6.335	147.398	4423.274
Média Diferenças	-0.019	-0.022	-0.002	-0.491	-14.612
Média Diferenças absolutas	0.023	0.039	0.021	0.491	14.744

Quadro 4.19 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 376171 durante o evento TR100.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.010	0.015	0.200	0.204	0.274	0.281
RSME ( $m^3/s$ )	0.099	0.150	3.562	3.520	6.164	23.413
SD ( $m^3/s$ )	19.055	19.055	19.055	19.055	19.055	19.055
NSE	1.000	1.000	0.965	0.966	0.895	-0.510
Nt	192.329	125.624	4.350	4.414	2.091	-0.186

Quadro 4.20 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 376171 durante o evento TR100.

### 4.2.3 Colectores a Jusante

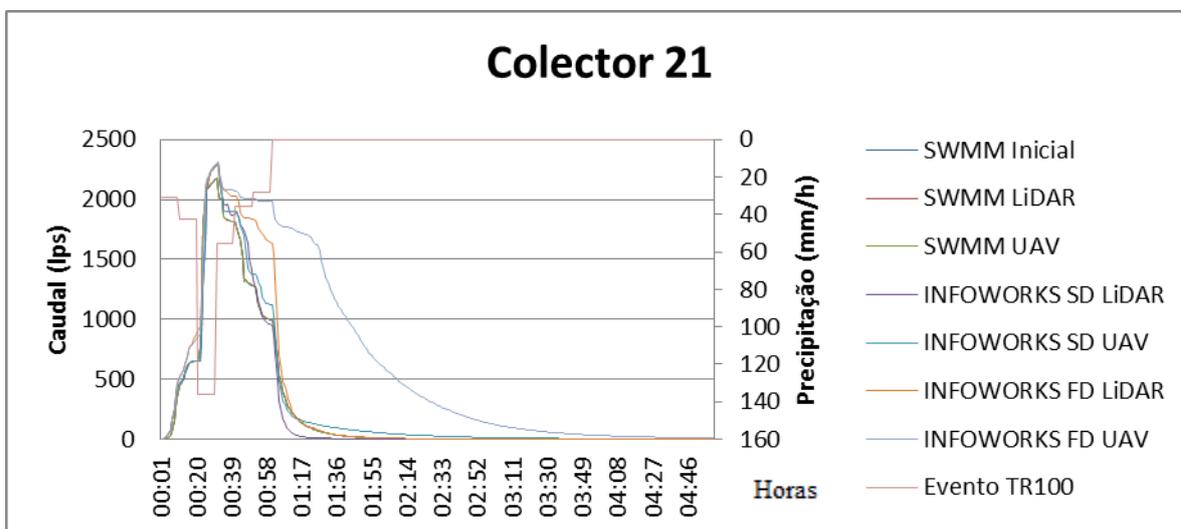


Figura 4.21 – Valores de caudal para o colector 21 para o evento TR100.

A análise do colector 21 é feita recorrendo às figuras e quadros 4.21 e 4.22. Desta análise concluímos que todas os modelos, à excepção do modelo INFOWORKS FD UAV apresentam resultados muito semelhantes ao do ficheiro base.

Concluindo com o colector 1263, através das figuras 4.23 e 4.24 e dos quadros 4.23 e 4.24, os modelos SWMM apresentam resultados muito semelhantes aos do modelo de referencia, enquanto que os modelos INFOWORKS SD e FD, apresentam resultados muito diferentes.

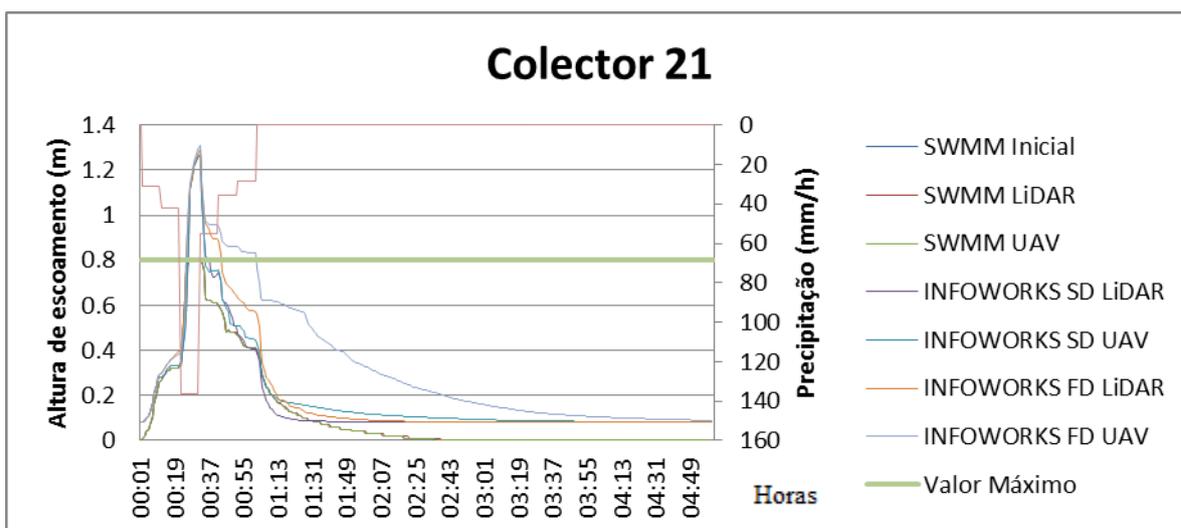


Figura 4.22 – Valores de altura de escoamento para o colector 21 para o evento TR100.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-3.997	-0.024	3.973	-563.729	-5670.672
$\Sigma$ Diferenças absolutas	13.531	8.981	15.637	645.986	5720.710
Média Diferenças	-0.013	0.000	0.013	-1.879	-18.902
Média Diferenças absolutas	0.045	0.030	0.052	2.153	19.069

Quadro 4.21 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 21 durante o evento TR100.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.002	0.000	0.053	0.052	0.058	0.063
RSME ( $m^3/s$ )	0.109	0.071	4.519	3.956	9.647	35.985
SD ( $m^3/s$ )	36.624	36.624	36.624	36.624	36.624	36.624
NSE	1.000	1.000	0.985	0.988	0.931	0.035
Nt	334.474	513.555	7.104	8.257	2.797	0.018

Quadro 4.22 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 21 durante o evento TR100.

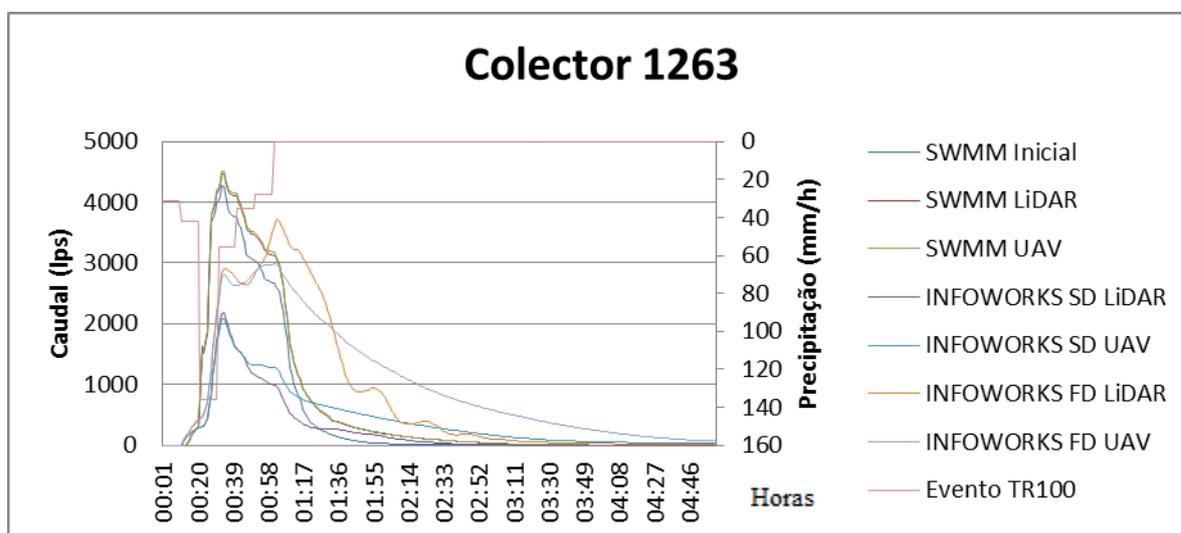


Figura 4.23 – Valores de caudal para o colector 1263 para o evento TR100.

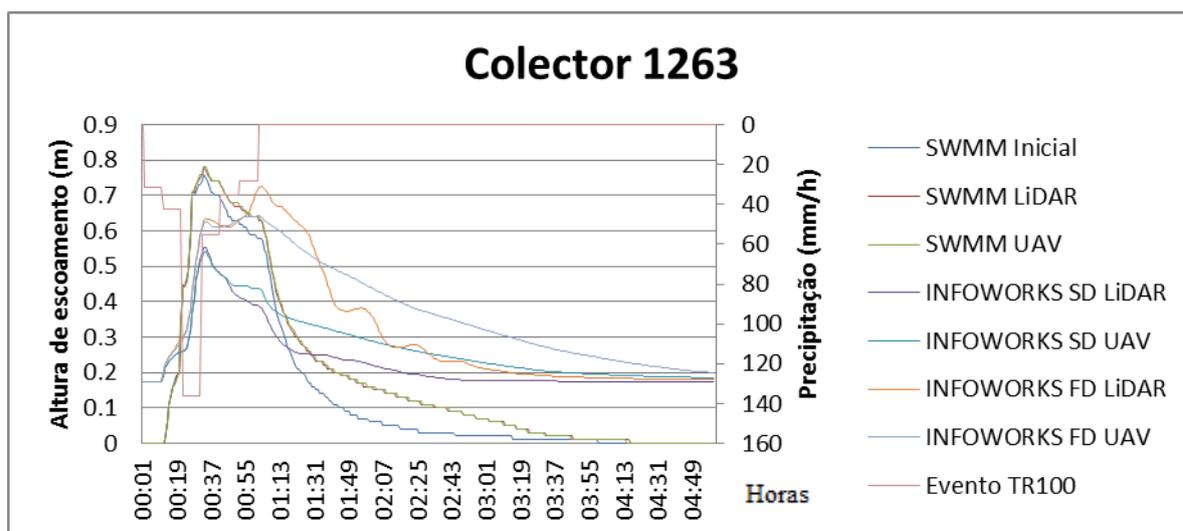


Figura 4.24 – Valores de altura de escoamento para o colector 1263 para o evento TR100.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-2041.286	-2184.023	-142.737	-2692.021	-3190.021
$\Sigma$ Diferenças absolutas	2045.688	2189.583	146.498	2780.605	5845.031
Média Diferenças	-6.804	-7.280	-0.476	-8.973	-10.633
Média Diferenças absolutas	6.819	7.299	0.488	9.269	19.483

Quadro 4.23 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 1263 durante o evento TR100.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.048	0.057	0.490	0.511	0.131	0.299
RSME ( $m^3/s$ )	10.929	11.779	44.969	44.540	51.447	54.079
SD ( $m^3/s$ )	75.886	75.886	75.886	75.886	75.886	75.886
NSE	0.979	0.976	0.649	0.656	0.540	0.492
Nt	5.943	5.443	0.688	0.704	0.475	0.403

Quadro 4.24 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 1263 durante o evento TR100.

### 4.3 Resumo dos resultados

De modo a sintetizar os resultados obtidos para os modelos apresentados nos capítulos 4.1 e 4.2, assim como nos Anexos 1 e 2, foram construídos os quadros 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28, respectivamente para os eventos 7, 10, TR10 e TR100, conforme o quadro 3.5 apresentado anteriormente.

Colector	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
21	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Insatisfatório	Insatisfatório
47	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Aceitável
1263	Muito Bom	Muito Bom	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
2389	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
99824	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom
376171	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Aceitável	Insatisfatório

Quadro 4.25 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, para o evento 7.

Da análise do quadro 4.25, conclui-se que os modelos SWMM apresentam resultados muito parecidos com o modelo SWMM com as inclinações iniciais consoante o expectável, os modelos INFOWORKS SD apresentam resultados muito parecidos ao mesmo ficheiro, exceptuando para o colector 1263, e, finalmente os modelos remetem-nos para resultados entre muito bom e aceitável para os colectores de montante, muito bom e insatisfatório para os colectores intermédios e insatisfatórios para os colectores de jusante. Do quadro 4.26 tiram-se as conclusões que os modelos SWMM, assim como os INFOWORKS SD, apresentam resultados semelhantes ao modelo com as inclinações iniciais, e os modelos INFOWORKS FD apresentam resultados maioritariamente insatisfatórios. Para o evento TR10, apresentado no quadro 4.27, observamos resultados muito parecidos com o modelo de comparação (com as inclinações topográficas locais) para os modelos SWMM. Para os modelos INFOWORKS SD apresenta resultados entre muito bom e aceitável para todos os colectores exceptuando o colector 1263. Finalizando, os resultados do modelo INFOWORKS FD LiDAR apresentam resultados entre muito bom e aceitável, aquando comparados com o ficheiro SWMM com as inclinações topográficas locais, enquanto o modelo homólogo com o MDT UAV apresenta resultados maioritariamente insatisfatórios.

Colector	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
21	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Insatisfatório	Insatisfatório
47	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Insatisfatório	Insatisfatório
1263	Bom	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Insatisfatório	Insatisfatório
2389	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom
99824	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Aceitável
376171	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Insatisfatório	Insatisfatório

Quadro 4.26 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, para o evento 10.

Colector	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
21	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Aceitável	Insatisfatório
47	Muito Bom	Muito Bom	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Insatisfatório
1263	Muito Bom	Muito Bom	Insatisfatório	Insatisfatório	Aceitável	Insatisfatório
2389	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
99824	Muito Bom	Muito Bom	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Insatisfatório
376171	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Insatisfatório

Quadro 4.27 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, para o evento TR10.

Colector	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
21	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Insatisfatório
47	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Bom	Bom	Aceitável
1263	Muito Bom	Muito Bom	Insatisfatório	Aceitável	Insatisfatório	Insatisfatório
2389	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom
99824	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
376171	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Insatisfatório

Quadro 4.28 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, para o evento TR100.

O quadro 4.28 apresenta os resultados para o evento TR100, apresentado no capítulo 4.2. O novamente, os resultados para os modelos SWMM apresenta unanimidade de resultados todos com muito bom. Os modelos INFOWORKS SD apresentam resultados entre muito bom e bom para todos os colectores à excepção do colector 1263. Finalmente, os modelos

INFOWORKS FD apresentam resultados menos parecidos com o modelo SWMM com as inclinações topográficas.

