



Marvin Silva Duarte

**MODELAÇÃO DO PROCESSO DE  
PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO E  
TRANSPORTES ASSOCIADOS:  
INFLUÊNCIA DA FORMA DAS BACIAS**

**RAINFALL-RUNOFF MODELLING AND  
ASSOCIATED TRANSPORT PROCESSES:  
INFLUENCE OF DRAINAGE BASIN SHAPE**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente na área de Especialização em Território e Gestão em Ambiente, orientada pela Professora Doutora Isabel Pedroso de Lima e pelo Professor Doutor João Pedroso de Lima

Coimbra, 08 de setembro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

Marvin Silva Duarte

# **Modelação do processo de precipitação-escoamento e transportes associados:**

**Influência da forma das bacias**

# **Rainfall-runoff modelling and associated transport processes:**

**Influence of drainage basin shape**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente na área de Especialização em Território e Gestão em Ambiente, orientada pela Professora Doutora Isabel Pedroso de Lima e pelo Professor Doutor João Pedroso de Lima

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, 08 de setembro de 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Aqui, expresso o meu apreço e agradecimentos a todos aqueles que participaram e fizeram parte do meu percurso académico.

Aos meus orientadores pelo tema sugerido, sugestões, ensinamentos e tempo disponibilizado na elaboração e conclusão deste trabalho.

Aos professores com quem tive o privilégio de aprender. Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil, com especial agradecimento para o Sr. Joaquim, pela disponibilidade e colaboração na preparação dos equipamentos para a realização das experiências laboratoriais.

Aos meus amigos e colegas com quem partilhei vários momentos, e que contribuíram de uma forma ou de outra para a realização deste trabalho: Bruno Duarte, Carmen Celine, Diogo Moedas, João Vairinhos, Manuel Martinho, Luís Roque, Marcelle Vargas e Gustavo Nagel.

Um agradecimento especial aos alunos de doutoramento: Babar Mujtaba e João Abrantes, pelo tempo que disponibilizaram no planeamento das experiências laboratoriais e nos ensinamentos sobre a modelo desenvolvido, porque sem eles a realização este trabalho não seria possível.

À Sandra Meireles e Orlanda Meireles por me terem recebido na vossa casa e me tratarem com se fosse mais um membro da família. O vosso amor e carinho fizeram com que a adaptação a esta nova cultura fosse possível.

À minha família pelo apoio e carinho, e por me terem incentivado a vir estudar em Portugal. Neste longo tempo que não os vejo, conheci e aprendi muita coisa. Mas também me ajudou a perceber melhor qual o verdadeiro valor da família.

Foi um privilégio fazer parte da Universidade de Coimbra.

## RESUMO

A forma é uma das características fisiográficas que influencia a resposta hidrológica das bacias hidrográficas. Este trabalho avalia esta influência em termos de escoamento superficial e transporte de sedimentos. Foram conduzidas experiências em laboratório com recurso a um simulador de chuva e três parcelas de terra. Em cada parcela foram simulados 4 eventos de precipitação com a mesma duração, intercalados com 16 minutos sem precipitação. Os resultados experimentais sugerem que o caudal de ponta e a quantidade de sedimentos transportados diminuem com o aumento do comprimento da parcela no sentido do escoamento. Os resultados experimentais de escoamento superficial foram comparados com os do modelo da onda cinemática, resolvido com um método de diferenças finitas. Houve um bom ajuste entre os resultados experimentais e os numéricos, com melhores ajustes para as parcelas com maior comprimento. Uma análise de sensibilidade mostrou que os ajustes seriam melhores com um aumento do coeficiente de Manning ou com a diminuição da inclinação. No modelo da onda cinemática foram simuladas várias formas das parcelas, sendo a forma expressa por um fator de forma que relaciona o quadrado do comprimento com a área das parcelas. A forma das parcelas influenciou o escoamento superficial. No entanto não houve grandes diferenças na previsão do caudal de ponta. As maiores diferenças entre as formas foram verificadas na fase ascendente e descendente dos hidrogramas. Com o aumento do fator de forma, o escoamento iniciou-se mais tarde atingindo um caudal de ponta menor e com decréscimo mais lento no escoamento depois do fim da precipitação.

**Palavras-chave: Escoamento superficial, Transporte de sedimentos, Forma das parcelas, Modelo da onda cinemática, Modelo laboratorial**

## **ABSTRACT**

The shape is one of the physiographic features that influences the hydrological response of the drainage basin. This work evaluates this influence in terms of surface runoff and sediment transport. Experiments were conducted in the laboratory using a rainfall simulator and three plots. In each plot, 4 rainfall events with the same duration were simulated, interspersed with 16 minutes without precipitation. Experimental results suggest that peak flow decreases with increasing runoff length. The amount of transported sediment decreased with increasing length for all precipitation events. The experimental results of surface runoff were compared with those of the kinematic wave model, solved with a finite difference method. There was a good fit between the experimental and numerical results, with better adjustments for the more elongated plots. Sensitivity analysis showed that the adjustments would be better with an increase in the Manning coefficient or with the slope decrease. In the kinematic wave model different shapes of the plots are simulated, with the shape being expressed by a shape factor that relates the square of the length with the area of the plots. The shape of the plots influenced the runoff. However, there were no major differences in the peak flow estimations. The greatest differences between the shapes were verified in the rising and falling limb of the hydrographs. With the increase of the shape factor, the surface runoff started later reaching a lower peak flow and slower decrease in surface runoff after the end of the precipitation.

**Keywords: Surface runoff, Sediment transport, Shape of plots, Kinematic wave model, Laboratory model**

---

## ÍNDICE

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	ii
Abstract.....	iii
Índice .....	iv
Índice de Figuras .....	vi
Índice de Quadros .....	vii
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento da dissertação.....	1
1.2 Objetivos da dissertação .....	1
1.3 Estrutura da dissertação .....	2
2 Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Processo de precipitação-escoamento.....	3
2.1.1 Escoamento superficial e aplicações práticas .....	3
2.1.2 Fatores que afetam a resposta hidrológica de bacias hidrográficas.....	3
2.1.3 Modelação do processo de precipitação-escoamento .....	4
2.1.4 Modelação do processo da infiltração .....	5
2.1.5 Transporte de sedimentos .....	6
2.1.6 Representação geométrica das bacias na modelação do processo de precipitação-escoamento .....	7
2.2 Modelo laboratorial.....	8
2.2.1 Enquadramento .....	8
2.2.2 Investigação laboratorial.....	9
2.2.3 Vantagens e limitações .....	10
2.3 Modelo da onda cinemática .....	11
2.3.1 Teoria da onda cinemática .....	11
2.3.2 Validade da teoria da onda cinemática .....	11
2.3.3 Aplicações do modelo da onda cinemática.....	12

---

3	Materiais e Métodos .....	14
3.1	Descrição experimental.....	14
3.1.1	Caraterísticas das parcelas .....	14
3.1.2	Caraterísticas do solo.....	15
3.1.3	Caraterísticas do simulador .....	15
3.1.4	Procedimento experimental .....	16
3.2	Modelação do escoamento superficial .....	18
3.2.1	Equações do modelo da onda cinemática e do processo de infiltração .....	18
3.2.2	Solução numérica do modelo .....	21
3.2.3	Desempenho do modelo em prever o escoamento superficial .....	22
3.2.4	Análise de sensibilidade .....	23
3.2.5	Investigação do efeito da forma na modelação do escoamento superficial.....	23
4	Resultados e Discussão .....	25
4.1	Resultados experimentais .....	25
4.1.1	Escoamento superficial.....	25
4.1.2	Transporte de sedimentos .....	28
4.2	Comparação dos resultados experimentais com os simulados .....	30
4.2.1	Ajuste dos hidrogramas simulados aos observados em laboratório .....	30
4.2.2	Efeito da rugosidade e da inclinação na modelação do escoamento .....	32
4.3	Efeito da forma na resposta hidrológica das parcelas.....	34
5	Conclusões .....	38
	Referências Bibliográficas.....	39
	Anexo A – Equipamentos e recipientes.....	1
	Anexo B – Dados experimentais .....	1
	Anexo C – Modelação do escoamento superficial .....	1

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação simplificada dos processos envolvidos no ciclo hidrológico (e.g. Beven 2012).....	4
Figura 2.2 – Representação esquemática do processo de precipitação-escoamento, adaptado de Wei e Larson (1971). ....	4
Figura 3.1 – Representação esquemática (vista lateral) da instalação experimental, juntamente com as variáveis hidrológicas envolvidas na experiências.....	14
Figura 3.2 – Representação esquemática da forma das parcelas, com 0,50 m <sup>2</sup> de área. ....	15
Figura 3.3 – Representação esquemática dos componentes do simulador de chuva.....	16
Figura 3.4 – Distribuição espacial da intensidade de precipitação nas parcelas. ....	17
Figura 4.1 – Hidrogramas para os quatro eventos de precipitação e para as três parcelas.....	26
Figura 4.2 – Hidrogramas para as três parcelas e para os 4 eventos de precipitação.....	26
Figura 4.3 – escoamento e precipitação total para as três parcelas e para os quatro eventos de precipitação.....	27
Figura 4.4 – Coeficiente de escoamento para os quatro eventos de precipitação simulados em cada parcela. ....	27
Figura 4.5 – Transporte sólido nos quatro eventos de precipitação simulados em cada parcela .....	28
Figura 4.6 – Transporte de sedimentos para as três parcelas para os quatro eventos de precipitação.....	29
Figura 4.7 – Peso total dos sedimentos transportados nas três parcelas em relação aos eventos de precipitação.....	29
Figura 4.8 – Comparação entre os caudais observados em laboratório e os simulados pelo modelo da onda cinemática, utilizando como dados de infiltração e precipitação os valores do Quadro 3.2. ....	31
Figura 4.9 – Caudal de ponta simulado pelo modelo da onda cinemática no 1º evento de precipitação para as várias formas de parcelas, ver Quadro 3.5.....	35
Figura 4.10 – Caudal de ponta simulado pelo modelo da onda cinemática no 1º, 2º e 3º evento de precipitação para as várias formas de parcelas, ver Quadro 3.5. ....	35
Figura 4.11 – Caudal simulado pelo modelo da onda cinemática no 1º evento de precipitação para as formas de parcelas, ver Quadro 3.5.....	36
Figura 4.12 – Caudal simulado pelo modelo da onda cinemática no 1º, 2º e 3º evento de precipitação para as formas de parcelas, ver Quadro 3.5. ....	36
Figura 4.13 – Média e desvio padrão do caudal no 1º evento de precipitação para todas as formas de parcelas com comprimento até 1,3 metros, ver Quadro 3.5. ....	37
Figura 4.14 – Média e desvio padrão do caudal no 2º, 3º e 4º evento de precipitação para todas as formas de parcelas encontradas no Quadro 3.5.....	37

---



---

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Volume de precipitação sobre cada parcela para um evento de precipitação com duração de 3 minutos. ....	17
Quadro 3.2 – Parâmetros do modelo de infiltração de Horton para as três parcelas e para os quatro eventos de precipitação. ....	21
Quadro 3.3 – Valores dos parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade. ....	23
Quadro 3.4 – Parâmetros do modelo de infiltração de Horton utilizados na análise da influência da forma das parcelas no escoamento superficial. ....	24
Quadro 3.5 – Dimensões das várias parcelas utilizadas no modelo para o estudar a influência da forma das parcelas no escoamento superficial. ....	24
Quadro 4.1 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe, relativo ao ajuste aos hidrogramas observados pelos hidrogramas simulados pelo modelo da onda cinemática. ....	31
Quadro 4.2 – Análise de sensibilidade do modelo de escoamento superficial ao coeficiente de rugosidade de Manning, no ajuste aos valores experimentais, traduzida pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe. ....	33
Quadro 4.3 – Análise de sensibilidade do modelo de escoamento superficial à inclinação, no ajuste aos valores experimentais, traduzida pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe. ....	33

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento da dissertação

O processo de precipitação-escoamento é importante no ciclo hidrológico, e respeita à transformação de uma certa quantidade de precipitação em escoamento superficial. É de fundamental importância para o projeto de obras de engenharia, dimensionadas de modo a armazenar um determinado volume de escoamento superficial ou o caudal máximo de escoamento superficial.

Associado ao escoamento superficial, ocorre o transporte de partículas do solo. Além das partículas de solo, o escoamento superficial transporta nutrientes e matéria orgânica, que contribuem para a poluição dos cursos de água.

Na modelação do escoamento superficial, normalmente o objetivo é prever o caudal de ponta decorrente de uma certa quantidade de precipitação. Modelos de transporte de sedimentos, por sua vez, dependem muito do escoamento superficial (caudal de ponta) estimado pelos modelos de precipitação-escoamento. Portanto, na modelação destes processos em conjunto ou separados, é importante um conhecimento sobre os processos envolvidos na geração do escoamento superficial bem como também os mecanismos da erosão. Requer ainda o conhecimento de certas características fisiográficas das bacias hidrográficas que influenciam a dinâmica do escoamento superficial e consequentemente o transporte de sedimentos.

A forma é uma das características fisiográficas das bacias que influencia o escoamento superficial, tanto em áreas rurais como urbanas. Em particular, a forma das bacias pode favorecer variações na distribuição espacial da intensidade de precipitação, que por sua vez influenciam o escoamento superficial. Muitos modelos de precipitação-escoamento utilizam o tamanho da bacia como principal fator condicionante do escoamento superficial. Contudo, a forma das bacias tem sido pouco utilizada na modelação deste processo.

## 1.2 Objetivos da dissertação

O presente trabalho pretende analisar o efeito da forma da bacia hidrográfica no processo de precipitação-escoamento e também no transporte de sedimentos, através de experiências

laboratoriais e modelação numérica. Utilizou-se um modelo físico laboratorial e um modelo matemático para abordar este problema, com os seguintes objetivos:

- Analisar o efeito da forma no escoamento superficial e transporte de sedimentos numa instalação experimental, recorrendo a um simulador de chuva e três parcelas retangulares de terra;
- Comparar os resultados experimentais de escoamento superficial com os de um modelo matemático de precipitação-escoamento, fazendo também uma análise de sensibilidade para verificar qual a influência dos parâmetros do modelo na modelação;
- Utilizar o modelo para simular várias parcelas com diferentes formas e analisar qual o efeito que diferentes formas das parcelas exercem na modelação do escoamento superficial no que diz respeito à previsão do caudal de ponta, início e fim do escoamento superficial.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A dissertação foi dividida em 5 capítulos:

- No primeiro capítulo é feito um enquadramento ao problema, a definição dos objetivos e a estrutura da dissertação;
- O segundo capítulo expõe a revisão bibliográfica sobre o processo de precipitação-escoamento e transporte de sedimentos, fatores que influenciam estes processos e também aspetos relacionados com estudos laboratoriais e o modelo da onda cinemática;
- O terceiro capítulo descreve a instalação experimental, com ênfase nos componentes do simulador de chuva e nas características das parcelas. São abordadas as equações que descrevem o escoamento superficial e a infiltração, o método de solução do modelo, os parâmetros utilizados na análise de sensibilidade e também as formas das parcelas utilizadas no estudo;
- O quarto capítulo expõe os resultados experimentais e numéricos, com uma análise e discussão sobre os mesmos;
- No quinto capítulo encontram-se as conclusões referentes ao problema em estudo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Processo de precipitação-escoamento**

#### **2.1.1 escoamento superficial e aplicações práticas**

O processo de precipitação-escoamento é importante no ciclo hidrológico, e respeita à transformação de uma certa quantidade de precipitação em escoamento superficial (e.g. Todini 1988). O estudo dos processos envolvidos reveste-se de complexidade que decorre da interação entre os vários processos envolvidos no ciclo hidrológico e das limitações das técnicas de medição hidrológica (e.g. Singh 1988; Beven 2012).

A previsão do escoamento superficial (nomeadamente o caudal de ponta) é de grande importância para as pessoas e o ambiente, visto que aplicações práticas do conhecimento deste processo podem ser encontradas em: drenagem de águas pluviais, rega, dimensionamento de estruturas hidráulicas, tratamento das águas residuais, controle das cheias, técnicas de controle da erosão (e.g. de Lima 1992).

#### **2.1.2 Fatores que afetam a resposta hidrológica de bacias hidrográficas**

Normalmente o sistema hidrológico é simplificado na forma de escoamento em bacias hidrográficas (Singh 1988). A Figura 2.1 mostra uma representação dos principais processos que afetam o escoamento numa bacia hidrográfica. Outros fatores como a radiação solar, vento, temperatura e condições antecedentes de humidade afetam a evapotranspiração e a infiltração, que consequentemente influenciam a resposta hidrológica das bacias (Wei e Larson 1971). A bacia hidrográfica possui características (fatores fisiográficos) que afetam o escoamento. Alguns destes fatores são: área, forma, inclinação e orientação da bacia, vegetação e construções, tipo de solo, capacidade de transporte e armazenamento, densidade de drenagem (e.g. Wei e Larson 1971).

Uma descrição mais detalhada sobre a precipitação e as perdas relacionadas, pode ser encontrada em Singh (1989).

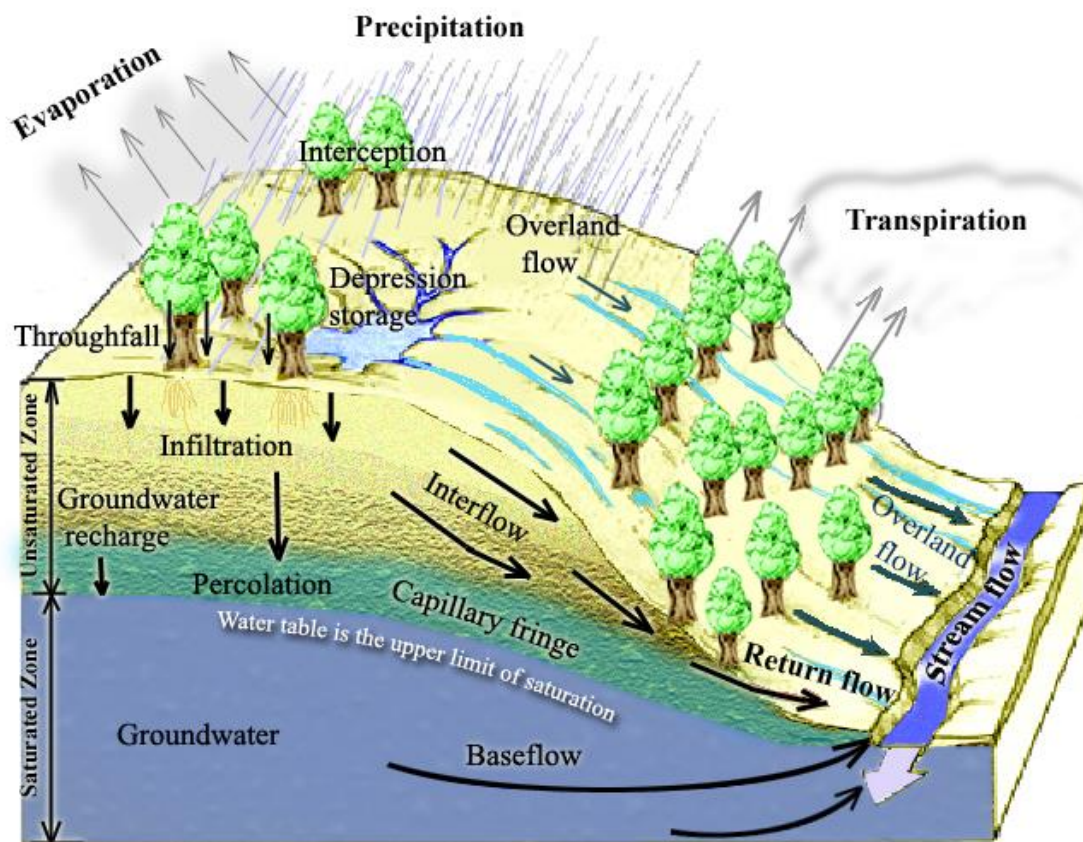


Figura 2.1 – Representação simplificada dos processos envolvidos no ciclo hidrológico (e.g. Beven 2012).

### 2.1.3 Modelação do processo de precipitação-escoamento

A modelação deste processo, do ponto de vista de uma abordagem de sistema, consiste em estabelecer uma relação entre a precipitação e o escoamento, que pode ser utilizada para prever eventos futuros ou reconstruir eventos decorridos no passado. A bacia hidrográfica funciona como elo de ligação entre a precipitação e o escoamento (e.g. Singh 1988). Na forma mais simples, este processo pode ser representado como se segue na Figura 2.2.

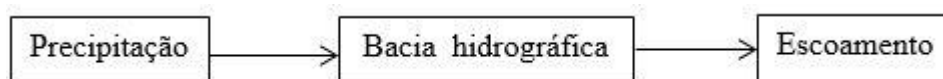


Figura 2.2 – Representação esquemática do processo de precipitação-escoamento, adaptado de Wei e Larson (1971).

A bacia hidrográfica é um sistema natural muito complexo, dificultando o seu estudo de forma detalhada. Algumas simplificações são necessárias, se queremos entender e modelar alguns aspetos do seu comportamento. Simplificações referem-se à substituição da bacia hidrográfica em estudo, por um modelo de estrutura semelhante, mas muito mais fácil de trabalhar. Modelos de precipitação-escoamento podem ser divididos em (e.g. Woolhiser 1973): modelos laboratoriais e modelos simbólicos ou formais

De um modo geral modelos laboratoriais são a representação de um sistema real por um sistema que é assumido ter as mesmas propriedades, mas menos complicado que o sistema real. Como exemplos de modelos laboratoriais utilizados na investigação dos processos de precipitação-escoamento, podem ser citados as bacias hidrográficas simuladas em laboratório e os simuladores de chuva. Modelos simbólicos ou formais podem ser definidos como a representação de processos físicos por expressões matemáticas. Modelos simbólicos de precipitação-escoamento, por sua vez podem ser divididos em teóricos, conceptuais e empíricos (Singh 1988).