De modo a aprofundar estas diferenças com uma comparação directa entre métodos, foi feita uma análise, apresentada no Anexo 4. Destas diferenças foram construídos os quatro quadros seguintes, sendo, que, a coluna da esquerda apresenta a comparação entre os modelos INFOWORKS SD enquanto a comparação entre modelos INFOWORKS FD é feita na coluna à direita. Em ambos os casos o modelo com o MDT LiDAR é considerado o ficheiro de referência.

Colector	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
21	Muito Bom	Muito Bom
47	Muito Bom	Insatisfatório
1263	Muito Bom	Insatisfatório
2389	Muito Bom	Insatisfatório
99824	Muito Bom	Insatisfatório
376171	Muito Bom	Insatisfatório

Quadro 4.29 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, descritos no Anexo 4, para o evento 7.

Colector	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
21	Muito Bom	Muito Bom
47	Muito Bom	Aceitável
1263	Muito Bom	Insatisfatório
2389	Muito Bom	Muito Bom
99824	Muito Bom	Muito Bom
376171	Muito Bom	Insatisfatório

Quadro 4.30 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, descritos no Anexo 4, para o evento 10.

Dos quadros 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32, são analisados todos os eventos pluviométricos, e, previsivelmente quando comparados com os resultados anteriores, apresentam resultados melhores, sendo que à excepção do colector 1263 para os eventos TR10 e TR100, a comparação entre modelos INFOWORKS SD apresentam resultados com diferenças insignificantes. Já para a comparação entre os modelos INFOWORKS FD, os resultados são um pouco mais difíceis de interpretar mas quando comparados dois eventos onde apenas

muda a intensidade da chuvada, TR10 e TR100, podemos concluir que os modelos apresentam resultados tendencialmente piores, com o aumentar da intensidade da chuvada.

Colector	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
21	Muito Bom	Bom
47	Muito Bom	Muito Bom
1263	Insatisfatório	Insatisfatório
2389	Muito Bom	Muito Bom
99824	Muito Bom	Muito Bom
376171	Muito Bom	Aceitável

Quadro 4.31 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, descritos no Anexo 4, para o evento TR10.

Colector	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
21	Muito Bom	Insatisfatório
47	Muito Bom	Muito Bom
1263	Insatisfatório	Muito Bom
2389	Muito Bom	Aceitável
99824	Muito Bom	Muito Bom
376171	Muito Bom	Insatisfatório

Quadro 4.32 – Resultados dos modelos, com base nos indicadores, descritos no Anexo 4, para o evento TR100.

Resumindo os resultados apresentados no presente capítulo, podemos concluir que com o aumento da complexidade do modelo e com a diminuição da intensidade da chuvada, as diferenças são maiores entre modelos, e são maiores para modelos com MDT UAV (mais preciso) do que modelos com MDT LiDAR (menos preciso), quando comparado com o modelo SWMM com as inclinações topográficas. Contudo, quando os modelos são comparados com o homólogo com diferente MDT, as diferenças tendem a aumentar com a complexidade do modelo, assim como com a intensidade da chuvada. As comparações entre modelos 1D SWMM assim como as INFOWORKS SD, que também utilizam a entrada de água nos colectores através de sub-bacias, acabam por ser semelhantes para situações em que não haja inundação, sendo que, se esta ocorrer em pequena quantidade, as diferenças são pouco expressivas. No entanto, quando apresentam valores de inundação maior, os modelos INFOWORKS SD apresentam diferenças significativas para os modelos SWMM e diferenças pequenas entre diferentes MDT's. Os modelos INFOWORKS FD são totalmente diferentes,

sendo que a água percola directamente na malha 2D criada sob a superfície, e , como se pode interpretar dos últimos dois quadros, quanto maior a intensidade da chuvada, maiores as diferenças registadas entre modelos para os MDT LiDAR e UAV.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A água tem uma enorme importância na vida humana. Contudo, poderá ter efeitos profundamente negativos na actividade humana, e, atendendo às alterações climáticas que se têm vindo a observar, o seu encaminhamento para fora de zonas urbanas em alturas de elevada precipitação constitui um problema com uma importância crescente, fazendo com que uma correcta previsão do comportamento do escoamento superficial acoplado ao sistema de drenagem tenha uma grande importância.

Apresentam-se seguidamente, de forma breve, as principais conclusões atingidas em cada um dos capítulos da dissertação.

No segundo capítulo, é apresentado o estado da arte, cobrindo a alteração da utilização do solo em meios urbanos, as suas implicações no escoamento superficial, a evolução na modelação de hidráulica urbana, a evolução das formas de obtenção de modelos digitais do terreno, e finalizando com os vários métodos de fusão de modelos digitais do terreno com diferentes resoluções. A principal conclusão exposta neste capítulo é que o tipo de informação obtida com o auxílio dos *drones* pode ser muito facilmente integrada nos modelos e métodos tradicionais de escoamento urbano.

No capítulo 3, é apresentada inicialmente a bacia de Wartegg, evidenciando-se a localização e a extensão dos vários colectores estudados, seguindo-se uma secção de análise e separação de eventos pluviométricos, que apresenta alguns métodos de separação e os eventos separados. Na secção seguinte, é feita uma análise dos modelos digitais do terreno para construção dos modelos 1D (SWMM), usando o programa ArcGIS, uma vez que estes modelos hidráulicos utilizam como dado de entrada a inclinação média de cada uma das sub-bacias que formam a bacia investigada. Posteriormente, é explicado o que é feito nas análises dinâmicas 1D, utilizando o programa SWMM, e 1D/2D, utilizando o programa INFOWORK. Finalmente, são apresentados os parâmetros de avaliação de desempenho de modelos hidrológicos, que posteriormente são fundamentais na interpretação de resultados obtidos dos diferentes modelos. Como principal conclusão, deve-se realçar a inexistência de qualquer resultado ou particularidade surpreendente, seja eles resultado da bacia estudada ou do tipo de dados utilizados naqueles programas.

No quarto capítulo, são apresentados e comentados os resultados obtidos com os vários modelos utilizados, um resumo dos quais pode ser encontrado no final da secção 4.3. Duas importantes conclusões de carácter geral é que com o aumento da complexidade do modelo e com a diminuição da intensidade da chuvada, as diferenças de resultados entre modelos tendem a agravar-se, e as diferenças de resultados são maiores para modelos com MDT UAV, que é mais preciso, do que modelos com MDT LiDAR, que apresenta menor precisão. Contudo quando os modelos do mesmo tipo são comparados, as diferenças aumentam com a complexidade do modelo, assim como com a intensidade do evento pluviométrico. Retiramos ainda a importante conclusão que os colectores a montante apresentam resultados mais parecidos entre os vários modelos e, que quanto mais para jusante, apresentam resultados com maiores diferenças. Estas diferenças em muito se devem a colectores a montante dos mesmos entrarem em carga, fazendo com que os picos de caudal e os seus volumes sejam diferentes de modelo para modelo. Deste ponto de vista, não é possível afirmar que as diferenças obtidas são, de facto, mais correctas, pelo que é impossível prever com total precisão algumas variáveis destes modelos, como, entre outras, a intensidade de precipitação em todos os pontos ou possíveis patologias que os sistemas de drenagem apresentem.

Finalmente, este trabalho foi muito importante em termos do desenvolvimento científico, técnico e pessoal do autor, sendo que o domínio dos vários programas aqui utilizados ArcGIS, SWMM, INFOWORKS e EXCEL, constituem uma mais-valia para a formação de um engenheiro da área da hidráulica e/ou hidrologia.

Decorrente do que se escreveu acima, avançam-se três propostas para trabalhos futuros:

1. Por um lado, seria interessante efetuar um estudo semelhante para uma bacia para a qual existam ou seja possível determinar resultados experimentais, para confrontar directamente estes resultados com os obtidos pelos vários modelos numéricos;
2. É também conveniente realizar uma análise de escoamento superficial para diferentes MDT's em bacias de diferentes dimensões;
3. Finalmente, seria benéfico fazer um trabalho semelhante ao apresentado, utilizando as células do MDT UAV de cinco por cinco centímetros, em vez dos cinco por cinco decímetros utilizados no presente trabalho – todavia, como a quantidade de informação neste caso seria cem vezes maior, poderia tornar-se necessário um computador com muito grande capacidade de processamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baghdadi, N., Cavelier, S., Chiles, J.-P., Bourguine, B., Toutin, T., King, C., Daniels, P., Perrin, J., Truffert, C. (2005). "Merging of Airbone Elevation Data and Radarsat Data to Develop a Digital Elevation Model". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, Issue 1, pp. 141-166.
- Balme, M., Vischel, T., Lebel, T., Peugeot, C., Galle, S. (2006). "Assessing the Water Balance in the Sahel: Impact of Small Scale Rainfall Variability on Runoff. Part 1: Rainfall Variability Analysis". *Journal of Hydrology*, Vol. 331, Issues 1-2, pp. 336-348.
- Bidin, K., Chappell, N.A. (2006). "Characteristics of Rain Events at an Inland Locality in Northeastern Borneo, Malaysia". *Hydrological Processes*, Vol. 20, Issue 18, pp. 3835-3850.
- Bourguine, B., Baghdadi, N., Hosford, S., Daniels, P. (2004). "Generation of a Ground-Level DEM in a Dense Equatorial Forest Zone by Merging Airborne Laser Data and a Top-of-Canopy DEM". *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, Issue 6, pp. 913-926.
- Butler, D., Davies, J.W. (2011). "Urban Drainage" (3ª edição). Spon Press, Londres.
- Carmo, J.S.A. (2004). "Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente". Imprensa da Universidade, Coimbra.
- Cecílio, R., Martinez, M., Pruski, F., Silva, D., Ataíde, W. (2007). "Substituição dos Parâmetros do Modelo de Green-Ampt-Mein-Larson para Estimativa de Infiltração em Alguns Solos do Brasil". *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Vol. 31, N.º 5, pp. 1141-1151.
- Chocat, B., Krebs, P., Marsalek, J., Rauch, W., Schilling, W. (2001). "Urban Drainage Redefined: From Stormwater Removal to Integrated management". *Water Science and Technology*, Vol. 43, Issue 5, pp.61-68.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). "Applied Hydrology". McGraw-Hill, Nova Iorque.

- Cunha, M.C. (2006). “Apontamentos da Disciplina de Gestão Integrada de Recursos Hídricos”. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
- Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Águas e de Drenagem de Águas Residuais (1995), Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de Agosto, 1995.
- Deletic, A., Dotto, C.B.S., McCarthy, D.T., Kleidorfer, M., Freni, G., Mannina, G., Uhl, M., Henrichs, M., Fletcher, T.D., Rauch, W., Bertrand-Krajewski, J.L., Tait, S. (2012). “Assessing Uncertainties in Urban Drainage Models”. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Vols. 42-44*, pp. 3-10.
- Damron, J.J. (2002). “Fusing LIDAR and IFSAR DEMs: A Seven-Step Methodology”. *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> ESRI International Conference*, San Diego, California.
- Department of the Environment National Water Council Standing Technical Committee (1981) “Design and Analysis of Urban Storm Drainage. The Wallingford Procedure. Volume 1: Principles, Methods and Practice”. *Standing Technical Committee Report No. 28*, Department of the Environment, Reino Unido.
- Fornis R.L., Vermeulen, H.R., Niewenhuis, J.D. (2005). “Kinetic Energy–Rainfall Intensity Relationship for Central Cebu, Philippines for Soil Erosion Studies”. *Journal of Hydrology*, Vol. 300, Issues 1-4, pp. 20-32.
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brézdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kriauciuniene, J., Kundzewicz, Z.W., Lang, M., Llasat, M.C., Macdonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R.A.P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blöschl, G. (2014). “Understanding Flood Regime Changes in Europe: A State-of-the-Art Assessment”. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 18, Issue 7, pp. 2735-2772.
- Hickey, R. (2000). “Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS”. *Cartography*, Vol. 29, Issue 1, pp. 1-8.
- Horton, R.E. (1940). “An Approach Towards a Physical Interpretation of Infiltration Capacity”. *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol. 5, pp. 399-417.

- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., Kanae, S. (2013). "Global Flood Risk under Climate Change". *Nature Climate Change*, Vol. 3, Issue 9, pp. 816-821.
- Joo, J., Lee, J., Kim, J.H., Jun, H., Jo, D. (2014). "Inter-Event Time Definition Setting Procedure for Urban Drainage Systems". *Water*, Vol. 6, Issue 1, pp. 45-58.
- Katzil, Y., Doytsher, Y. (2005). "Spatial Rubber Sheeting of DTMs". *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Geomatic Week Conference*, Barcelona.
- Küng, O., Strecha, C., Beyeler, A., Zufferey, J.-C., Floreano, D., Fua, P., Gervais, F. (2011). "The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery". *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-1/C22, pp. 125-130.
- Kidd, C.H.R., Lowring, M.J. (1979). "The Wallingford Urban Sub-Catchment Model". Report No. 60, Institute of Hydrology.
- Lança, R.M.M., Rodrigues, A.C. (2000). "Apresentação de um Modelo Distribuído de Precipitação/Escoamento Superficial". 5<sup>o</sup> Congresso da Água: A Água e o Desenvolvimento Sustentável – Desafios para o Novo Século.
- Leitão, J. P. (2009). "Enhancement of Digital Elevation Models and Overland Flow Path Delineation Methods for Advanced Urban Flow Modelling". Tese de Doutorado, Imperial College London, Londres.
- Leitão, J.P., Moy de Vitry, M., Scheidegger, A., Rieckermann, J. (2016). "Assessing the Quality of Digital Elevation Models Obtained from Mini Unmanned Aerial Vehicles for Overland Flow Modelling in Urban Areas". *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 20, Issue 4, 1637-1653.
- Leitão, J.P., Almeida, M.C., Simões, N.E., Martins, A. (2013). "Methodology for Qualitative Urban Flooding Risk Assessment". *Water Science and Technology*, Vol. 68, Issue 4, pp. 829-838.
- Leitão, J.P., Prodanovic, D., Maksimovic, C. (2016). "Improving Merge Methods for Grid-Based Digital Elevation Models". *Computers & Geosciences*, Vol. 88, pp. 115-131.
- Lencastre, A., Franco, F.M. (2003). "Lições de Hidrologia". Universidade Nova de Lisboa.