De acordo com Todini (1988) método racional pode ser visto como a primeira tentativa de abordar este processo. O método racional e o método do hidrograma unitário são talvez os modelos empíricos mais populares que relacionam a precipitação e o escoamento (Singh 1988).

Com o desenvolvimento computacional e a necessidade de resolver problemas onde modelos empíricos não são válidos, um grande número de modelos conceptuais de precipitação-escoamento vem sendo desenvolvidas. Em Singh (1988) e Beven (2012) podem ser encontrados vários modelos de precipitação-escoamento, bem como também a sua classificação. Em Singh e Woolhiser (2002) podem ser encontrados outros modelos de precipitação-escoamento e também modelos que descrevem vários processos do ciclo hidrológico.

#### **2.1.4 Modelação do processo da infiltração**

De uma forma geral, a infiltração pode ser definida como a entrada da água no solo, através da superfície. Fatores que afetam este processo podem ser agrupados em (e.g. Singh 1989): características da precipitação, características superficiais, características do solo, condições antecedentes de humidade do solo e de uma forma menos importante as características físicas da água.

Na transformação da precipitação em escoamento ocorrem perdas por evapotranspiração, interceção, retenção superficial e infiltração. Vários modelos hidrológicos consideram atualmente estes processos na modelação do escoamento superficial. Contudo, em certas

circunstâncias, modelos simplificados que consideram apenas a infiltração são considerados adequados na modelação do processo de precipitação-escoamento (Singh 1988).

É necessário estabelecer uma relação entre a precipitação, a infiltração e o escoamento. Na modelação do escoamento superficial, normalmente é considerado o caso em que a intensidade de precipitação é maior do que a capacidade de infiltração da água no solo, também chamado de escoamento Hortoniano (Mein e Larson 1971).

O problema da modelação da infiltração é simplificado, utilizando uma abordagem de sistema. Neste caso é assumido que a taxa de infiltração da água no solo pode ser representada através de uma função simples, potência ou exponencial. Os parâmetros nestas funções são determinados através de dados observados. Isto implica que as principais limitações destes modelos residem no facto dos parâmetros serem determinados através de ajustes nos valores observados. Contudo é considerado que o modelo de infiltração de Horton ajusta-se bem aos resultados experimentais (Mein e Larson 1971; Singh 1989). Uma discussão sobre alguns destes modelos (empíricos e conceptuais) pode ser vista em Singh (1989).

### **2.1.5 Transporte de sedimentos**

O transporte de sedimentos (erosão) está associado ao processo de precipitação-escoamento. Depende do efeito combinado do impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial (Kilinc e Richardson 1973).

Sedimento pode ser definido como um poluente ou um carregador de poluentes. A modelação do transporte de sedimentos ultimamente tem recebido muita atenção devido á preocupação com a qualidade ambiental e o desejo de controlar a poluição de fontes não pontuais. A estimativa do transporte de sedimentos é de grande importância no transporte de poluentes, dimensionamento de canais estáveis, dimensionamento de práticas de conservação do solo, dimensionamento de barragens e reservatórios, avaliação da perda de nutrientes (e.g. Singh 1989).

De acordo com de Lima et al. (2003), qualquer fator que afeta a dinâmica do escoamento superficial, afeta também o transporte de sedimentos. Em Singh (1989) podem ser encontrado um relato acerca destes fatores, sobre os mecanismos da erosão do solo, como também modelos matemáticos que descrevem a erosão e seus mecanismos.

---

### **2.1.6 Representação geométrica das bacias na modelação do processo de precipitação-escoamento**

Como foi referido acima, é necessário simplificar a bacia hidrográfica para entender aspetos do seu comportamento e também permitir a aplicação da tecnologia e modelos existentes. Aqui estas simplificações referem-se à representação geométrica (forma, inclinação, comprimento axial, tamanho e orientação) das bacias hidrográficas na modelação. Alguns métodos de simplificação da geometria da bacia hidrográfica consistem em dividir a bacia em subáreas ou elementos, mesmo que ela seja homogénea. Alguns dos elementos geométricos que vêm sendo utilizados são: seção convergente, seção divergente, seção triangular, planos e canais. Estes elementos são utilizados individualmente ou em combinação para representar a geometria das bacias na modelação (Singh 2001).

Normalmente a forma da bacia, enquanto fator geométrico ou fisiográfico, influencia o escoamento superficial, eventualmente por influência da distribuição espacial da precipitação (que por sua vez influencia o escoamento superficial). Por este motivo, é necessário que para além do tamanho, comprimento axial e inclinação, que a forma das bacias seja também considerada na modelação do processo de precipitação-escoamento (Wei e Larson 1971).

A forma das bacias hidrográficas pode ser expressa por vários parâmetros, como o coeficiente de compacidade, fator de forma, índice de circularidade, razão de alongação (e.g. Black 1972; Lane et al. 1975). Uma investigação da relação destes parâmetros com a resposta das bacias hidrográficas pode ser importante na melhoria da estimativa do caudal de ponta, dos tempos característicos e da eficiência de drenagem (Wei e Larson 1971; Lane et al. 1975). Lane et al. (1975) indicaram a importância de estudar a relação entre estes parâmetros e a resposta hidrológica das bacias, mas também propuseram que modelos hidrológicos calibrados fossem utilizados na investigação da influência da forma das bacias no escoamento superficial.

Şensoy e Kara (2014) conduziram experiências em parcelas de campo, em condições de chuva natural, para investigar o efeito da forma da superfície das encostas no escoamento superficial e na erosão do solo. Eles concluíram que inclinações uniformes produzem maior volume de escoamento e erosão que as outras formas. Foi na forma côncava que verificaram o menor volume de escoamento e erosão do solo. Chegaram ainda à conclusão de que o solo erodido era composto maioritariamente por partículas finas ( $\leq 2$  mm) na forma uniforme, enquanto que a forma convexa e côncava apresentaram grande variabilidade na distribuição do tamanho das partículas.

De uma forma semelhante, Rieke-Zapp e Nearing (2005) conduziram experiências em laboratório, para estudar a influência da forma da superfície das encostas nas taxas e padrões de erosão. Concluíram que essa forma tem influência significativa nos padrões de sulcos,



transporte de sedimentos e geração de escoamento superficial. Resultado semelhante foi verificado por Şensoy e Kara (2014), onde obtiveram maior volume de sedimentos transportados na forma uniforme e convexa em relação à forma côncava.

Black (1972) avaliou em laboratório, o efeito que certas características da bacia hidrográfica exercem sobre os parâmetros do hidrograma. Este autor utilizou um parâmetro conhecido por excentricidade, para expressar a forma dos modelos das bacias utilizadas na investigação. Indicou que a forma da bacia hidrográfica afeta o caudal de ponta e certos parâmetros dos hidrogramas, mas que não tem um efeito tão grande se comparado com outros fatores, como por exemplo a inclinação. Concluiu ainda que a excentricidade da bacia hidrográfica é uma expressão facilmente medida e útil da forma das bacias hidrográficas, em que esta característica afeta o caudal de ponta e certos parâmetros dos hidrogramas.

Wei e Larson (1971) representaram a forma de quatro bacias hidrográficas através do fator de forma de Horton, para investigar o efeito da forma nos hidrogramas. Concluíram que a forma da bacia influencia a forma dos hidrogramas. Verificaram que numa bacia hidrográfica compacta (fator de forma elevado) o escoamento começa mais rapidamente do que numa bacia mais alongada (fator de forma baixo). Verificaram ainda que uma bacia compacta produz maior caudal de ponta e com menor tempo para atingir o caudal de ponta em relação a uma bacia alongada, que produz menor caudal de ponta e com maior tempo para atingir este caudal.

Goff e Gentry (2006) estudaram o efeito que certas características da bacia hidrográfica exercem sobre o caudal de ponta e também no planeamento e gestão de bacias de detenção. Utilizaram um fator de forma que relaciona a área com o quadrado do comprimento da bacia. Mostraram que a bacia mais alongada produzia menor caudal de ponta, do que a forma mais compacta. Eles indicaram também que a detenção é menos efetiva em bacias hidrográficas com forma alongada, do que em bacias com forma mais arredondada.

## **2.2 Modelo laboratorial**

### **2.2.1 Enquadramento**

A investigação de processos hidrológicos à escala de bacias hidrográficas e em condições naturais é difícil e consome muito tempo, devido ao tamanho físico do sistema, à aquisição de dados, à variabilidade temporal e espacial dos processos hidrológicos e também das propriedades hidráulicas do sistema (Singh 1975a). Sem o controle e conhecimento das variáveis relevantes para o sistema, é difícil prever a relação e o efeito que certos processos ou propriedades exercem sobre outros. Por razões práticas, Chery (1966) descreveu e testou um

modelo constituído por dois componentes: um dispositivo para simular chuva e uma área de drenagem reduzida em baixo do dispositivo. De acordo com os resultados obtidos, este autor propôs uma investigação mais aprofundada sobre estes modelos de modo a estabelecer relações entre a precipitação e o escoamento. Investigação sobre o tamanho e forma da área de drenagem e construção de simuladores de chuva para operar em laboratório como também em campo, vem sendo realizada por diversos autores (e.g. Bowyer-Bower e Burt 1989; Navas et al. 1990; Cerdà et al. 1997; Ries et al. 2013).

De acordo com Singh (1975a), estes tipos de modelos devem ter em conta as características mais importantes encontradas em condições naturais, caso contrário, não se pode ter uma compreensão sobre o comportamento real do sistema.

### **2.2.2 Investigação laboratorial**

Investigações laboratoriais, recorrendo a simuladores de chuva, vem sendo amplamente utilizados no estudo do processo de precipitação-escoamento e fatores que afetam este processo, no estudo da erosão e seus mecanismos. São também utilizados na calibração, validação e comparação de modelos baseados em leis físicas, entre outras aplicações.

de Lima e Singh (2002) estudaram em laboratório a influência do padrão da intensidade de precipitação no escoamento superficial. Chegaram à conclusão de que o padrão da intensidade de precipitação influencia de forma significativa o caudal de ponta, o volume de escoamento superficial e também a forma dos hidrogramas.

de Lima et al. (2003) abordaram o mesmo problema em laboratório para estudar a sua influência na erosão. O estudo destes autores indicou que a velocidade e a direção da intensidade de precipitação influencia fortemente os processos da erosão pela água, sendo a maior perda de solo verificada para o caso do movimento de precipitação para jusante do que para montante.

Parsons e Stone (2006) simularam em laboratório cinco chuvadas com padrões de intensidade de precipitação diferentes, aplicadas em três solos diferentes, para estudar o efeito do padrão da precipitação no escoamento superficial e erosão entre sulcos. Referiram que é inadequada a suposição que uma determinada intensidade de precipitação sobre um determinado solo por um determinado período de tempo resulta em uma determinada quantidade de escoamento superficial e erosão. Eles sugeriram ainda a necessidade de uma maior compreensão dos processos de desprendimento e transporte de sedimentos entre sulcos, de modo a modelar a erosão com sucesso em chuvas variando temporariamente.

Poesen e Lavee (1991) avaliaram em laboratório a eficácia da cobertura morta em reduzir o escoamento superficial e a perda de solo. Os resultados destes autores indicam que a eficácia da utilização da cobertura morta como método de controle do escoamento superficial e da erosão, depende da posição e do tamanho da cobertura morta.

De um modo semelhante Montenegro et al. (2013) estudaram em laboratório a influência da cobertura morta na dinâmica do solo e da água, sobre simulação de chuva intermitente. Estes autores indicaram que a cobertura morta e a intermitência influenciam de forma significativa a humidade do solo, a infiltração, a erosão e o escoamento superficial. Obtiveram menor redução do escoamento superficial, para maiores densidades de cobertura morta.

Pereira et al. (2003) analisaram em laboratório o efeito que diferentes caudais e inclinações exercem nas perdas de solo resultantes. Concluíram que as perdas de solo são mais influenciadas pela inclinação do que pelo caudal. Verificaram ainda que com o tempo as taxas de perdas de solo diminuem.

Helming et al. (1998) conduziram um estudo em laboratório, para determinar o efeito da rugosidade superficial nos padrões de escoamento superficial e nas perdas de solo. Concluíram que a rugosidade afeta a distribuição espacial do escoamento, que por sua vez afeta as taxas de perdas de solo.

Singh (1975a) utilizou os resultados experimentais de uma seção convergente, para avaliar o desempenho do modelo da onda cinemática e do modelo de Nash em prever os hidrogramas obtidos em laboratório. A principal diferença entre estes dois métodos de estimativa do caudal é que o modelo da onda cinemática baseia-se nos princípios de conservação da massa e da quantidade de movimento enquanto o modelo de Nash baseia-se no princípio do hidrograma unitário. Os resultados experimentais demonstraram que o modelo da onda cinemática é melhor a prever os hidrogramas experimentais do que o modelo de Nash.

### **2.2.3 Vantagens e limitações**

Investigações laboratoriais constituem uma ferramenta importante no entendimento de processos hidrológicos. As principais vantagens destes tipos de modelos é que permitem estudar em condições controladas e repetir as experiências em curtos espaços de tempo (Navas et al. 1990; Abrantes et al. 2015).

Apesar da vasta utilização de modelos laboratoriais como ferramentas de pesquisa e das vantagens que lhe estão associados, estes modelos possuem algumas limitações. De acordo com

---

---

Wainwright et al. (2000) a limitação mais importante destes modelos é em que medida é que podem reproduzir as características encontradas na natureza. Isto pode estar relacionado com a dificuldade em reproduzir as características das chuvas como flutuações de intensidade, tamanho e distribuição das gotas de chuva, velocidade e energia cinética, entre outros. Existe também dificuldades em extrapolar os resultados experimentais para as condições de campo, tendo em vista a área em que foram conduzidas as experiências (Navas et al. 1990). Uma discussão mais pormenorizada (vantagens, limitações e desafios) sobre estudos em escalas reduzidas com recurso a simuladores de chuva, pode ser encontrada em Wainwright et al. (2000) e Ries et al. (2013).

## **2.3 Modelo da onda cinemática**

### **2.3.1 Teoria da onda cinemática**

Uma explicação completa e desenvolvimento da teoria da onda cinemática foi dada por Lighthill e Whitham (1955a, b), que a utilizaram para descrever o movimento de cheias em rios longos e fluxo de tráfego em estradas longas. Segundo Lighthill e Whitham (1955a, b), num sistema de fluxo unidimensional, existem ondas cinemáticas quando puder ser assumido que há uma relação funcional entre a posição, concentração e fluxo, sendo que a propriedade da onda é derivada apenas da equação da continuidade. A teoria da onda cinemática é expressa matematicamente pela lei da conservação da massa através da equação da continuidade e pela relação entre fluxo-concentração através da equação da conservação da quantidade de movimento (Beven 1979). A junção destas equações dá origem a uma equação de derivadas parciais de primeira ordem, com apenas um sistema de características da onda. Isto implica que as ondas cinemáticas propagam-se apenas no sentido de montante para jusante (Singh 2002). Segundo Ponce (1991) e Di Pietro et al. (2003), o modelo da onda cinemática é apenas convectivo, não podendo descrever os efeitos dispersivos e difusivos, mas sofre alterações na sua forma devido à não-linearidade do modelo. Contudo as ondas são dispersivas e difusas no caso de escoamento devido à precipitação (Singh 2002).

### **2.3.2 Validade da teoria da onda cinemática**

A onda cinemática é apenas uma das muitas simplificações da onda dinâmica. Com o desenvolvimento desta teoria muitas questões foram levantadas quanto à sua aplicabilidade para resolver problemas hidrológicos (Miller 1984). Um critério desenvolvido por Lighthill e Whitham (1955a), foi baseado no número de Froude ( $Fr$ ), onde mostraram que para  $Fr < 1$ , as

ondas cinemáticas eram dominantes em relação às ondas dinâmicas. Seguidamente vários autores abordaram este tema, onde foram desenvolvidos outros critérios tendo em conta as características do escoamento e condições de fronteira, como também diferentes áreas de aplicação da teoria (e.g. Woolhiser e Liggett 1967; Ponce e Simons 1977; Ponce et al. 1978; Morris e Woolhiser 1980; Vieira 1983; Di Cristo et al. 2013).

Em Miller (1984) e Singh (2001) pode ser encontrada de forma mais detalhada uma discussão sobre alguns destes critérios e erros associados à teoria da onda cinemática.

### **2.3.3 Aplicações do modelo da onda cinemática**

Apesar do debate sobre a validade da teoria da onda cinemática persistir nos dias de hoje, ele vem sendo aplicado na modelação de vários problemas hidrológicos, recursos hídricos e ambientais. Singh (2001) aborda várias áreas em que o modelo da onda cinemática vem sendo utilizado.

De acordo com Singh (2002), os motivos da teoria ser atrativa reside no facto de ser conceitualmente aceite, simples e flexível. Aqui serão apenas abordados alguns dos estudos relacionados com a modelação do processo precipitação-escoamento e processos associados.

Foster et al. (1968) utilizaram o modelo da onda cinemática para prever o escoamento superficial em pequenas parcelas de campo em que consideraram a infiltração constante no tempo e no espaço. Eles consideraram que a infiltração ocorreu apenas durante o período de precipitação. Verificaram que o modelo conseguiu prever com boa precisão o escoamento superficial obtido das parcelas de campo.

De um modo semelhante, considerando o processo de infiltração constante no espaço, Abrantes et al. (2015) avaliaram o desempenho do modelo em prever escoamento superficial devido a chuvas intermitentes, em que consideraram diferentes densidades de cobertura morta do solo. Comparando os resultados do modelo com os experimentais, verificaram um bom ajuste entre os valores simulados e observados, sobretudo para a situação de solo sem cobertura.

Smith e Woolhiser (1971) desenvolveram um modelo onde combinaram as equações da onda cinemática com a equação de infiltração de Richard. Para estudar o desempenho do modelo utilizaram dados experimentais. Concluíram que o modelo pode descrever o comportamento hidrológico de pequenas bacias hidrográficas, se certas propriedades hidráulicas de meios porosos não saturados puderem ser obtidas.

---

Com o intuito de estudar escoamento superficial em superfícies permeáveis, de Lima (1992) acoplou um modelo de transporte de água no solo baseado na lei de Darcy com as equações da onda cinemática. Foram conduzidas experiências em laboratório em dois solos com propriedades físicas diferentes para testar o desempenho do modelo. O modelo desenvolvido foi capaz de prever com boa aproximação os processos em estudo.

Deng et al. (2005) desenvolveram um modelo constituído pelas equações da onda cinemática e uma equação de advecção para o transporte de solutos (neste caso cloreto de sódio). Verificaram um bom ajuste entre os hidrogramas e a concentração de soluto obtidos pelo modelo em relação aos resultados experimentais.

Deng et al. (2008) desenvolveram um modelo baseado na teoria da onda cinemática para descrever o escoamento superficial acoplado com uma equação de advecção para descrever a erosão do solo provocada pela chuva e transporte de sedimentos. Experiências laboratoriais mostraram a eficácia do modelo em prever os hidrogramas e o transporte de sedimentos.

A teoria da onda cinemática vem sendo utilizado como base de vários modelos que operam à escala da bacia hidrográfica. Alguns exemplos podem ser o KINEROS (Smith et al. 1995), TOPKAPI (Ciarapica e Todini 2002) e TOPMODEL (Beven 2012).

Para além de ser acoplado com outros modelos (erosão, infiltração, etc.) e de operar em diferentes escalas hidrológicas, o modelo da onda cinemática vem sendo aplicado na investigação de propriedades ou fatores que influenciam o escoamento superficial.

Woolhiser et al. (1996) estudaram o efeito da variação espacial da condutividade hidráulica no escoamento superficial, através da teoria da onda cinemática. Chegaram à conclusão que os hidrogramas são fortemente afetados pela distribuição espacial da condutividade hidráulica. Verificaram também que quando termina o período de chuva, a infiltração tem um impacto maior no volume, caudal de ponta e tempo para atingir o caudal de ponta, para casos em que a condutividade hidráulica aumenta a jusante.

de Lima e Singh (2002) utilizaram a teoria da onda cinemática para investigar a influência das tempestades no escoamento superficial. Eles chegaram à conclusão de que o padrão de precipitação, comprimento, velocidade e direção das tempestades, influenciam de forma significativa o caudal de ponta e a forma dos hidrogramas.

Rai et al. (2010) incorporaram a variabilidade da rugosidade superficial no modelo da onda cinemática. Baseado na forma dos hidrogramas de quatro bacias com tamanhos e condições climáticas diferentes, eles observaram que a forma dos hidrogramas foi melhor preservada na modelação do escoamento superficial tendo em conta a variabilidade da rugosidade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição experimental

Para estudar o efeito que a forma da área de drenagem exerce sobre o escoamento superficial e o transporte de sedimentos, foram conduzidas experiências em laboratório. As experiências foram realizadas no Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente do Departamento de Engenharia Civil, com recurso a três parcelas de terra e um simulador de chuva. A Figura 3.1 mostra a representação esquemática da instalação experimental, incluindo os equipamentos e variáveis hidrológicas envolvidas nas experiências laboratoriais.