- Lima, J.P. (Coord.) (2013). “Hidrologia Urbana – Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais Urbanas”. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) e Universidade de Coimbra, Lisboa.
- Maia, A. (2001). “Comparação de Modelos Geradores de Função de Produção: Um Estudo de Caso para a Bacia de Juataba”. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Maksimovic, C., Prodanovic, D., Boonya-Aroonnet, S., Leitão, J.P., Djordjevic, S., Allit, R. (2009). “Overland Flow and Pathway Analysis for Modelling of Urban Pluvial Flooding”. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 47, Issue 4, pp. 512-523.
- Pato, J.H. (2011). “História das Políticas Públicas de Abastecimento e Saneamento de Águas em Portugal”. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), Lisboa.
- Ravanbakhsh, M., Fraser, C.S. (2013). “A Comparative Study of DEM Registration Approaches”. *Journal of Spatial Science*, Vol. 58, Issue 1, pp. 79-89.
- Rojas, R., Feyen, L., Watkiss, P. (2013). “Climate Change and River Floods in the European Union: Socio-Economic Consequences and the Costs and Benefits of Adaptation”. *Global Environmental Change*, Vol. 23, Issue 6, pp. 1737-1751.
- Ritter, A., Muñoz-Carpena, R. (2013). “Predictive Ability of Hydrological Models: Objective Assessment of Goodness-of-Fit with Statistical Significance”. *Journal of Hydrology*, Vol. 480, Issue 1, pp. 33-45.
- Ruiz, J.J., Ariza, F.J., Ureña, M.A., Blásquez, E.B. (2011). “Digital Map Conflation: A Review of the Process and a Proposal for Classification”. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 25, Issue 9, pp. 1439-1466.
- Sá Marques, J.A., Sousa, J.J.O. (2011). “Hidráulica Urbana – Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais” (3ª edição). Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Saunders, W. (1999). “Preparation of DEMs for Use in Environmental Modeling Analysis”. *ESRI User Conference*, San Diego, pp. 24-30.
- Simões, N.E. (2012). “Urban Pluvial Flood Forecasting”. Tese de Doutoramento, Imperial College London, Londres.

- Simões, N.E., Leitão, J.P., Maksimovic, C., Sá Marques, A., Pina, R. (2010). “Sensitivity Analysis of Surface Runoff Generation in Urban Flood Forecasting”. *Water Science and Technology*, Vol. 61, Issue 10, pp. 2595-2601.
- Sousa Pinto, N.L., Holtz, A.C.T., Martins, J.A., Gomide, F.L.S. (1990). “Hidrologia Básica”. Edgard Blücher, São Paulo.
- Storm Water Management Model User’s Manual – Version 5.1 (2015). Environmental Protection Agency, EUA.
- Stravoula, P. (2008). “Modelling and Attenuation of Torrent Stream Urban Floods caused by Forest Fires”. Dissertação de Mestrado, Imperial College London, Londres.
- Tokarczyk, P., Leitão J. P., Rieckermann, J., Schindler, K., Blumensaat, F. (2015). “High-Quality Observation of Surface Imperviousness for Urban Runoff Modelling Using UAV Imagery”. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, Issue 10, pp. 4215-4228.
- Vernimmen, R.R.E., Bruijnzeel, L.A., Romdoni, A., Proctor, J. (2007). “Rainfall Interception in Three Contrasting Lowland Rain Forest Types in Central Kalimantan, Indonesia”. *Journal of Hydrology*, Vol. 340, Issues 3-4, pp. 217-232.
- Warriner, T., Mandlbürger, G. (2005). “Generating a New High Resolution DTM Product from Various Data Sources”. *Proceedings of the 50<sup>th</sup> Photogrammetric Week*, Estugarda, pp. 197-206.
- Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.) (2000). “Terrain Analysis – Principles and Applications”. Wiley, Nova Iorque.
- Yen, B.C. (1986). “Hydraulics of Sewers”. *Advances in Hydrosience*, Vol. 14, pp. 1-122, Academic Press, Orlando, Florida.

## ANEXO 1 MODELOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

### A1.1 Armazenamento em Depressões

O armazenamento em depressões contabiliza a água que fica retida em depressões do terreno, não participando no escoamento superficial e que posteriormente se evaporará ou se infiltrará no solo. Kidd e Lowring (1979) identificaram os principais factores que afectam a magnitude deste fenómeno como sendo a superfície do terreno, a sua inclinação e o período de retorno. O armazenamento pode ser representado por

$$d = \frac{k_1}{\sqrt{s}} \quad (\text{A1.1})$$

em que,

$k_1$  – é um coeficiente, em mm, que depende do tipo de superfície (0.28mm para permeáveis e 0.07mm para impermeáveis) expresso em mm

$s$  – é a declive do solo

### A1.2 Infiltração no Solo

A infiltração representa a capacidade de precipitação passar pela camada superior do solo e percolar no subsolo. Este processo depende de vários factores como o tipo de solo, estrutura e compactação, nível freático, saturação inicial, entre outros, o que o tornam muito difícil de modelar. Horton (1940) propôs a seguinte expressão empírica para representar a variação temporal da infiltração nos solos

$$f_t = f_c + (f_o - f_c)e^{-k_2 t} \quad (\text{A1.2})$$

em que,

$f_t$  – taxa de infiltração no momento  $t$

$f_c$  – taxa de infiltração final

$f_o$  – taxa de infiltração inicial

$k_2$  – constante de enfraquecimento dependente das características do solo

Da análise da equação acima apresentada, concluímos que para um valor de  $t=0$ , o solo apresenta uma capacidade de infiltração máxima  $f=f_o$  enquanto que para  $t=\infty$ , o solo apresenta uma capacidade mínima de infiltração  $f=f_c$ . Analisando a equação concluímos também que apenas poderá ser válida para intensidades de precipitação superiores a  $f_c$ .

Ainda da equação apresentada por Horton, concluímos que a altura de água infiltrada no solo no intervalo de tempo  $[0,t]$  é dada por

$$F = \int_0^t f_t \partial t = f_c t \frac{f_o - f_c}{k_2} (e^{-k_2 t} - 1) \quad (\text{A1.3})$$

Com base na integração da equação diferencial da difusibilidade vertical, foi apresentada uma expressão menos empírica para o cálculo da infiltração

$$f_{(t)} = \frac{1}{2} s t^{\frac{1}{2}} + A \quad (\text{A1.4})$$

integrado em  $[0,t]$  obtém-se,

$$F_{(t)} = s t^{\frac{3}{2}} + A t \quad (\text{A1.5})$$

Com,

$f$  – taxa de infiltração no solo no momento  $t$  (mm/h)

$s$  – coeficiente experimental

$A$  – constante cujo valor poderá ser considerado ao da condutividade hidráulica superficial para  $t = t_f$

O modelo de Green-Ampt-Mein-Larson resulta da lei de Darcy e da equação da continuidade, sendo aplicado com regularidade em modelos de drenagem (Chow et al, 1988),

$$F(t) - \psi(\theta_s - \theta_i) \ln \left( 1 + \frac{F(t)}{\psi(\theta_s - \theta_i)} \right) = K t \quad (\text{A1.6})$$

onde,

$\Psi$  – sucção por capilaridade

$\theta_s$  – teor de humidade em condições de saturação

$\theta_i$  – teor de humidade em condições iniciais

$K$  – condutividade hidráulica

$t$  – tempo

No entanto, a expressão acima apresentada é implícita, pelo que, será necessário recorrer a um método numérico para a sua resolução, por exemplo, o Método de Newton-Raphson. Após o cálculo do valor infiltrado no solo  $F$ , a taxa de infiltração é obtido através da expressão.

$$f(t) = K \left( \frac{\psi(\theta_s - \theta_i)}{F(t)} \right) + 1 \quad (\text{A1.7})$$

Algumas limitações foram apontadas a este modelo (Cecílio et al., 2007), nomeadamente quanto à precisão dos métodos utilizados para a medição dos valores de sucção por capilaridade e condutividade hidráulica, uma vez que serão dados de entrada para o modelo.

### A1.3 Evapotranspiração

A evapotranspiração é um processo contínuo, que engloba vaporização da água de plantas e de corpos de água. Para uma percepção da pequena magnitude deste processo, o seu potencial diário é de cerca de 2 a 3 mm por dia na zona do Reino Unido, fazendo com que geralmente não seja contabilizado.

### A1.4 Coeficiente de Escoamento

As perdas contínuas são um processo importante na quantificação da quantidade de precipitação total que se transforma em precipitação útil, nomeadamente em bacias de grandes dimensões. O coeficiente de escoamento,  $C$ , é uma simplificação comum, mas geralmente utilizado após as perdas iniciais terem sido deduzidas para a transformação de precipitação total em precipitação útil. Este coeficiente adimensional é definido por

$$C = \frac{p_u}{p_{tot}} \quad (A1.8)$$

em que,

$p_u$  - intensidade de precipitação útil

$p_{tot}$  – intensidade de precipitação total

C assume valores entre 0.70 e 0.95 para superfícies impermeáveis e 0.05 e 0.35 para superfícies permeáveis.

Em bacias não homogêneas, poderá ser necessário obter um coeficiente de escoamento médio, dividindo a bacia em  $i$  zonas, supostas homogêneas, e ponderado o coeficiente de escoamento  $C_i$  de cada uma das zonas pela respectiva área  $A_i$ :

$$C = \frac{\sum_{i=1}^j C_i * A_i}{\sum_{i=1}^j A_i} \quad (A1.9)$$

No Reino Unido, para áreas urbanas, foi desenvolvido o chamado Wallingford Procedure (DoE/NWC, 1983). Baseia-se numa equação de regressão obtida através dos dados de 17 bacias urbanas em 510 eventos pluviométricos:

$$PR = 0.829 PIMP + 25.0 SOIL + 0.078 UCWI - 20.7 \text{ ,para } PR > 0.4 PIMP \quad (A1.10)$$

$$PR = 0.4 PIMP \text{ ,para } PR \leq 0.4 PIMP$$

Onde,

$$PR = C * 100 \quad (A1.11)$$

PIMP – Percentagem de área impermeável da bacia

SOIL – índice de solos para o RU

UCWI – índice de humidade da bacia urbana

### A1.5 Método Racional

O método com maior utilização para modelar caudais de ponta de cheia, é o método racional, apresentando consistência e solidez nos resultados. A racionalidade do método baseia-se em admitir que o caudal máximo da secção mais a jusante de uma bacia ocorre quando toda a bacia está a contribuir para essa secção. De acordo com este método o caudal pode ser estimado por (Butler e Davies, 2011),

$$Q = CiA \quad (A1.12)$$

Onde

Q – Caudal

C – coeficiente de escoamento

i – intensidade de precipitação

A - área da bacia

Contudo, verifica-se experimentalmente que, nem sempre os caudais de ponta ocorrem quando o tempo de concentração das mesmas é atingido e que nem sempre chuvadas com um certo período de recorrência originam caudais com igual período de recorrência.

### A1.6 Método do Hidrograma Unitário

O método do hidrograma unitário, é um conceito com particular aplicabilidade em hidrologia urbana. Segundo Lencastre e Franco (2003) este modelo baseia-se em postulados relativamente ao escoamento superficial directo

- (i) Postulado de proporcionalidade – hidrogramas provenientes de chuvadas com igual duração, mas diferentes alturas de precipitação, terão ordenadas proporcionais às respectivas alturas de precipitação.
- (ii) Postulado de sobreposição – O hidrograma proveniente de uma sucessão de eventos de precipitação terá as ordenadas iguais à soma das ordenadas dos hidrogramas de cada evento considerado isoladamente.

É importante referir que estas premissas apenas serão válidas para chuvadas cuja precipitação útil tenha intensidade constante no tempo e seja uniformemente distribuída pela área da bacia.

### A1.7 Método Curva Número

Um outro método, desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS) e baseado na teoria do hidrograma unitário é o método curva número. Este método apresenta uma grande aplicabilidade para pequenas bacias situadas no tecido urbano. Este método é dado por (Maia, 2001);

$$P_u = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S_{mr}} \quad (\text{A1.13})$$

No qual,

$P_u$  – precipitação útil

$P$  – precipitação total

$S_{mr}$  – capacidade máxima de retenção

$I_a$  – abstracção inicial

A capacidade máxima de retenção traduz a aptidão da bacia para armazenar água que não participará no escoamento superficial, enquanto que a abstracção inicial descreve as perdas antes da ocorrência do escoamento superficial. Estudos realizados pelo SCS apontam para a seguinte relação entre a abstracção inicial e a capacidade máxima de retenção:

$$I_a = 0.2S_{mr} \quad (\text{A1.14})$$

Substituindo na equação de cima, vem

$$P_u = \frac{(P - 0.2S_{mr})^2}{P + 0.8S_{mr}} \quad (\text{A1.15})$$

Esta, bem como a equação (14) é apenas válida para valores de precipitação total,  $P$ , superiores ou iguais aos da abstracção inicial,  $I_a$ , caso contrário será  $P_u = 0$ .

### A1.8 Modelo de Reservatório

Finalizando, é de referir o modelo de reservatório e as suas variantes. Estes modelos admitem que a resposta da bacia é quase imediata, apenas considerando a lei de conservação da massa

e desprezando a lei de conservação da quantidade de movimento. Neste modelo, as bacias são concebidas como reservatórios nos quais são realizados balanços hídricos.

Pode mostrar-se que

$$\frac{\partial S}{\partial t} = I - O \quad (\text{A1.16})$$

S - volume armazenado na bacia

I – entrada no reservatório

O – saída de água do reservatório

Se o caudal de saída for considerado constante, a equação anterior é apenas um balanço mássico. Em casos mais complexos esta equação diferencial pode ser resolvida recorrendo a técnicas como por exemplo o Método Plus Modificado.

### A1.9 Modelo de Muskingum

O modelo de Muskingum é igualmente um modelo linear em que K e X são constantes empíricas calculadas iterativamente. O caudal que sai do reservatório é dado por,

$$O_{(t+1)} = C_1 I_{(t+1)} + C_2 I_{(t)} + C_3 I_{(t)} \quad (\text{A1.17})$$

Em que,

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (\text{A1.18})$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (\text{A1.19})$$

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (\text{A1.20})$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1 \quad (\text{A1.21})$$

### A1.10 Modelo do Reservatório Não Linear

Os modelos de reservatório não linear exprimem o armazenamento como função não linear do escoamento a jusante, na forma

$$S = KO_w^m \quad (\text{A1.22})$$

em que,

$$O_w^m = XI + (1 - X)O \quad (\text{A1.23})$$

e  $m$  é um expoente.