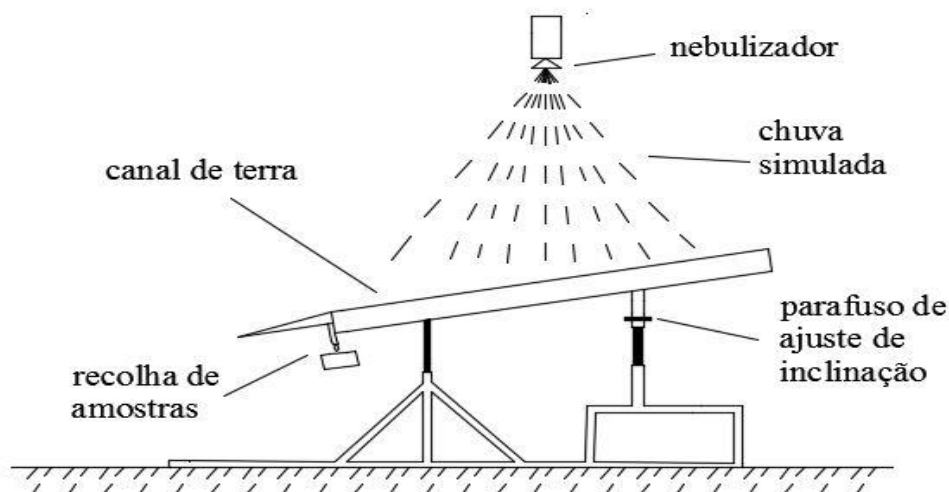


Figura 3.1 – Representação esquemática (vista lateral) da instalação experimental, juntamente com as variáveis hidrológicas envolvidas na experiências.

##### 3.1.1 Características das parcelas

A Figura 3.2 mostra a representação esquemática das parcelas de terra utilizadas neste estudo. Foram atribuídas as letras A, B e C para identificar as parcelas, instaladas usando canais de terra cujas dimensões (em metros) são respetivamente (comprimento; largura; altura): (0,5; 1; 0,07), (0,7; 0,7; 0,07) e (1; 0,5; 0,07). Na extremidade (de jusante) dos canais de terra, existe uma placa de metal com altura de 0,05 m. O escoamento superficial e o transporte de sedimentos foram monitorados a jusante de cada parcela através da recolha de amostras em cada 15 segundos desde o início até ao fim de cada evento de precipitação (com a duração de 3 minutos),

fazendo 2 recolhas também de 15 em 15 segundos depois do final dos eventos de precipitação. Em toda a área das parcelas o escoamento é unidirecional. As parcelas foram fixadas sobre uma estrutura de suporte, que permitiu definir uma inclinação de 9% para cada uma delas.

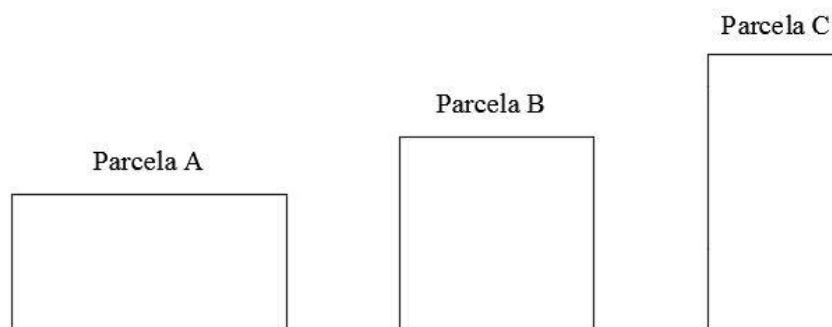


Figura 3.2 – Representação esquemática da forma das parcelas, com 0,50 m<sup>2</sup> de área.

### 3.1.2 Caraterísticas do solo

O solo utilizado nas experiências laboratoriais foi recolhido nas margens do Rio Mondego (Coimbra, Portugal), tendo sido classificado de acordo com Abrantes et al. (2015), como o de textura franco-arenosa composta por 84% de areia, 9% de limo e 7% de argila. O solo foi peneirado em malha de 2 mm para remover pedras grosseiras, espalhado de forma uniforme sobre as parcelas, em que não houve nenhuma compactação, sendo o solo em excesso removido por uma lâmina que também serviu para nivelar a altura do solo de modo a obter uma superfície “lisa” e uma inclinação de 9% em relação ao plano horizontal. A altura de solo nas parcelas foi de 0,05 m.

### 3.1.3 Caraterísticas do simulador

O simulador de chuva utilizado neste estudo foi composto por três componentes: um aspersor, uma estrutura de suporte motorizada, e conexão com o tanque de abastecimento de água e o sistema de bombeamento.

Uma representação esquemática da configuração do simulador de chuva pode ser visto na Figura 3.3, em que as características do aspersor e da estrutura de suporte motorizada podem ser encontradas em Abrantes et al. (2015). A estrutura de suporte permitiu o movimento do simulador de chuva na direção longitudinal ao longo das parcelas, onde para cada uma foi definido uma posição do simulador de chuva de modo a garantir que o volume de precipitação



sobre cada parcela fosse o mesmo. A altura do nebulizador foi aproximadamente 2,4 metros em relação ao centro geométrico das parcelas. A pressão do sistema de bombeamento foi mantida constante em 3,5 (bar). Devido ao facto de o tipo de solo utilizado em cada parcela ser o mesmo, não é esperado que a qualidade da água utilizada na simulação de chuva influencie a comparação das respostas hidrológicas entre as parcelas, no que diz respeito ao escoamento superficial e transporte de sedimentos (de Lima et al. 2003). A água utilizada para alimentar o sistema é água de torneira cujas as características podem ser encontradas em Águas de Coimbra (2017).

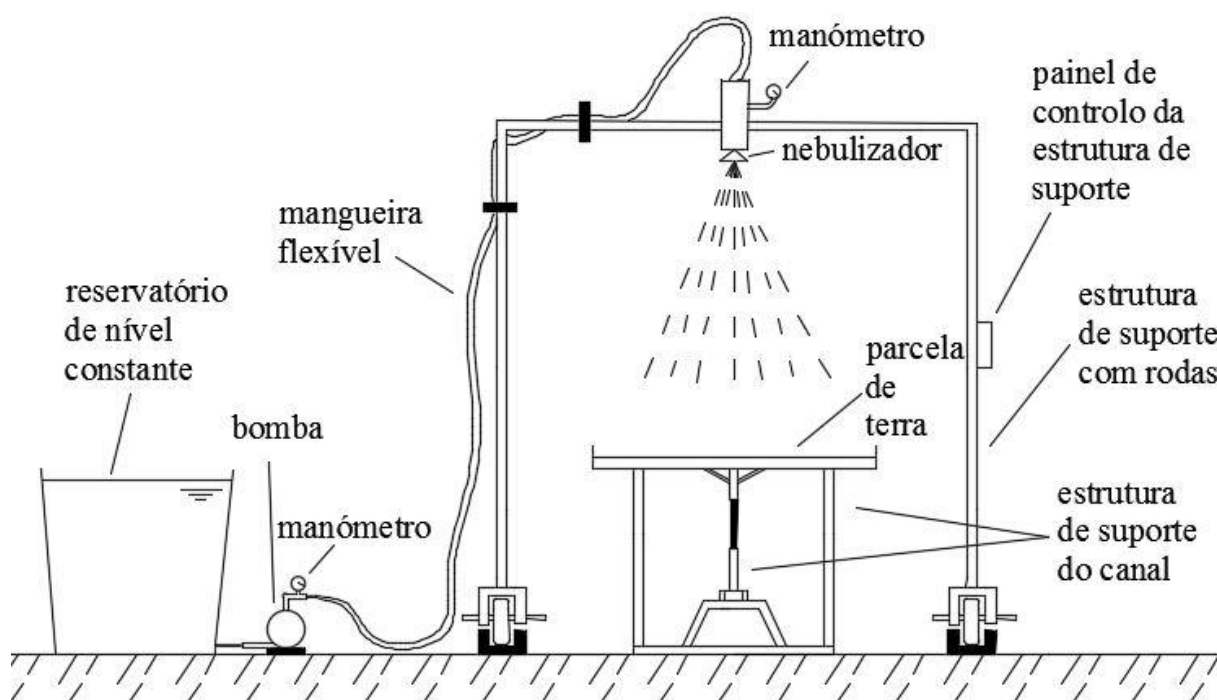


Figura 3.3 – Representação esquemática dos componentes do simulador de chuva.

### 3.1.4 Procedimento experimental

As experiências laboratoriais foram faseadas, em que foram utilizados diversos recipientes e equipamentos durante cada fase (ver ANEXO A).

Numa primeira fase foi colocado uma película impermeável em cada parcela de modo a medir o volume de precipitação. Com vários ensaios realizados foram definidas três posições diferentes do simulador de chuva para cada parcela de modo a obter um mesmo volume de precipitação. No Quadro 3.1 podem ser vistos os resultados da precipitação em cada parcela. Partindo do pressuposto que não há flutuação na intensidade da chuva gerada pelo simulador,

é esperado que eventos de precipitação com duração de 3 minutos produzam o mesmo volume de precipitação sobre cada parcela.

Apesar da tentativa de obter um mesmo volume de precipitação para as três parcelas, houve uma diferença nos valores obtidos. Sendo uma diferença muito pequena, não é esperado que influencie de forma significativa na comparação hidrológica entre as parcelas.

Quadro 3.1 – Volume de precipitação sobre cada parcela para um evento de precipitação com duração de 3 minutos.

Parcela	Volume de precipitação (ml)
A	2863,4
B	2842,5
C	2814,7

Numa segunda fase foram colocados recipientes com boca circular sobre cada parcela, com distâncias semelhantes entre os recipientes, para obter a distribuição espacial da intensidade de precipitação (ver ANEXO B, Quadros B1, B2 e B3). A Figura 3.4 mostra a distribuição espacial da intensidade de precipitação nas três parcelas. A distribuição espacial da intensidade de precipitação foi diferente em cada parcela, contudo não houve muita diferença no escoamento superficial em cada uma.

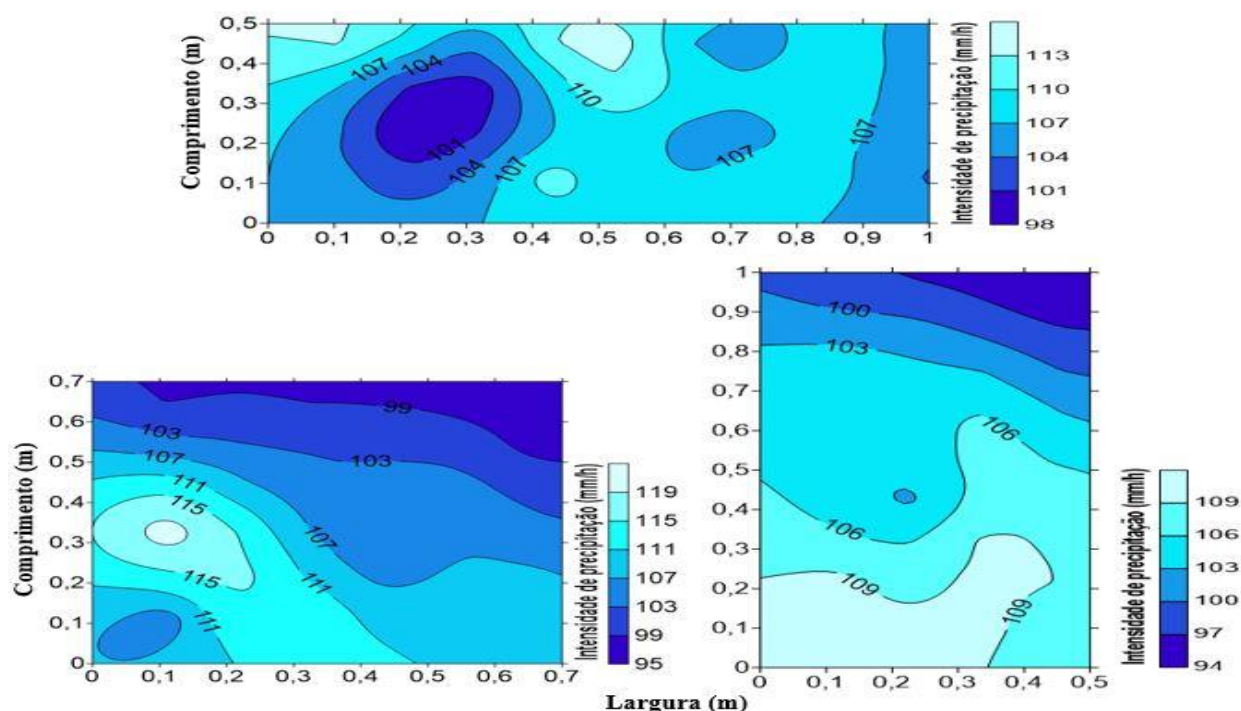


Figura 3.4 – Distribuição espacial da intensidade de precipitação nas parcelas.

Numa terceira fase foi removida a película impermeável e também o solo, visto que as fases realizadas acima faziam com que houvesse compactação do solo devido ao impacto das gotas de chuva. Foi colocado solo novamente sobre as parcelas e simulado eventos de precipitação. Em cada parcela foram simulados 4 eventos de precipitação com duração de 3 minutos cada um e com um intervalo de 16 minutos entre cada evento. As amostras recolhidas foram pesadas e depois levadas a uma estufa de modo a obter os sedimentos carreados.

### 3.2 Modelação do escoamento superficial

Para um bom entendimento dos processos hidrológicos é importante uma abordagem mista, onde as experiências laboratoriais e modelos baseados em leis físicas devem ser aplicados em simultâneo na resolução de problemas. A aplicação da teoria da onda cinemática para modelar o processo de precipitação-escoamento à escala de parcelas, normalmente requer a descrição das equações da onda cinemática, descrição da geometria, dados relacionados com o padrão da precipitação e condições iniciais e de fronteira. Com o problema formulado, é necessário um método de solução do mesmo. Contudo associado ao processo de modelação do escoamento superficial pode existir alguma incerteza ou variabilidade nos parâmetros, que nalguns casos conduz a erros apreciáveis na estimativa do escoamento superficial (Hamby 1994).

#### 3.2.1 Equações do modelo da onda cinemática e do processo de infiltração

As equações da onda cinemática a uma dimensão são derivadas através de simplificações nas equações da onda dinâmica a uma dimensão, geralmente conhecidas como as equações de Saint-Venant (Miller 1984). Essas simplificações podem ser encontradas em muitos dos artigos aqui citados Lighthill e Whitham (1955a) e Miller (1984).

O escoamento superficial sobre uma superfície permeável como resultado da precipitação útil pode ser expresso pela equação da continuidade a uma dimensão (de Lima 1992) na seguinte forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = p_u \quad (1)$$

em que  $h$  = altura do escoamento superficial (m),  $q$  = fluxo volumétrico de água por unidade de largura da parcela ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ),  $p_u$  = precipitação útil ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $t$  = tempo (s) e  $x$  = distância no sentido do escoamento superficial ao longo da parcela (m).

Existe uma variedade de leis de fluxos cinemáticos aplicados em vários processos do ciclo hidrológico (Singh 2002). Quanto ao processo de precipitação-escoamento, a lei é geralmente escrita em termos de uma relação entre o fluxo volumétrico e a altura na seguinte forma:

$$q = \alpha h^m \quad (2)$$

em que  $\alpha$  = é o parâmetro de resistência da onda cinemática ( $m^{1/3}/s$ ) e  $m$  = parâmetro adimensional, relacionado com o regime de escoamento.

Em aplicações práticas e assumindo regime de escoamento turbulento,  $m$  toma o valor de 5/3 e o parâmetro de resistência da onda cinemática pode ser estimado da seguinte forma tendo em conta a equação de Manning (Singh 2002):

$$\alpha = \frac{S^{0,5}}{n} \quad (3)$$

em que  $S$  = inclinação da linha de energia (m/m) e  $n$  = coeficiente de rugosidade de Manning ( $s/m^{1/3}$ ).

A inclinação da linha de energia utilizada no modelo foi de 0,9 (m/m), o mesmo que a inclinação da superfície do solo.

O valor do coeficiente de rugosidade de Manning utilizado foi de 0,074 ( $s/m^{1/3}$ ). Foi obtido através de uma média aos valores do coeficiente de rugosidade estimados por Abrantes et al. (2015), para a situação de solo sem cobertura morta.

A incorporação da equação (2) na equação (1) produz uma equação com apenas uma variável para ser determinada, sendo expressa na seguinte forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + m\alpha h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = p_u \quad (4)$$

As condições iniciais e de fronteira a montante impostas na equação (4) são:

$$h(x, 0) = 0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (5)$$

$$h(0, t) = 0 \quad 0 \leq t \leq \infty \quad (6)$$

em que  $L$  = comprimento total da superfície no sentido do escoamento (m).

A precipitação útil utilizada na modelação do escoamento superficial foi estimada da seguinte forma:

$$p_u = i - f(t) \quad (7)$$

em que  $i$  = intensidade de precipitação sobre as parcelas de terra (m/s) e  $f$  = taxa de infiltração da água no solo (m/s).

Como a dimensão das parcelas é muito pequena, com apenas 0,5 m<sup>2</sup> de área superficial, a intensidade de precipitação foi considerada constante no espaço e no tempo durante os três minutos de precipitação e a taxa de infiltração variando apenas com o tempo.

A intensidade média de precipitação utilizada nas três parcelas foi de 114 mm/h. Este valor foi obtido do Quadro 3.1.

Com os dados experimentais de escoamento superficial e da intensidade de precipitação, foram obtidos os valores da infiltração em função do tempo, tendo-se desprezado quaisquer outras perdas.

As curvas empíricas de infiltração utilizadas na modelação foram obtidas fazendo um ajuste aos resultados experimentais através da equação de Horton, expresso na seguinte forma:

$$f(t) = fc + (fi - fc)e^{-kt} \quad (8)$$

em que  $f(t)$  = taxa de infiltração em função do tempo (m/s),  $fc$  = taxa mínima de infiltração (m/s),  $fi$  = capacidade de infiltração inicial (m/s) e  $k$  = constante de decaimento da capacidade de infiltração do solo. O Quadro 3.2 mostra os valores de  $fi$ ,  $fc$  e  $k$  utilizados na modelação do escoamento superficial para as três parcelas e para os quatro eventos de precipitação. O modelo de infiltração de Horton considera que o parâmetro  $fi$  iguala o valor da intensidade de precipitação, diminuindo a taxa de infiltração desde este valor inicial até um valor final constante,  $fc$ . À medida que vão sendo simulados eventos de precipitação nas parcelas a capacidade do solo em reter a água vai diminuindo, razão pela qual os valores de  $fc$  diminuem com o aumento do escoamento superficial associado a cada evento, em série.

Quadro 3.2 – Parâmetros do modelo de infiltração de Horton para as três parcelas e para os quatro eventos de precipitação.

		$f_i$ (mm/h)	$f_c$ (mm/h)	$k$ (1/h)
Parcela A	1º evento	114	111,05	0,01
	2º evento		69,58	0,03
	3º evento		35,78	0,03
	4º evento		30,16	0,04
Parcela B	1º evento	114	113,46	0,01
	2º evento		78,25	0,04
	3º evento		48,04	0,03
	4º evento		42,29	0,04
Parcela C	1º evento	114	112,62	0,01
	2º evento		74,27	0,03
	3º evento		52,66	0,04
	4º evento		50,44	0,04

### 3.2.2 Solução numérica do modelo

A solução do modelo da onda cinemática pode ser obtida através de métodos numéricos, analíticos, ou através de uma abordagem híbrida (Singh 1975b). Os métodos numéricos vêm sendo utilizados com sucesso na resolução das equações da onda cinemática (de Lima e Singh 2002; Deng et al. 2005). Uma descrição detalhada de vários métodos numéricos utilizados na resolução das equações da onda cinemática, tendo em conta as vantagens e limitações de cada uma pode ser encontrada em Stephenson e Meadows (1986).

Aqui foi utilizado o método explícito de diferenças finitas, baseado no esquema de Lax-Wendroff, expresso na seguinte forma (de Lima e Singh 2002):

$$\begin{aligned}
 h_j^{i+1} = & h_j^i + \Delta t \left( pu_j^i - m\alpha \frac{h_{j+1}^{i,m-1} + h_{j-1}^{i,m-1}}{2} \frac{h_{j+1}^i + h_{j-1}^i}{2\Delta x} \right) + \frac{(\Delta t)^2}{2} \frac{pu_j^{i+1} - pu_j^i}{\Delta t} \\
 & - m\alpha \frac{(\Delta t)^2}{2\Delta x} \left[ \frac{h_{j+1}^{i,m-1} + h_j^{i,m-1}}{2} \right. \\
 & \times \left( \frac{pu_{j+1}^i + pu_j^i}{2} - m\alpha \frac{h_{j+1}^{i,m-1} + h_j^{i,m-1}}{2} \frac{h_{j+1}^i - h_j^i}{\Delta x} \right) \\
 & \left. - \frac{h_j^{i,m-1} + h_{j-1}^{i,m-1}}{2} \times \left( \frac{pu_j^i + pu_{j-1}^i}{2} - m\alpha \frac{h_j^{i,m-1} + h_{j-1}^{i,m-1}}{2} \frac{h_j^i - h_{j-1}^i}{\Delta x} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{9}$$

Para a fronteira a jusante foi utilizado um esquema de primeira ordem, visto que a equação (9) já não é válida (Deng et al. 2005):

$$h_j^{i+1} = h_j^i + \Delta t \left( pu_j^i - m\alpha \frac{h_j^{i,m-1} + h_{j-1}^{i,m-1}}{2} \frac{h_j^i - h_{j-1}^i}{\Delta x} \right) \quad (10)$$

em que  $i$  é o índice que denota o tempo ( $t$ ),  $j$  é o índice que denota a posição ( $x$ ),  $\Delta x$  e  $\Delta t$  representam o incremento no espaço e no tempo, respetivamente.