O caudal a jusante pode ser calculado através de uma equação não linear, resolvida iterativamente

$$O_{(t+1)}\Delta t + 2KO_w^m_{(t+1)} = (2I_{(t+1)} + 2I_{(t)} - O_{(t)})\Delta t + 2KO_w^m_{(t)} \quad (\text{A1.24})$$

De referir que para  $m=1$  a expressão fica semelhante à apresentada por Muskingum.

## ANEXO 2 RESULTADOS PARA O EVENTO PLUVIOMÉTRICO 10

### A2.1 Evento 10

O evento 10 é significativamente mais curto que o apresentado no capítulo 4.1, com apenas 392 minutos. Inicia-se dia 31-08-2014 às 13:00, terminando às 19:31 do mesmo dia, tendo como valor de intensidade máxima 13.8 mm/h, um valor baixo quando comparado com o evento 7.

#### A2.1.1 Colectores a Montante

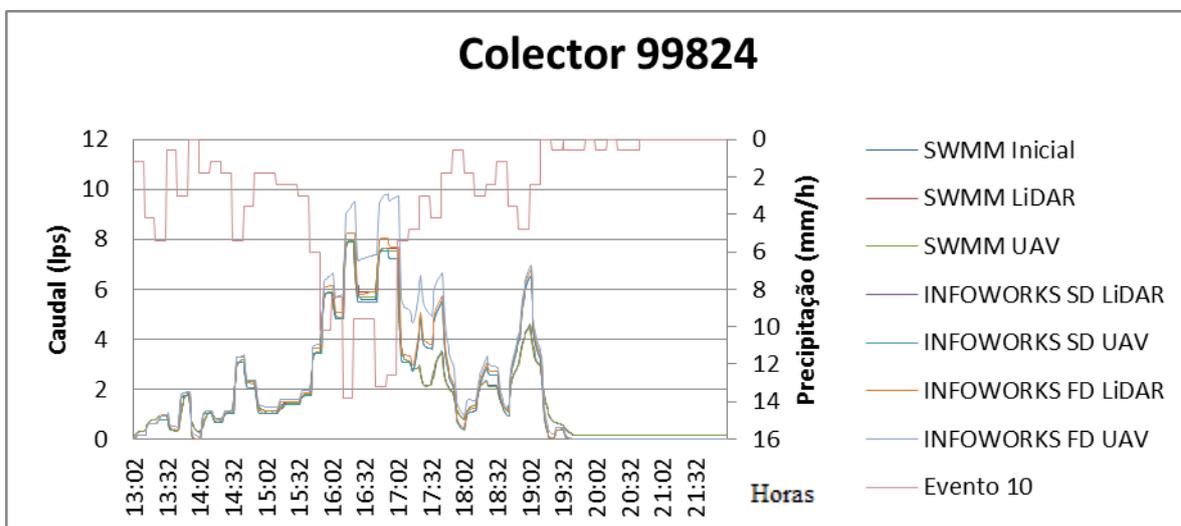


Figura A2.1 – Valores de caudal para o colector 99824 para o evento 10.

A análise para o colector 99824 é realizada recorrendo às figuras A2.1 e A2.2 e ao quadro A2.1, e, conclui-se que, à semelhança do que ocorre para o mesmo colector no evento anterior, onde se apresentam maiores diferenças, em termos de caudais, é para os modelo hidráulico FD de INFOWORKS.

Os resultados dos modelos são bastante semelhantes entre si, como se depreende do quadro A2.2.

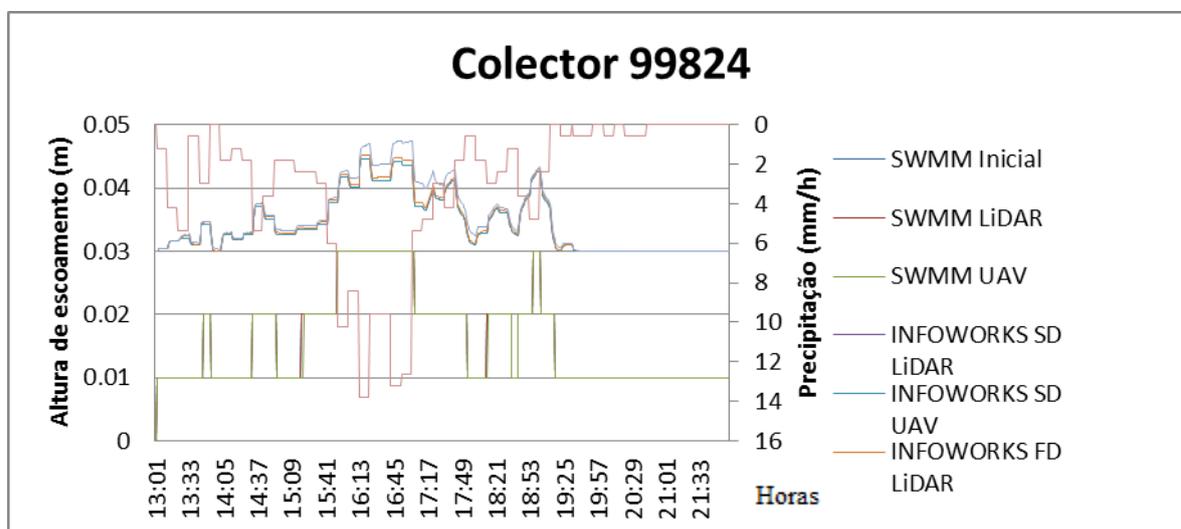


Figura A2.2 – Valores de altura de escoamento para o colector 99824 para o evento 10.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-0.158	0.108	0.266	-0.011	-11.218
$\Sigma$ Diferenças absolutas	0.725	0.589	0.365	0.033	11.229
Média Diferenças	-2.93E-04	2.00E-04	4.93E-04	-2.11E-05	-2.08E-02
Média Diferenças absolutas	1.34E-03	1.09E-03	6.77E-04	6.11E-05	2.08E-02

Quadro A2.1 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 99824 durante o evento 10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.000	0.000	0.009	0.009	0.038	0.232
RSME ( $m^3/s$ )	0.004	0.002	0.031	0.031	0.035	0.064
SD ( $m^3/s$ )	0.132	0.132	0.132	0.132	0.132	0.132
NSE	0.999	1.000	0.944	0.943	0.928	0.768
Nt	35.969	51.807	3.217	3.202	2.727	1.075

Quadro A2.2 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 99824 durante o evento 10.

Com a leitura das figuras A2.3 e A2.4, assim como do quadro A2.3 para avaliar os valores do colector 47, conclui-se que as maiores diferenças se encontram nos modelos FD do INFOWORKS entre os Modelos Digitais Terreno de LiDAR e UAV. Do quadro A2.4 conclui-se que os resultados entre os modelos FD do INFOWORKS apresentam resultados muito diferentes do modelo com as inclinações iniciais.

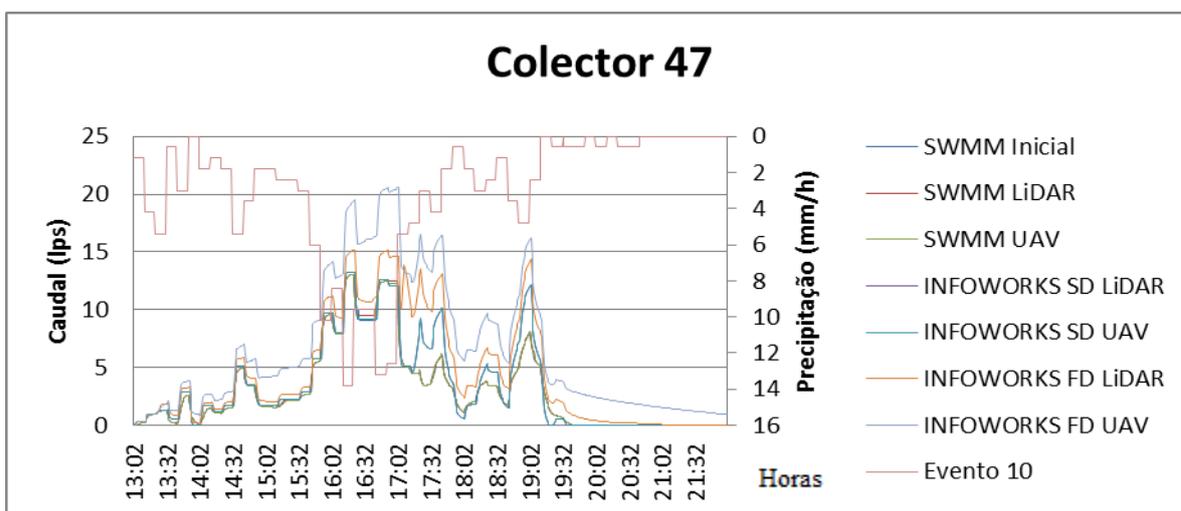


Figura A2.3 – Valores de caudal para o colector 47 para o evento 10.

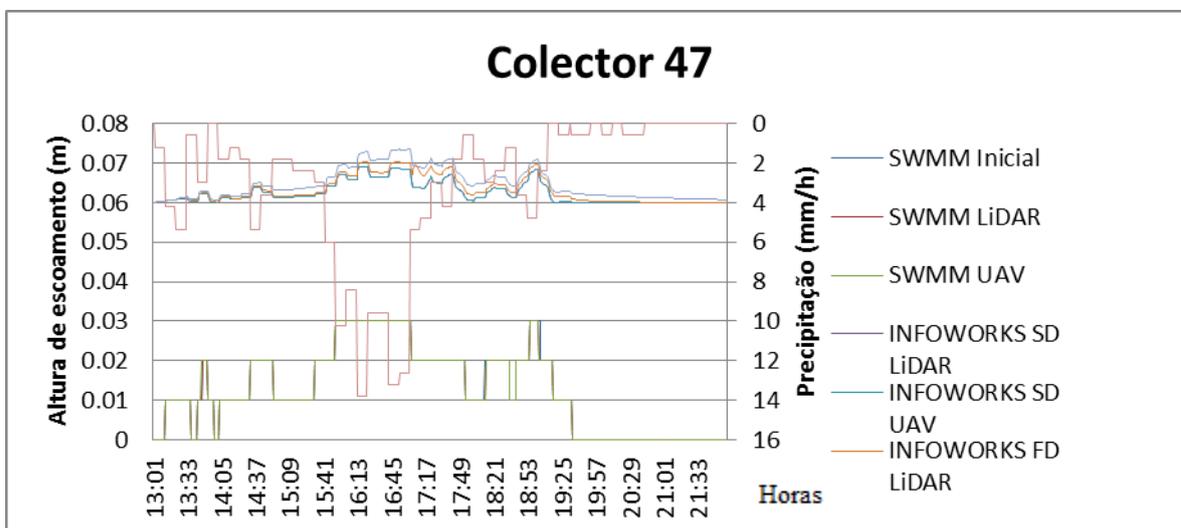


Figura A2.4 – Valores de altura de escoamento para o colector 47 para o evento 10.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-0.400	-0.005	0.395	-0.015	-68.039
$\Sigma$ Diferenças absolutas	0.724	0.686	0.636	0.107	68.218
Média Diferenças	-0.001	0.000	0.001	0.000	-0.126
Média Diferenças absolutas	0.001	0.001	0.001	0.000	0.126

Quadro A2.3 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 47 durante o evento 10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.000	0.000	0.013	0.013	0.162	0.581
RSME ( $m^3/s$ )	0.005	0.004	0.065	0.065	0.147	0.272
SD ( $m^3/s$ )	0.222	0.222	0.222	0.222	0.222	0.222
NSE	0.999	1.000	0.916	0.915	0.559	-0.496
Nt	41.541	57.282	2.441	2.425	0.506	-0.182

Quadro A2.4 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 47 durante o evento 10.

## A2.1.2 Colectores Intermédios

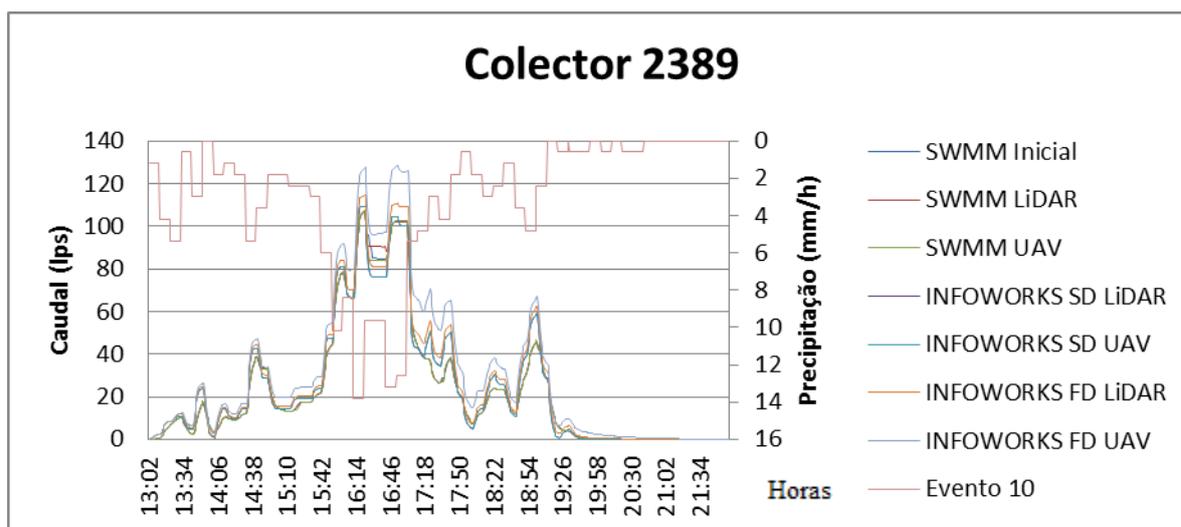


Figura A2.5 – Valores de caudal para o colector 2389 para o evento 10.

Das figuras A2.5, A2.6 e do quadro A2.5, conclui-se que os valores de todas as simulações são bastante semelhantes, com ligeiras oscilações. Ainda assim, entre os modelos INFOWORKS FD registaram-se as maiores diferenças. Do quadro A2.6, conclui-se que os modelos apresentam todos resultados semelhantes.