Para garantir a estabilidade de um esquema numérico explícito, o critério de estabilidade de Courant deve ser satisfeita (Stephenson e Meadows 1986):

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{\alpha m h^{m-1}} \quad (11)$$

### 3.2.3 Desempenho do modelo em prever o escoamento superficial

Existe uma variedade de critérios para avaliar o desempenho dos modelos hidrológicos, sendo o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe e o coeficiente de determinação, um dos critérios mais utilizados na modelação hidrológica (e.g. Krause et al. 2005).

Para avaliar o desempenho do modelo numérico em simular o escoamento superficial foi aqui utilizado o critério de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $NSE$ ).

$NSE$  varia entre  $-\infty$  a 1, sendo que um valor abaixo ou igual a zero indica que o ajuste dos valores observados em laboratório aos simulados é medíocre enquanto que um valor igual a 1 significa que o modelo ajusta-se na perfeição aos valores observados.

O  $NSE$  é calculado da seguinte forma:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \overline{Q_o})^2} \quad (12)$$

em que  $Q_o$  = caudal observado ( $m^3/s$ ),  $Q_s$  = caudal simulado ( $m^3/s$ ) e  $\overline{Q_o}$  = média dos caudais observados ( $m^3/s$ ) e  $n$  = número de pares de valores comparados.

De acordo com Ritter e Muñoz-Carpena (2013) os limites de aceitabilidade para as previsões do modelo podem ser classificados em muito bom para valores de  $NSE \geq 0,90$ , bom para  $NSE$  compreendido entre 0,80 e 0,90, aceitável para valores de  $NSE$  entre 0,65 e 0,80 e medíocre para valores menores que 0,65, sendo este valor considerado o limiar de aceitabilidade.

### 3.2.4 Análise de sensibilidade

Foi conduzida uma análise de sensibilidade para analisar a influência que pequenas variações na inclinação e na rugosidade exercem na modelação do escoamento superficial, no que diz respeito ao ajuste dos valores simulados aos observados em laboratório e na previsão do caudal de ponta. A motivação para esta análise de sensibilidade reside fundamentalmente no facto de neste trabalho não ter sido calculado experimentalmente o valor do coeficiente de rugosidade de Manning e também de ter havido alguma dificuldade em garantir com precisão a inclinação selecionada (0,09 m/m), considerando-se poder haver pequenas diferenças entre os vários testes.

A análise de sensibilidade foi feita da forma mais simples, através da variação de cada parâmetro individualmente, mantendo o resto constante (Hamby 1994).

No Quadro 3.3 estão representados os valores atribuídos aos parâmetros para a análise de sensibilidade, com a coluna sinalizada a amarelo a representar os valores utilizados na modelação do escoamento superficial e as outras colunas um incremento de  $\pm \frac{1}{100}$  nos valores dos parâmetros.

Quadro 3.3 – Valores dos parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade.

Inclinação (m/m)	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11
Rugosidade (s/m <sup>1/3</sup> )	0,054	0,064	0,074	0,084	0,094

### 3.2.5 Investigação do efeito da forma na modelação do escoamento superficial

Para cada evento de precipitação foram utilizadas diversas formas de parcelas na modelação. Foi considerada a mesma intensidade de precipitação e a mesma taxa de infiltração para todas as formas de parcelas. A taxa de infiltração foi obtida para cada evento, através de uma média entre as três parcelas e ajustada com a equação de infiltração de Horton. O Quadro 3.4 mostra os valores dos parâmetros do modelo de infiltração de Horton utilizados para estudar a influência da forma de parcelas no escoamento superficial. A inclinação e o coeficiente de Manning foram também iguais para todas as formas de parcelas, 0,09 (m/m) e 0,074 (s/m<sup>1/3</sup>) respetivamente.



Quadro 3.4 – Parâmetros do modelo de infiltração de Horton utilizados na análise da influência da forma das parcelas no escoamento superficial.

	1º evento	2º evento	3º evento	4º evento
$f_i$ (mm/h)	114,00			
$f_c$ (mm/h)	112,25	74,04	45,51	40,97
$k$ (1/h)	0,01	0,03	0,03	0,04

Aqui a forma da parcela é classificada usando o fator de forma, tendo em conta a orientação das parcelas (Black 1972):

$$F_s = \frac{L^2}{A} \quad (13)$$

em que  $F_s$  = fator de forma, adimensional,  $L$  = comprimento da parcela, no sentido do escoamento (m) e  $A$  = área da parcela (m<sup>2</sup>).

As dimensões das parcelas consideradas nesta análise encontram-se no Quadro 3.5. Como pode ser visto, em parcelas aproximadamente quadradas o valor do fator de forma aproxima-se de 1. À medida que aumenta o comprimento no sentido do escoamento o fator de forma aumenta e com a diminuição do comprimento o fator de forma diminui. Nas simulações numéricas efetuadas, a discretização espacial adotada, ao longo do comprimento da parcela, foi sempre a mesma em qualquer das situações estudadas (ver Figura C.1), o que resultou nas diferentes dimensões da malha indicadas no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Dimensões das várias parcelas utilizadas no modelo para o estudar a influência da forma das parcelas no escoamento superficial.

Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento (m)	Largura (m)	Fator de forma	Discretização espacial (mm)
0,5	0,04	12,500	0,003	0,40
0,5	0,06	8,333	0,007	0,59
0,5	0,08	6,250	0,013	0,79
0,5	0,30	1,667	0,180	2,97
0,5	0,50	1,000	0,500	4,95
0,5	0,70	0,714	0,980	6,93
0,5	0,90	0,556	1,620	8,91
0,5	1,10	0,455	2,420	10,89
0,5	1,30	0,385	3,380	12,87
0,5	2,70	0,185	14,580	26,73
0,5	4,70	0,106	44,180	46,53
0,5	6,70	0,075	89,780	66,34
0,5	8,70	0,057	151,380	86,14
0,5	10,70	0,047	228,980	105,94

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados experimentais

#### 4.1.1 escoamento superficial

A Figura 4.1 mostra uma comparação dos hidrogramas resultantes dos vários eventos de precipitação simulados em cada parcela. A Figura 4.2 representa os hidrogramas das três parcelas para os vários eventos de precipitação simulados. O volume de escoamento superficial e precipitação total (supondo que não há flutuações na precipitação) em cada evento de precipitação simulado nas três parcelas, pode ser visto na Figura 4.3. A Figura 4.4 representa os coeficientes de escoamento em cada evento de precipitação simulado nas três parcelas.

Houve pouco escoamento superficial para o primeiro evento de precipitação (condição inicial de solo seco) em todas as parcelas. O escoamento superficial foi sempre aumentando em cada parcela em relação ao aumento da sequência do número de eventos de precipitação.

Todos os eventos de precipitação simulados na parcela A produziram maior volume de escoamento superficial em relação aos eventos da mesma sequência nas outras parcelas. Os dois primeiros eventos de precipitação simulados na parcela B, produziram menor volume de escoamento superficial em relação aos simulados na parcela C. Contudo os dois últimos eventos de precipitação simulados na parcela B, produziram maior volume de escoamento superficial em relação aos simulados na parcela C. Estas pequenas diferenças podem estar relacionadas com a distribuição espacial da intensidade de precipitação e também com o movimento da água no solo, quer durante os eventos simulados, como também durante os 16 minutos de intervalo entre cada evento.

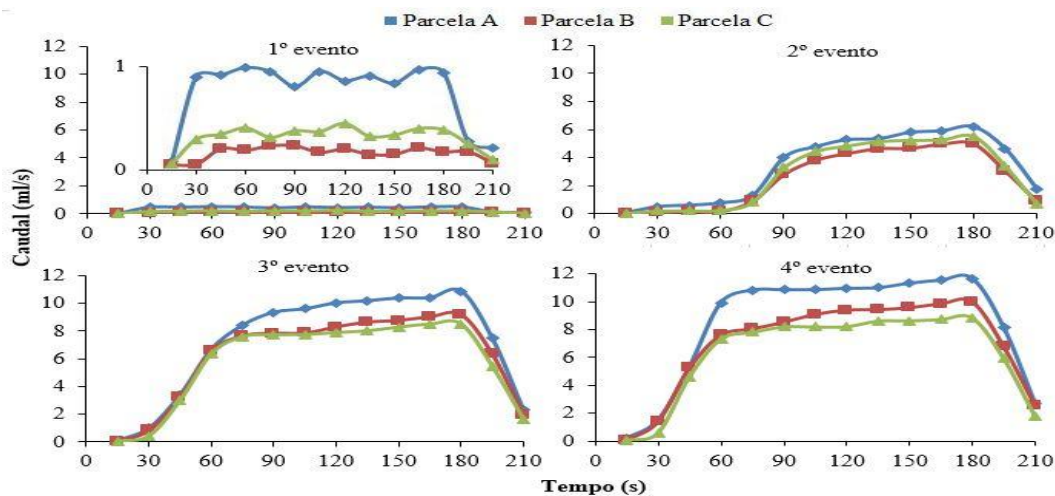


Figura 4.1 – Hidrogramas para os quatro eventos de precipitação e para as três parcelas.

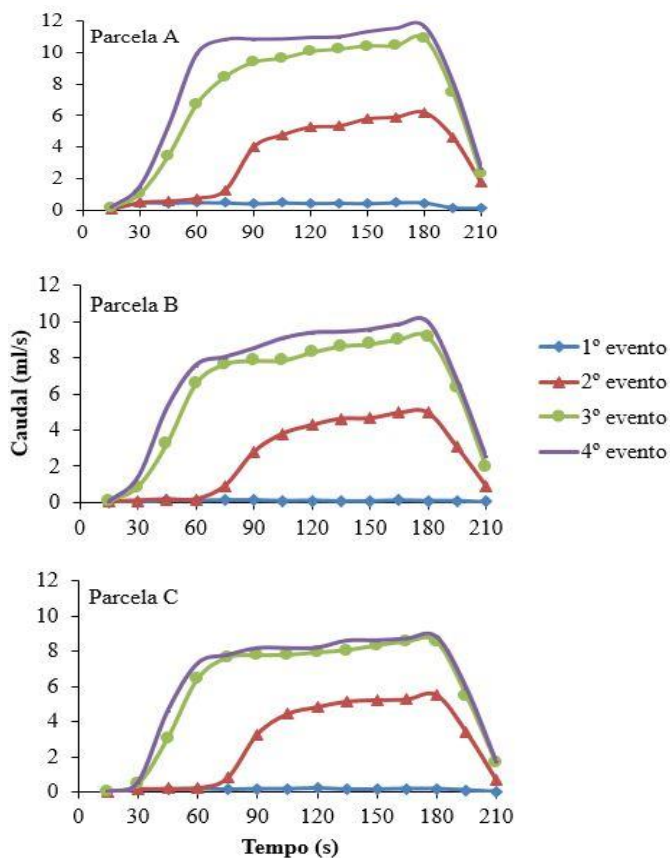


Figura 4.2 – Hidrogramas para as três parcelas e para os 4 eventos de precipitação.