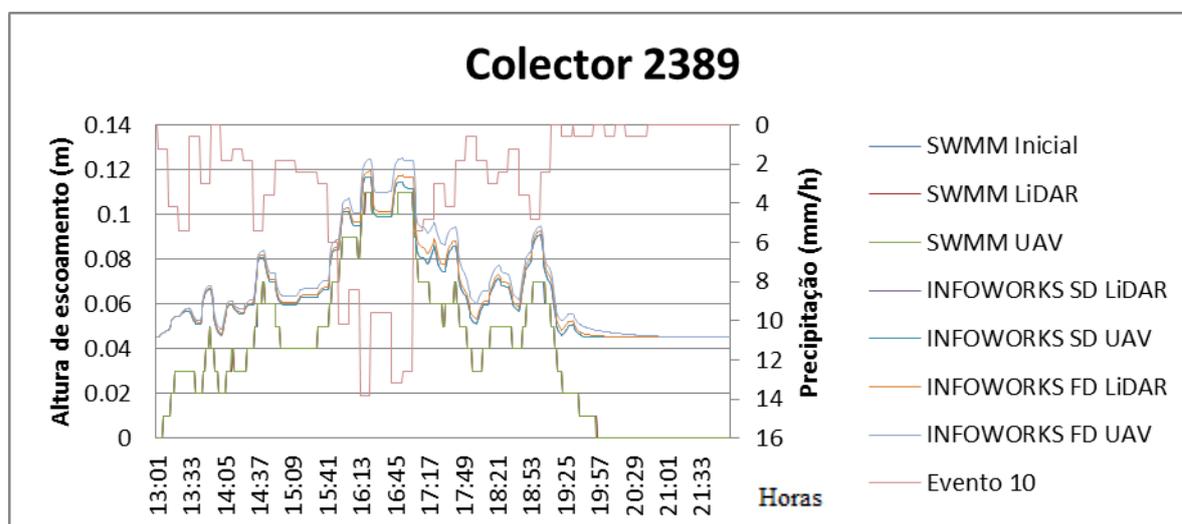


Figura A2.6 – Valores de altura de escoamento para o colector 2389 para o evento 10.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-4.429	2.499	6.928	-0.059	-157.263
$\Sigma$ Diferenças absolutas	8.480	6.512	9.046	0.419	157.263
Média Diferenças	-0.008	0.005	0.013	0.000	-0.291
Média Diferenças absolutas	0.016	0.012	0.017	0.001	0.291

Quadro A2.5 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 2389 durante o evento 10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.001	0.001	0.024	0.024	0.072	0.202
RSME ( $m^3/s$ )	0.058	0.047	0.269	0.270	0.344	0.690
SD ( $m^3/s$ )	1.822	1.822	1.822	1.822	1.822	1.822
NSE	0.999	0.999	0.978	0.978	0.964	0.857
Nt	30.244	37.595	5.770	5.747	4.291	1.642

Quadro A2.6 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 2389 durante o evento 10.

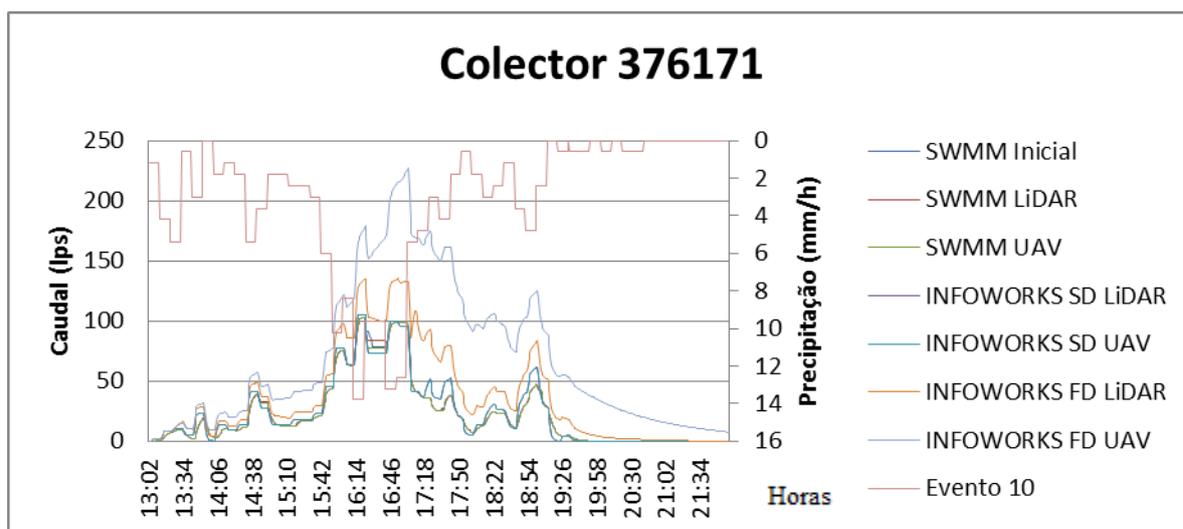


Figura A2.7 – Valores de caudal para o colector 376171 para o evento 10.

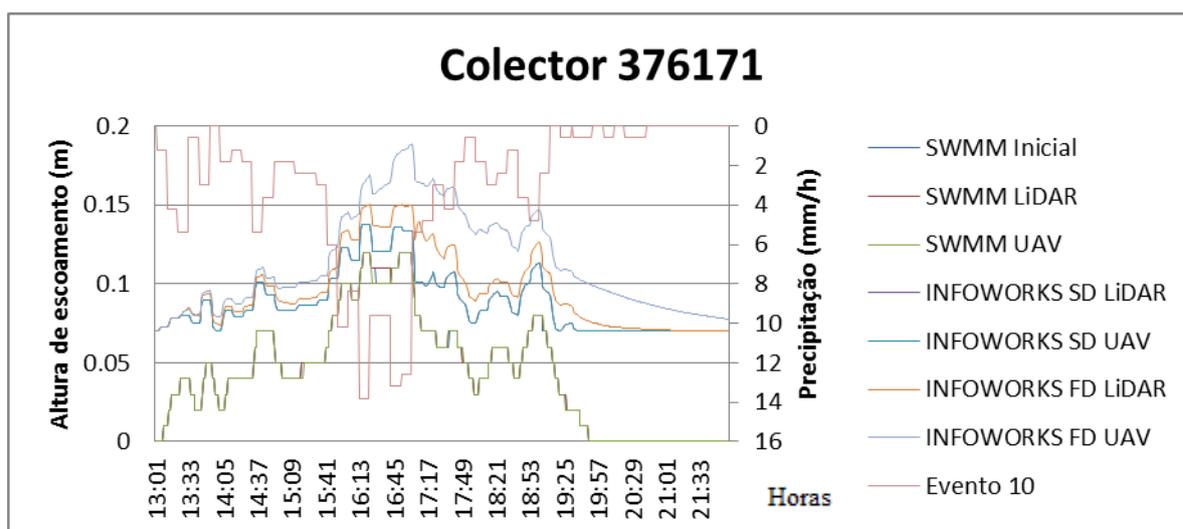


Figura A2.8 – Valores de altura de escoamento para o colector 376171 para o evento 10.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
Σ Diferenças	-4.358	2.693	7.051	-0.076	-1029.866
Σ Diferenças absolutas	8.702	6.561	8.704	0.394	1030.672
Média Diferenças	-0.008	0.005	0.013	0.000	-1.907
Média Diferenças absolutas	0.016	0.012	0.016	0.001	1.909

Quadro A2.7 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume (m<sup>3</sup>) para o colector 376171 durante o evento 10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.000	0.000	0.016	0.016	0.312	1.196
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.064	0.056	0.301	0.302	1.182	3.588
SD (m <sup>3</sup> /s)	1.754	1.754	1.754	1.754	1.754	1.754
NSE	0.999	0.999	0.971	0.970	0.546	-3.186
Nt	26.612	30.429	4.833	4.812	0.484	-0.511

Quadro A2.8 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 376171 durante o evento 10.

Da interpretação figuras A2.7, A2.8 e dos quadros A2.7 e A2.8, conclui-se que os valores das simulações SWMM e INFOWORKS SD apresentam valores semelhantes com ligeiras oscilações, enquanto que, os modelos INFOWORKS FD apresentam valores mais diferentes dos primeiros modelos. Ainda assim, entre os modelos INFOWORKS FD registaram-se as maiores diferenças.

### A2.1.3 Colectores a Jusante

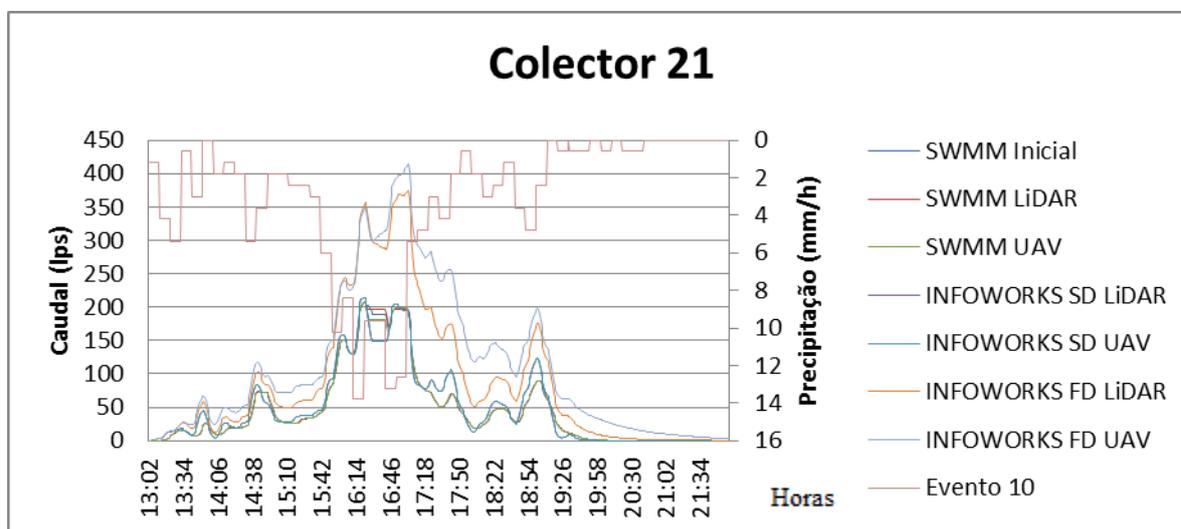


Figura A2.9 – Valores de caudal para o colector 21 para o evento 10.

Para o colector 21 a análise é efectuada recorrendo às figuras A2.9 e A2.10, complementada pelos quadros A2.9 e A2.10, é notória a diferença entre os modelos INFOWORKS FD e os restantes, enquanto que nos modelos INFOWORKS SD e SWMM, as diferenças são quase imperceptíveis.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-6.718	9.074	15.792	-0.263	-752.266
$\Sigma$ Diferenças absolutas	14.517	16.344	22.562	1.427	768.899
Média Diferenças	-0.012	0.017	0.029	0.000	-1.393
Média Diferenças absolutas	0.027	0.030	0.042	0.003	1.424

Quadro A2.9 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 21 durante o evento 10.

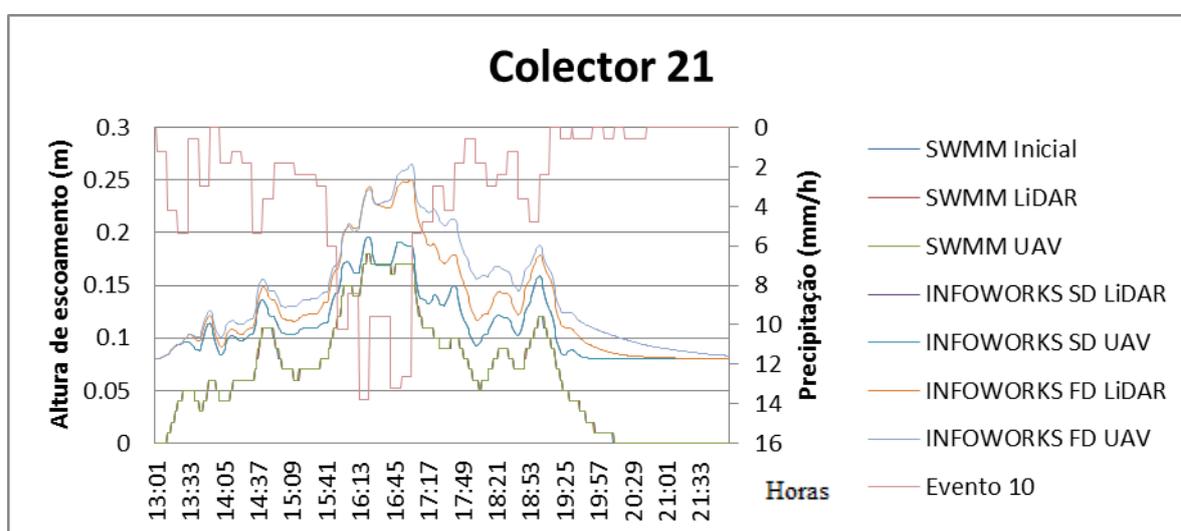


Figura A2.10 – Valores de altura de escoamento para o colector 21 para o evento 10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.001	0.000	0.031	0.031	0.809	0.998
RSME ( $m^3/s$ )	0.080	0.118	0.744	0.746	3.801	5.342
SD ( $m^3/s$ )	3.649	3.649	3.649	3.649	3.649	3.649
NSE	1.000	0.999	0.958	0.958	-0.085	-1.143
Nt	44.472	29.904	3.908	3.889	-0.040	-0.317

Quadro A2.10 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 21 durante o evento 10.

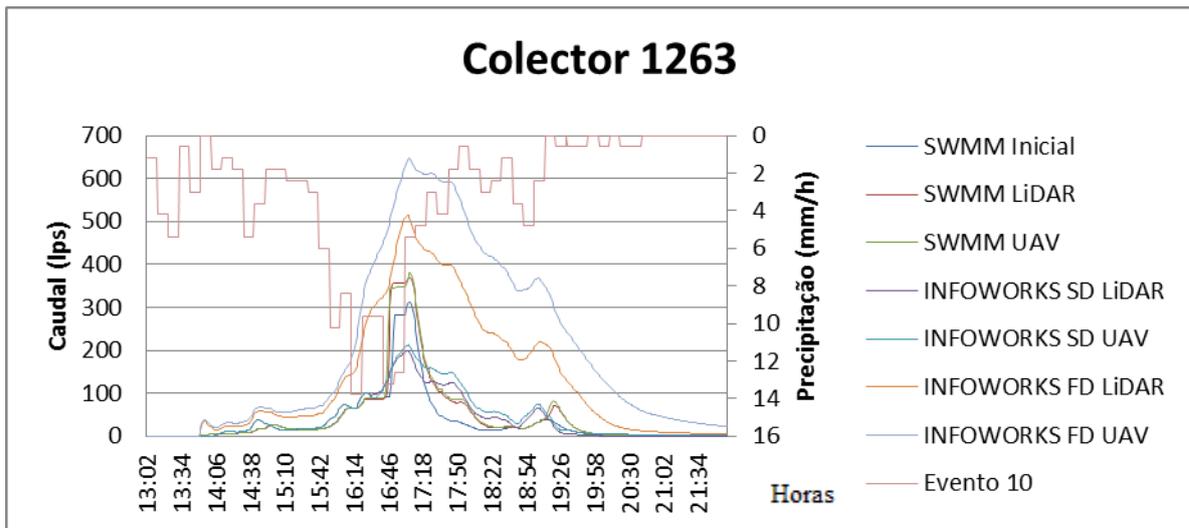


Figura A2.11 – Valores de caudal para o colector 1263 para o evento 10.

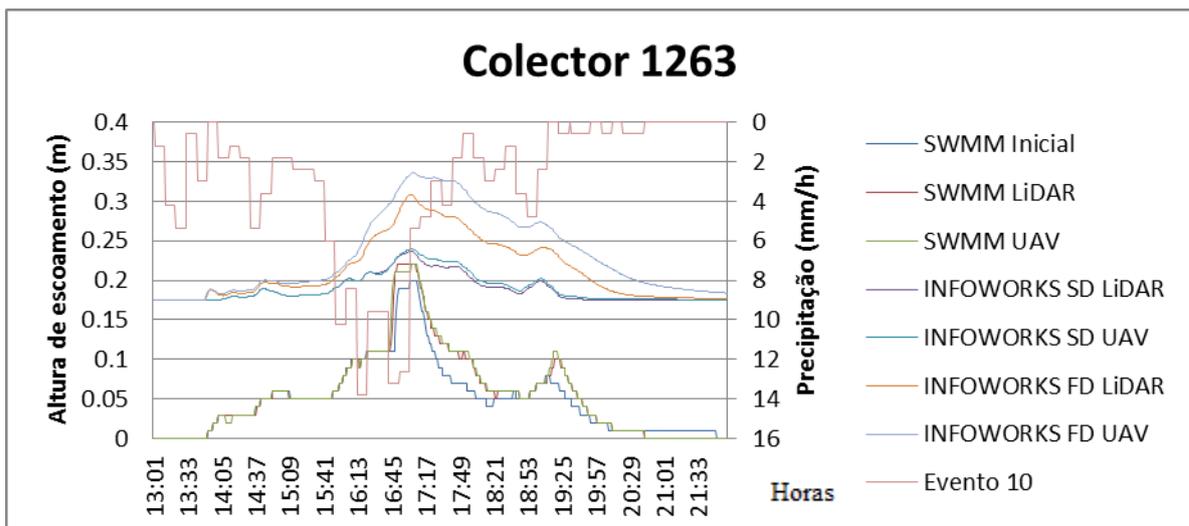


Figura A2.12 – Valores de altura de escoamento para o colector 1263 para o evento 10.

Ainda do quadro A2.10 conclui-se que os modelos SWMM e INFOWORKS SD construídos com os modelos digitais do terreno LiDAR e UAV apresentam valores muito parecidos com os do modelo SWMM construído com as inclinações iniciais, e que os INFOWORKS FD apresentam resultados muito diferentes do modelo de referência.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-350.647	-406.499	-55.852	-174.791	-2390.897
$\Sigma$ Diferenças absolutas	368.890	418.580	73.937	184.778	2390.897
Média Diferenças	-0.649	-0.753	-0.103	-0.324	-4.428
Média Diferenças absolutas	0.683	0.775	0.137	0.342	4.428

Quadro A2.11 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 1263 durante o evento 10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.183	0.221	0.361	0.319	0.648	1.075
RSME ( $m^3/s$ )	1.642	1.868	1.855	2.111	8.805	14.605
SD ( $m^3/s$ )	3.803	3.803	3.803	3.803	3.803	3.803
NSE	0.814	0.759	0.762	0.692	-4.362	-13.751
Nt	1.316	1.036	1.050	0.801	-0.568	-0.740

Quadro A2.12 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 1263 durante o evento 10.

Já o colector 1263 tem uma análise feita com base nas figuras A2.11 e A2.12 e nos quadros A2.11 e A2.12, onde são notórias as diferenças entre métodos. Ainda assim os modelos que apresentam maiores diferenças são INFOWORKS FD entre os modelos digitais do terreno LiDAR e UAV. Os modelos apresentam diferenças significativas para o modelo de referência.

## ANEXO 3 - RESULTADOS PARA O EVENTO PLUVIOMÉTRICO TR10

### A3.1 Evento TR10

Como referido anteriormente, o evento TR10, é um evento sintético de precipitação, criado com base, no tempo de retorno de 10 anos. Este evento apresenta uma duração de 60 minutos, com intensidade máxima e média bastante superiores aos eventos apresentados anteriormente, respectivamente, 108 e 14.4 mm/h.

#### A3.1.1 Colectores a Montante

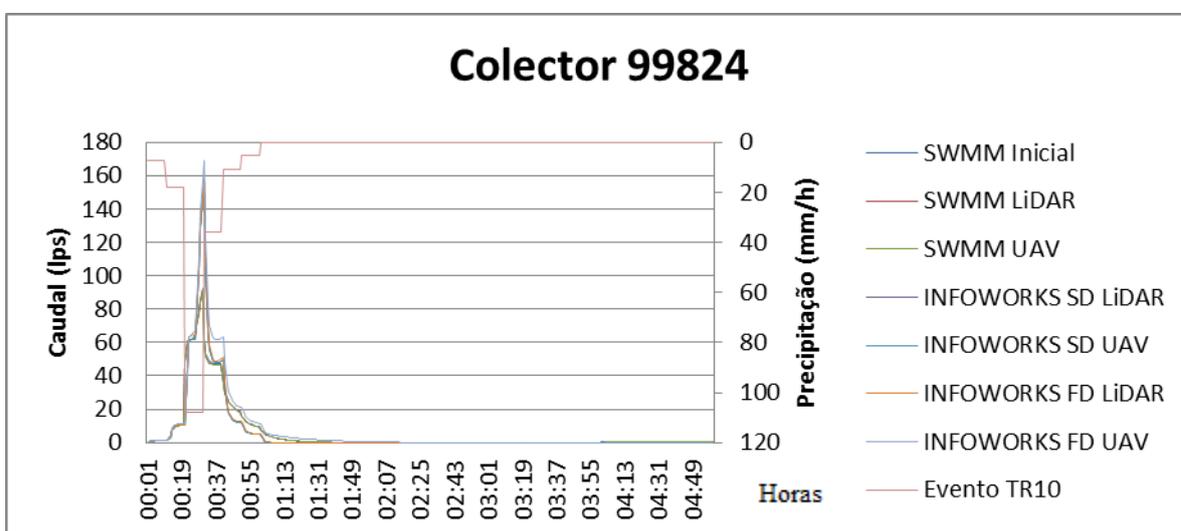


Figura A3.1 – Valores de caudal para o colector 99824 para o evento TR10.

Através das figuras A3.1, A3.2, A3.3 e A3.4, assim como dos quadros A3.1, A3.2, A3.3 e A3.4, é feita a análise dos colectores 99824 e 47. Desta análise retira-se que as maiores diferenças foram observadas à semelhança dos colectores analisados anteriormente para nos

modelos INFOWORKS FD com os modelos digitais do terreno LiDAR e UAV, assim como que os valores, à excepção do modelo INFOWORKS FD UAV, apresentam resultados muito bons ou aceitáveis quando comparados com o modelo de referencia.

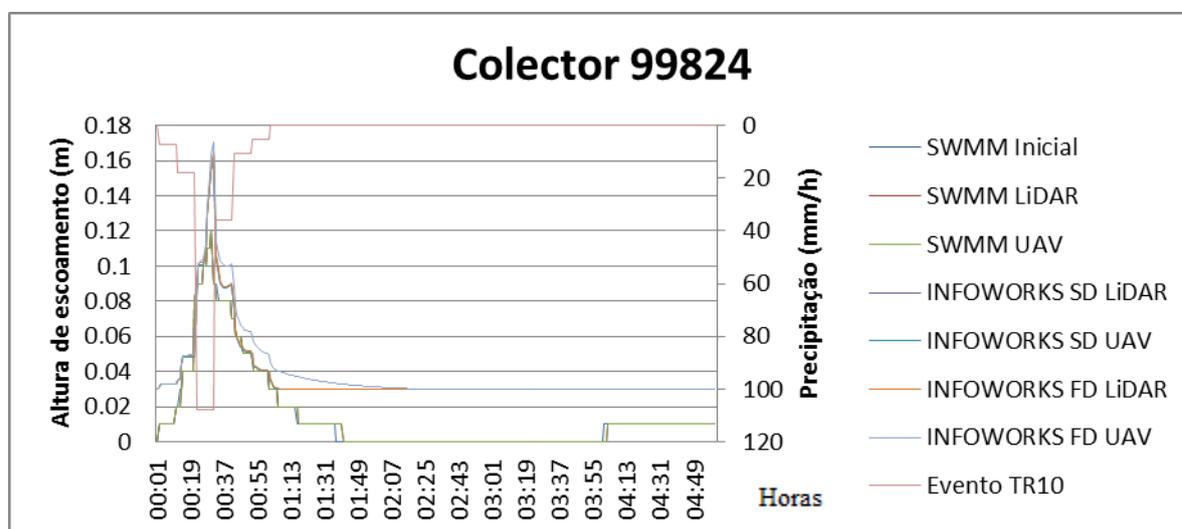


Figura A3.2 – Valores de altura de escoamento para o colector 99824 para o evento TR10.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
Σ Diferenças	0.443	0.375	-0.068	-0.013	-28.415
Σ Diferenças absolutas	1.679	1.442	0.246	0.142	28.432
Média Diferenças	0.001	0.001	0.000	0.000	-0.095
Média Diferenças absolutas	0.006	0.005	0.001	0.000	0.095

Quadro A3.1 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 99824 durante o evento TR10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.015	0.011	0.695	0.697	0.713	0.828
RSME ( $m^3/s$ )	0.015	0.013	0.462	0.463	0.486	0.583
SD ( $m^3/s$ )	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984
NSE	1.000	1.000	0.780	0.778	0.756	0.650
Nt	63.364	74.623	1.130	1.124	1.025	0.690

Quadro A3.2 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 99824 durante o evento TR10.

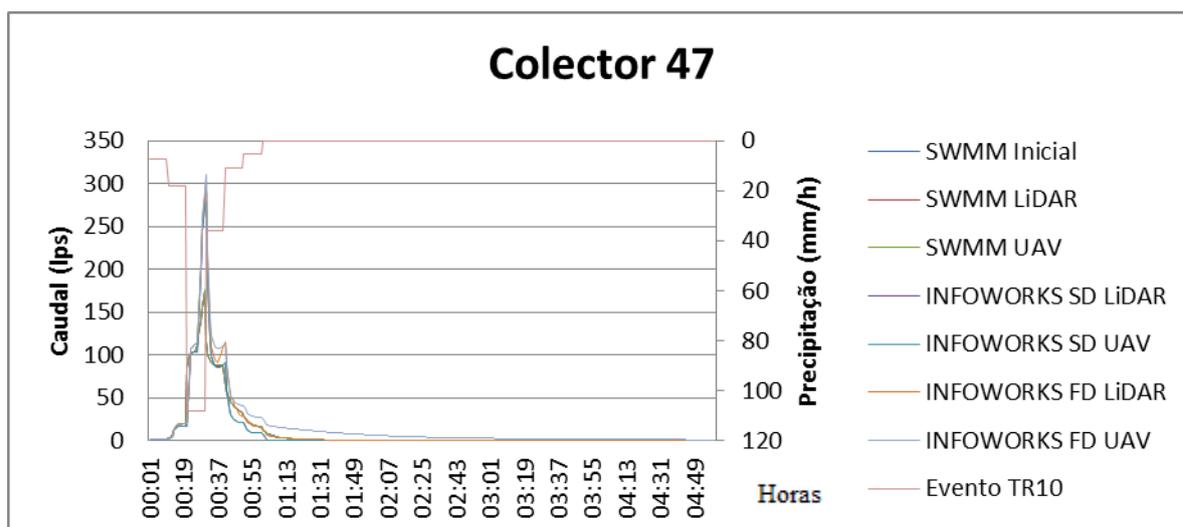


Figura A3.3 – Valores de caudal para o colector 47 para o evento TR10.

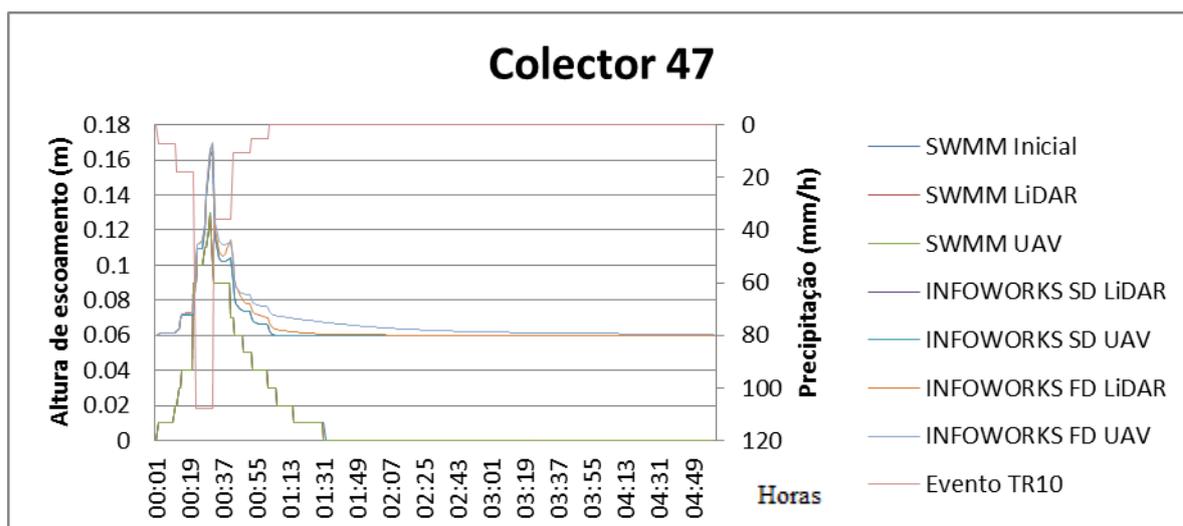


Figura A3.4 – Valores de altura de escoamento para o colector 47 para o evento TR10.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-0.058	-0.224	-0.167	-0.030	-73.318
$\Sigma$ Diferenças absolutas	0.322	0.943	0.705	0.419	75.068
Média Diferenças	0.000	-0.001	-0.001	0.000	-0.244
Média Diferenças absolutas	0.001	0.003	0.002	0.001	0.250

Quadro A3.3 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 47 durante o evento TR10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.002	0.007	0.708	0.712	0.783	0.827
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.003	0.010	0.860	0.864	0.979	1.092
SD (m <sup>3</sup> /s)	1.770	1.770	1.770	1.770	1.770	1.770
NSE	1.000	1.000	0.764	0.762	0.694	0.619
Nt	514.345	180.581	1.058	1.049	0.808	0.621

Quadro A3.4 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 47 durante o evento TR10.

### A3.1.2 Colectores Intermédios

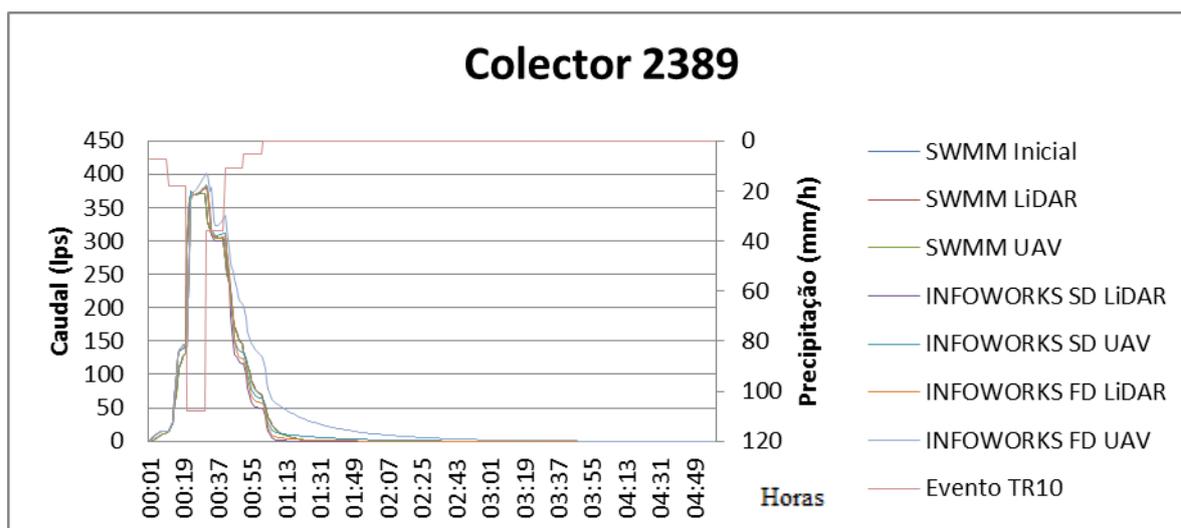


Figura A3.5 – Valores de caudal para o colector 2389 para o evento TR10.

A análise do colector 2389 é feita com recurso às figuras A3.5 e A3.6, assim como dos quadros A3.5 e A3.6. Desta análise, retira-se que os caudais são muito parecidos em todos os modelos, dando todos uma aproximação muito boa do ficheiro de referência.

Para o colector 376171, a análise foi feita recorrendo às figuras A3.7 e A3.8 juntamente com os quadros A3.7 e A3.8, desta análise concluímos que todos os modelos à excepção do modelo INFOWORKS FD UAV dão resultados aceitáveis quando comparados com o ficheiro de referência.

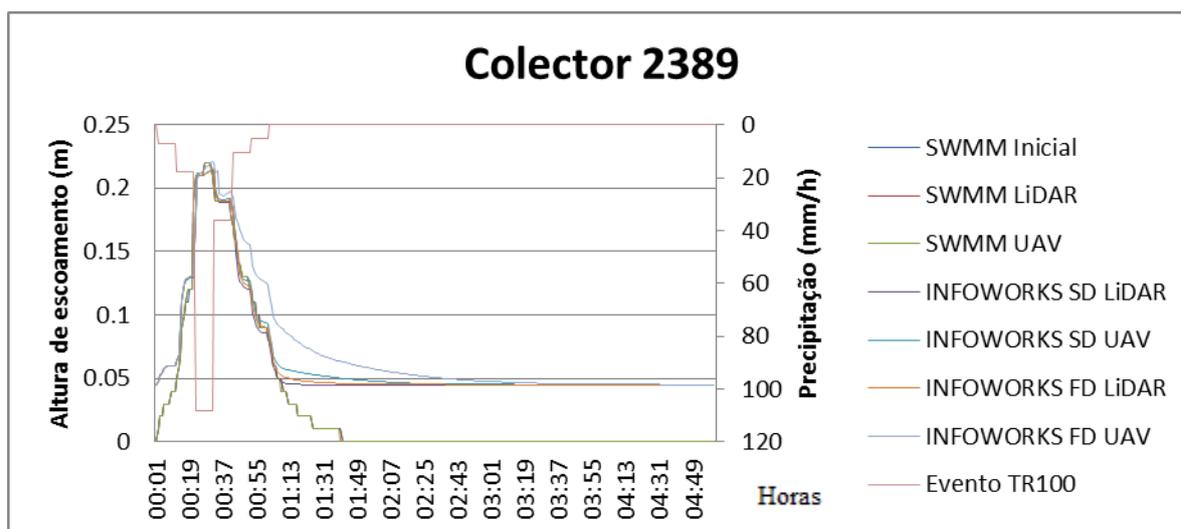


Figura A3.6 – Valores de altura de escoamento para o colector 2389 para o evento TR10.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	0.189	0.847	0.658	-52.189	-233.296
$\Sigma$ Diferenças absolutas	1.271	2.822	1.568	52.189	233.296
Média Diferenças	0.001	0.003	0.002	-0.174	-0.778
Média Diferenças absolutas	0.004	0.009	0.005	0.174	0.778

Quadro A3.5 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 2389 durante o evento TR10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.000	0.000	0.026	0.032	0.027	0.079
RSME ( $m^3/s$ )	0.014	0.027	0.732	0.614	0.651	1.401
SD ( $m^3/s$ )	5.877	5.877	5.877	5.877	5.877	5.877
NSE	1.000	1.000	0.984	0.989	0.988	0.943
Nt	418.479	217.437	7.025	8.574	8.031	3.195

Quadro A3.6 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 2389 durante o evento TR10.

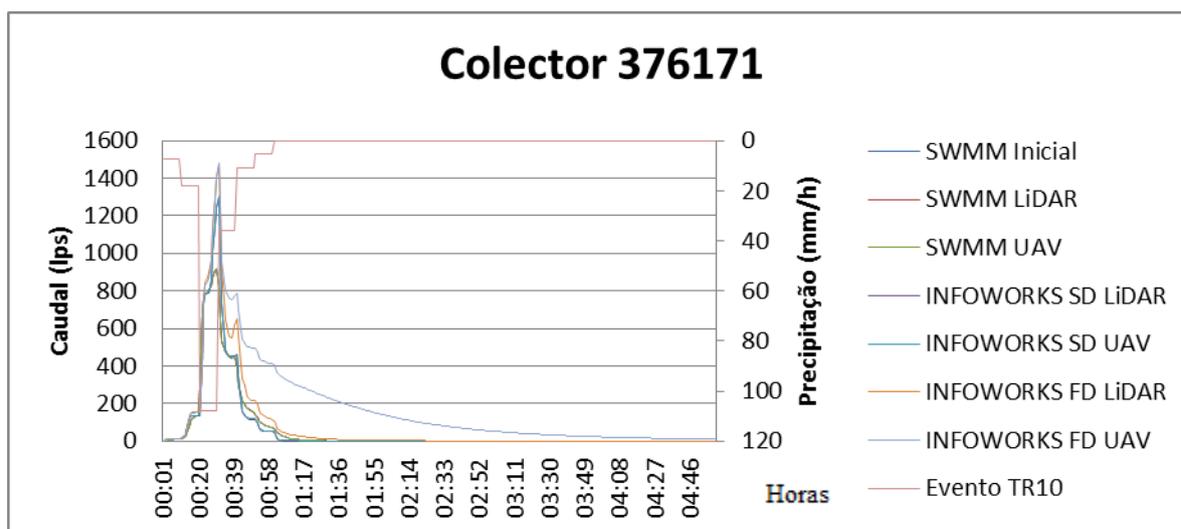


Figura A3.7 – Valores de caudal para o colector 376171 para o evento TR10.

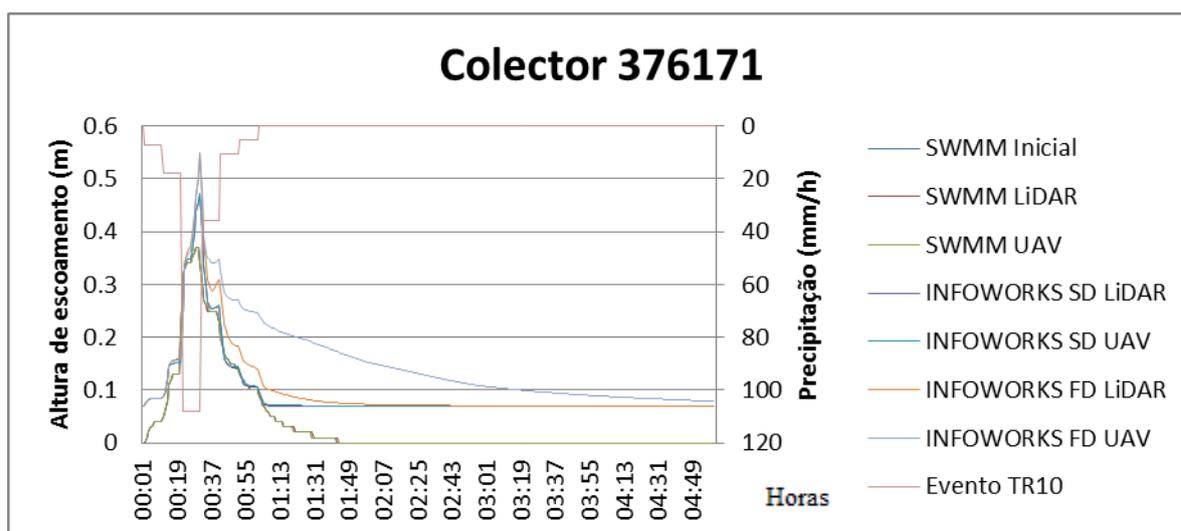


Figura A3.8 – Valores de altura de escoamento para o colector 376171 para o evento TR10.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-0.100	-0.182	-0.082	-11.240	-1652.598
$\Sigma$ Diferenças absolutas	1.307	3.235	2.281	11.488	1672.915
Média Diferenças	0.000	-0.001	0.000	-0.037	-5.509
Média Diferenças absolutas	0.004	0.011	0.008	0.038	5.576

Quadro A3.7 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 376171 durante o evento TR10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.001	0.000	0.389	0.393	0.569	0.578
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.012	0.026	2.834	2.837	4.700	10.151
SD (m <sup>3</sup> /s)	10.762	10.762	10.762	10.762	10.762	10.762
NSE	1.000	1.000	0.931	0.931	0.809	0.110
Nt	871.770	407.756	2.797	2.794	1.290	0.060

Quadro A3.8 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 376171 durante o evento TR10.

### A3.1.3 Colectores a Jusante

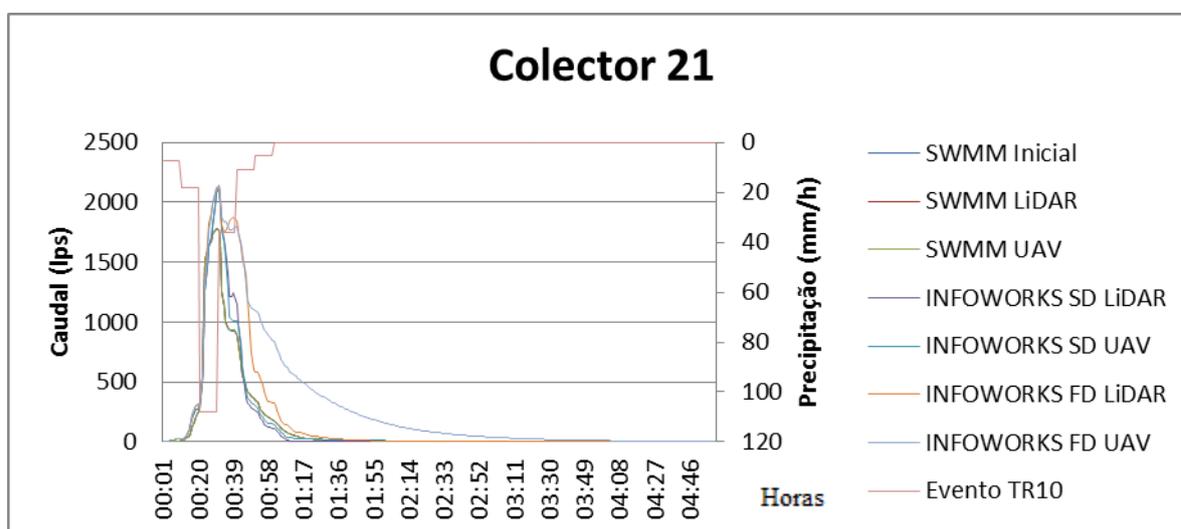


Figura A3.9 – Valores de caudal para o colector 21 para o evento TR10.

A análise do colector 21 é feita com recurso às figuras A3.9 e A3.10, assim como dos quadros A3.9 e A3.10.

Para o colector 1263, a análise foi feita recorrendo às figuras A3.11 e A3.12 juntamente com os quadros A3.11 e A3.12, desta análise concluímos que todos os modelos à excepção do modelo INFOWORKS FD UAV dão resultados aceitáveis quando comparados com o ficheiro de referência.

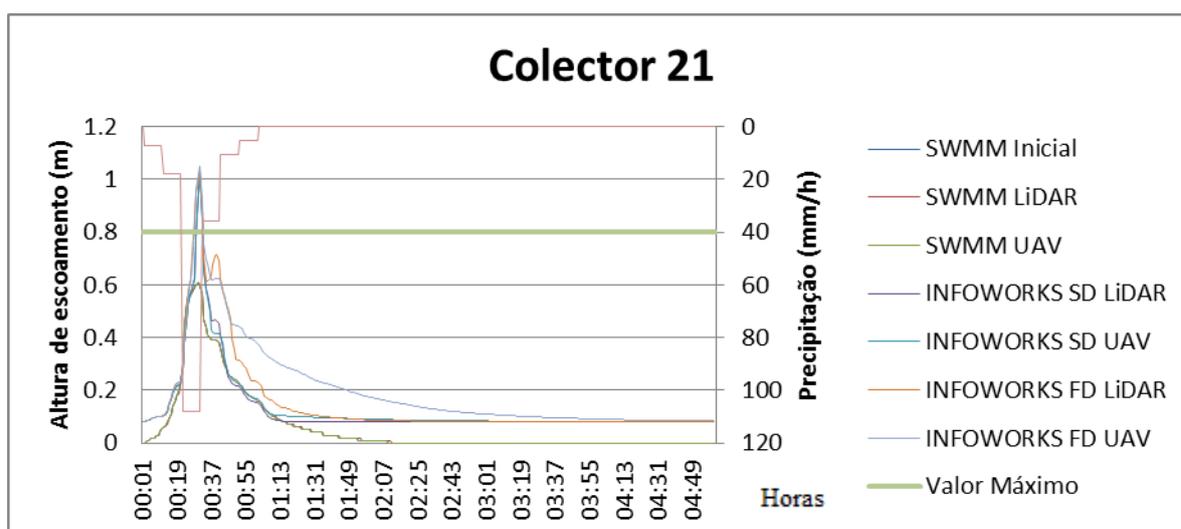


Figura A3.10 – Valores de altura de escoamento para o colector 21 para o evento TR10.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	0.190	-1.456	-1.646	-69.889	-1930.985
$\Sigma$ Diferenças absolutas	7.512	5.974	8.133	209.331	2013.648
Média Diferenças	0.001	-0.005	-0.005	-0.233	-6.437
Média Diferenças absolutas	0.025	0.020	0.027	0.698	6.712

Quadro A3.9 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o colector 21 durante o evento TR10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.002	0.000	0.184	0.181	0.193	0.199
RSME ( $m^3/s$ )	0.080	0.064	5.209	4.367	12.552	18.333
SD ( $m^3/s$ )	21.726	21.726	21.726	21.726	21.726	21.726
NSE	1.000	1.000	0.943	0.960	0.666	0.288
Nt	269.539	337.726	3.171	3.974	0.731	0.185

Quadro A3.10 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 21 durante o evento TR10.

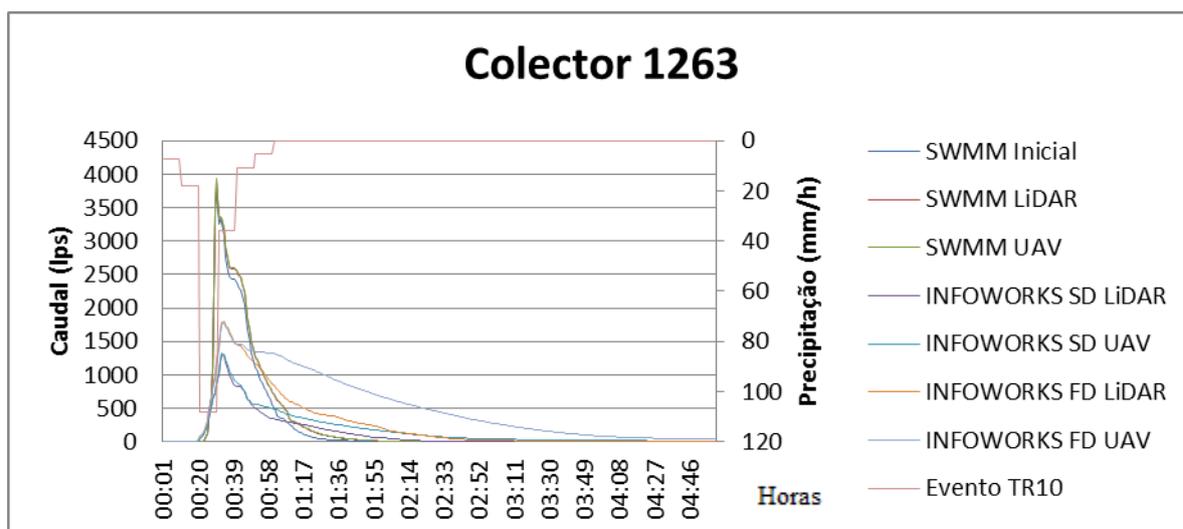


Figura A3.11 – Valores de caudal para o coletor 1263 para o evento TR10.

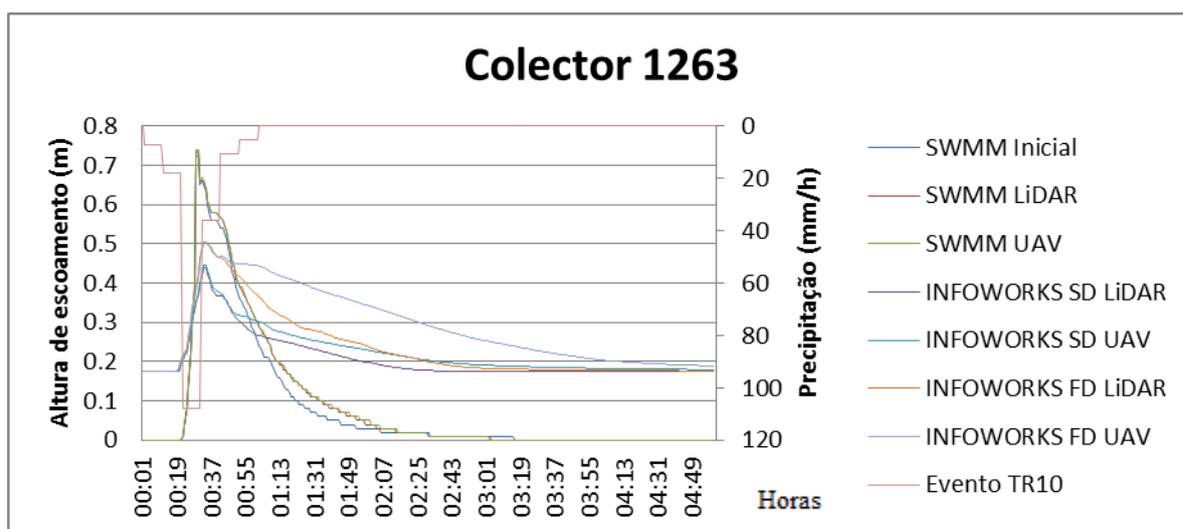


Figura A3.12 – Valores de altura de escoamento para o coletor 1263 para o evento TR10.

	SWMM			INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	Inicial-LiDAR	Inicial-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV	LiDAR-UAV
$\Sigma$ Diferenças	-537.953	-595.444	-57.491	-915.245	-4260.385
$\Sigma$ Diferenças absolutas	541.390	599.026	57.849	915.513	4322.624
Média Diferenças	-1.793	-1.985	-0.192	-3.051	-14.201
Média Diferenças absolutas	1.805	1.997	0.193	3.052	14.409

Quadro A3.11 – Valores de diferenças e médias de diferenças de volume ( $m^3$ ) para o coletor 1263 durante o evento TR10.

	SWMM		INFOWORKS SD		INFOWORKS FD	
	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV	LiDAR	UAV
RE	0.030	0.040	0.642	0.632	0.502	0.508
RSME (m <sup>3</sup> /s)	3.883	4.250	27.377	27.187	21.172	33.857
SD (m <sup>3</sup> /s)	42.614	42.614	42.614	42.614	42.614	42.614
NSE	0.992	0.990	0.587	0.593	0.753	0.369
Nt	9.974	9.026	0.557	0.567	1.013	0.259

Quadro A3.12 – Valores dos parâmetros RE, RSME, SD, NSE e Nt para o colector 1263 durante o evento TR100.

## ANEXO 4 - RESULTADOS PARA OS INDICADORES DE DIFERENTES COMPARAÇÕES

No presente anexo são apresentados os resultados dos indicadores apresentados no capítulo 3.5 para os eventos pluviométricos 7, 10, TR10 e TR100. Os indicadores serão muito importantes no capítulo 4.3 para um resumo dos resultados e posteriores conclusões.

Os resultados são apresentados na forma de tabela, sendo que, na primeira coluna (à esquerda) são apresentados os resultados de comparação entre o modelo INFOWORKS SD LiDAR e UAV, sendo que, o ficheiro considerado base é o com o MDT LiDAR. Na segunda coluna (à direita) é feita a comparação homóloga para os modelos INFOWORKS FD.

### A4.1 Evento 7

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.000	0.000
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.019	4.642
SD (m <sup>3</sup> /s)	10.639	15.247
NSE	1.000	0.907
Nt	562.744	2.285

Quadro A4.1- Valores dos parâmetros para o colector 21 durante o evento 7.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.000	0.026
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.002	0.193
SD (m <sup>3</sup> /s)	0.893	0.106
NSE	1.000	-2.281
Nt	554.528	-0.448

Quadro A4.2- Valores dos parâmetros para o colector 47 durante o evento 7.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.055	0.169
RSME (m <sup>3</sup> /s)	1.240	12.553
SD (m <sup>3</sup> /s)	9.042	0.932
NSE	0.981	-180.252
Nt	6.291	-0.926

Quadro A4.3- Valores dos parâmetros para o colector 1263 durante o evento 7

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.000	0.027
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.049	0.724
SD (m <sup>3</sup> /s)	4.460	0.662
NSE	1.000	-0.198
Nt	90.465	-0.086

Quadro A4.4- Valores dos parâmetros para o colector 2389 durante o evento 7.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.000	0.121
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.001	0.089
SD (m <sup>3</sup> /s)	0.497	0.062
NSE	1.000	-1.083
Nt	892.534	-0.307

Quadro A4.5- Valores dos parâmetros para o colector 99824 durante o evento 7.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.000	0.112
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.006	4.309
SD (m <sup>3</sup> /s)	5.281	1.013
NSE	1.000	-17.102
Nt	817.093	-0.765

Quadro A4.6- Valores dos parâmetros para o colector 376171 durante o evento 7.

## A4.2 Evento 10

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.000	0.105
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.005	1.951
SD (m <sup>3</sup> /s)	3.610	6.443
NSE	1.000	0.908
Nt	746.561	2.302

Quadro A4.7- Valores dos parâmetros para o colector 21 durante o evento 10.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.000	0.360
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.000	0.150
SD (m <sup>3</sup> /s)	0.250	0.304
NSE	1.000	0.757
Nt	535.192	1.031

Quadro A4.8- Valores dos parâmetros para o colector 47 durante o evento 10.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.066	0.259
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.589	5.971
SD (m <sup>3</sup> /s)	3.320	9.990
NSE	0.969	0.643
Nt	4.638	0.673

Quadro A4.9- Valores dos parâmetros para o colector 1263 durante o evento 10.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.000	0.121
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.001	0.421
SD (m <sup>3</sup> /s)	1.842	1.953
NSE	1.000	0.954
Nt	1240.747	3.640

Quadro A4.10- Valores dos parâmetros para o colector 2389 durante o evento 10.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.000	0.188
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.000	0.039
SD (m <sup>3</sup> /s)	0.145	0.152
NSE	1.000	0.935
Nt	795.902	2.927

Quadro A4.11- Valores dos parâmetros para o colector 99824 durante o evento 10.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.000	0.674
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.002	2.481
SD (m <sup>3</sup> /s)	1.787	2.427
NSE	1.000	-0.045
Nt	1075.837	-0.022

Quadro A4.12- Valores dos parâmetros para o colector 376171 durante o evento 10.

### A4.3 Evento TR10

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.003	0.004
RSME (m <sup>3</sup> /s)	5.361	11.484
SD (m <sup>3</sup> /s)	24.770	31.329
NSE	0.953	0.866
Nt	3.621	1.728

Quadro A4.13- Valores dos parâmetros para o colector 21 durante o evento TR10.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.002	0.025
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.020	0.343
SD (m <sup>3</sup> /s)	2.305	2.508
NSE	1.000	0.981
Nt	111.796	6.303

Quadro A4.14- Valores dos parâmetros para o colector 47 durante o evento TR10.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.028	0.012
RSME (m <sup>3</sup> /s)	12.393	19.017
SD (m <sup>3</sup> /s)	16.653	28.650
NSE	0.446	0.559
Nt	0.344	0.507

Quadro A4.15- Valores dos parâmetros para o colector 1263 durante o evento TR10.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.006	0.050
RSME (m <sup>3</sup> /s)	1.132	1.481
SD (m <sup>3</sup> /s)	5.754	5.835
NSE	0.961	0.936
Nt	4.082	2.939

Quadro A4.16- Valores dos parâmetros para o colector 2389 durante o evento TR10.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.001	0.067
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.007	0.215
SD (m <sup>3</sup> /s)	1.266	1.294
NSE	1.000	0.972
Nt	180.324	5.026

Quadro A4.17- Valores dos parâmetros para o colector 99824 durante o evento TR10.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.003	0.006
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.298	7.913
SD (m <sup>3</sup> /s)	12.259	14.567
NSE	0.999	0.705
Nt	40.074	0.841

Quadro A4.18- Valores dos parâmetros para o colector 376171 durante o evento TR10.

#### A4.4 Evento TR100

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.001	0.005
RSME (m <sup>3</sup> /s)	11.446	33.096
SD (m <sup>3</sup> /s)	37.871	43.812
NSE	0.909	0.429
Nt	2.308	0.324

Quadro A4.19- Valores dos parâmetros para o colector 21 durante o evento TR100.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.000	0.005
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.040	1.290
SD (m <sup>3</sup> /s)	4.648	5.103
NSE	1.000	0.936
Nt	114.802	2.955

Quadro A4.20- Valores dos parâmetros para o colector 47 durante o evento TR100.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.042	0.194
RSME (m <sup>3</sup> /s)	38.146	24.240
SD (m <sup>3</sup> /s)	31.911	79.461
NSE	-0.429	0.907
Nt	-0.163	2.278

Quadro A4.21- Valores dos parâmetros para o colector 1263 durante o evento TR100.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.028	0.084
RSME (m <sup>3</sup> /s)	1.798	4.120
SD (m <sup>3</sup> /s)	8.317	8.424
NSE	0.953	0.761
Nt	3.625	1.045

Quadro A4.22- Valores dos parâmetros para o colector 2389 durante o evento TR100.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.001	0.061
RSME (m <sup>3</sup> /s)	0.062	0.628
SD (m <sup>3</sup> /s)	2.522	2.569
NSE	0.999	0.940
Nt	39.952	3.093

Quadro A4.23- Valores dos parâmetros para o colector 99824 durante o evento TR100.

	INFOWORKS SD	INFOWORKS FD
	UAV	UAV
RE	0.003	0.006
RSME (m <sup>3</sup> /s)	2.706	21.374
SD (m <sup>3</sup> /s)	20.599	24.671
NSE	0.983	0.249
Nt	6.612	0.154

Quadro A4.24- Valores dos parâmetros para o colector 376171 durante o evento TR100.