Figura 4.3 – Escoamento e precipitação total para as três parcelas e para os quatro eventos de precipitação.



Figura 4.4 – Coeficiente de escoamento para os quatro eventos de precipitação simulados em cada parcela.

### 4.1.2 Transporte de sedimentos

A Figura 4.5 mostra a evolução do transporte de sedimentos ao longo do tempo para os quatro eventos de escoamento superficial, em cada parcela, gerados por chuva simulada. A Figura 4.6 mostra o transporte sólido nas três parcelas e para os quatro eventos de precipitação simulados. Na Figura 4.7 pode ser visto o peso dos sedimentos transportados em cada parcela.

A evolução do transporte de sedimentos com o tempo apresentou muitas flutuações. Pode ser visto que a quantidade de sedimentos transportados aumentou com o número de eventos de precipitação simulados (aumento do caudal) em cada parcela, tendo havido um declínio no último evento simulado em todas as parcelas. Wainwright et al. (2000), Pereira et al. (2003) e Deng et al. (2008) evidenciaram também o mesmo declínio.

O valor extremo no segundo evento de precipitação na parcela A (ver Figura 4.5 e 4.6) pode estar relacionado com erros experimentais, inerentes ao tipo de trabalho desenvolvido.

Os resultados também mostram que a parcela A, teve maior transporte sólido em relação às outras parcelas. O menores valores de transporte sólido foram verificados na parcela C. Estes resultados podem indicar que o transporte de sedimentos depende da forma das parcelas, sendo as menores perdas de solo verificadas para as parcelas mais alongadas. Isto acontece porque as parcelas mais alongadas tiveram menor caudal e conseqüentemente menor capacidade de transporte de sedimentos ao longo do comprimento das parcelas.

Contudo o processo de erosão é complexo e o tamanho das parcelas aqui utilizadas é muito reduzido. A escala pode exercer grande influência nos resultados obtidos (Wainwright et al. 2000).

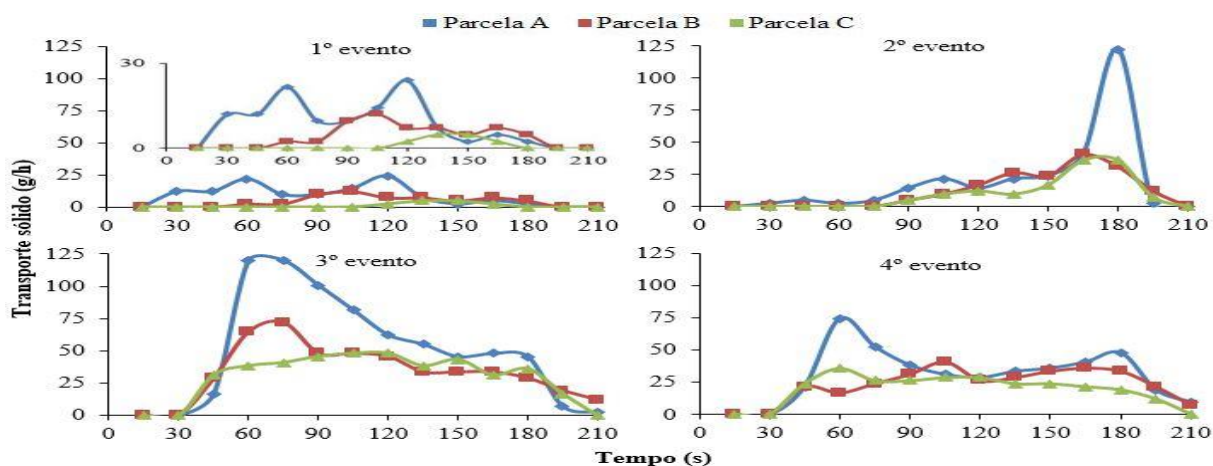


Figura 4.5 – Transporte sólido nos quatro eventos de precipitação simulados em cada parcela

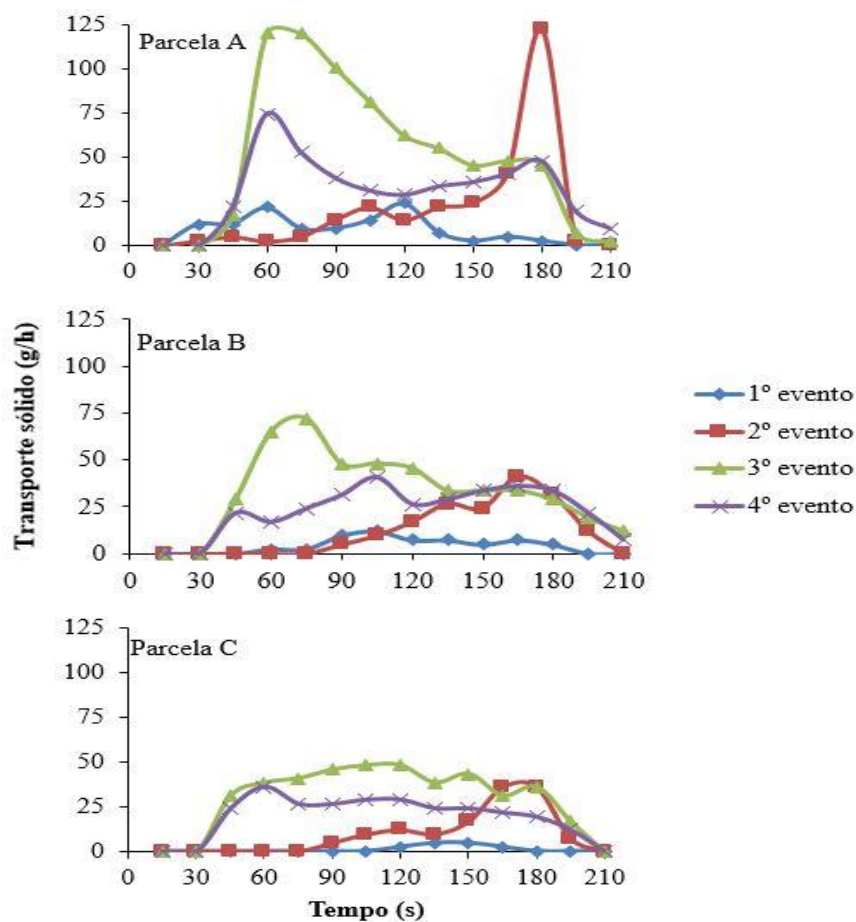


Figura 4.6 – Transporte de sedimentos para as três parcelas para os quatro eventos de precipitação.

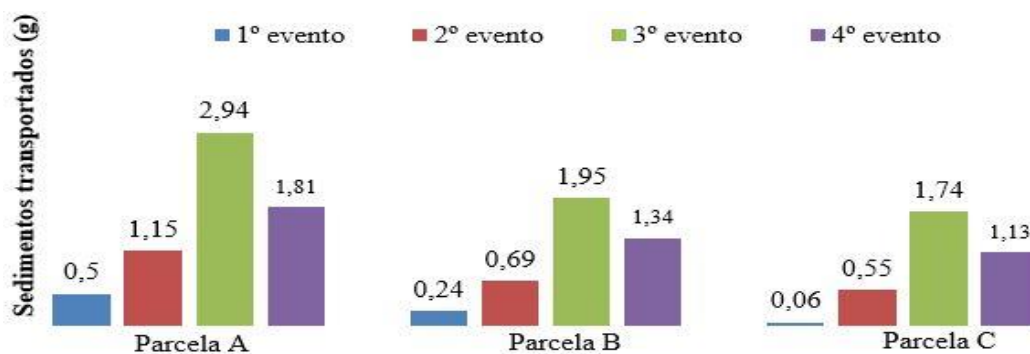


Figura 4.7 – Peso total dos sedimentos transportados nas três parcelas em relação aos eventos de precipitação.

## 4.2 Comparação dos resultados experimentais com os simulados

### 4.2.1 Ajuste dos hidrogramas simulados aos observados em laboratório

A Figura 4.8 mostra a comparação entre os caudais observados em laboratório e os simulados pelo modelo da onda cinemática. Os dados experimentais e simulados são apresentados respetivamente no Anexo B (Quadros B.4 a B.6) e Anexo C (Quadros C.1 a C.3). O Quadro 4.1 apresenta os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe, que traduz o ajuste dos caudais simulados numericamente aos observados em laboratório, tanto para o ramo ascendente do hidrograma como também para o hidrograma completo.

O desempenho do modelo foi aumentando à medida que o número de eventos simulados em cada parcela aumentou. Estes resultados estão de acordo com Abrantes et al. (2015), em que o modelo da onda cinemática é melhor a prever o escoamento superficial à medida que o teor de humidade do solo vai aumentando.

No geral, tanto para apenas a fase ascendente do hidrograma como para o hidrograma completo, o ajuste do modelo foi abaixo do limiar de aceitabilidade para os dois primeiros eventos de precipitação. No primeiro evento de precipitação o ajuste entre os valores observados em laboratório e simulados numericamente pode até ser considerado medíocre.

Os melhores ajustes verificaram-se para os dois últimos eventos de precipitação, sendo nestes caso os ajuste maior do que o limiar de aceitabilidade, de acordo com o traduzido pelo cálculo do coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Comparando o ajuste, pode-se ver que o modelo previu melhor apenas a fase ascendente dos hidrogramas observados do que os hidrogramas completos nos dois últimos eventos de precipitação. Nos dois primeiros eventos foi ao contrário, exceto no segundo evento de precipitação na parcela A, tendo em conta o ajuste do hidrograma durante 210 s.

Em termos da forma da parcela, tanto para a fase ascendente do hidrograma como para o hidrograma completo, a parcela C sempre está associada a um maior ajuste entre os valores observados e modelados, em relação às outras. Pode ser visto que à medida que o comprimento no sentido do escoamento aumentou, o modelo da onda cinemática ajustou-se melhor aos hidrogramas observados em laboratório. Em parcelas com maior largura e menor comprimento há variações rápidas no escoamento e na aceleração, fazendo com que haja efeitos dispersivos, sendo que a onda cinemática não tem em conta este efeito. Embora o contexto de aplicação seja aqui outro, nota-se que Lighthill e Whitham (1955a) indicaram que a teoria da onda cinemática é mais adequada para rios longos e estreitos em que há um movimento mais retilíneo das partículas.

---

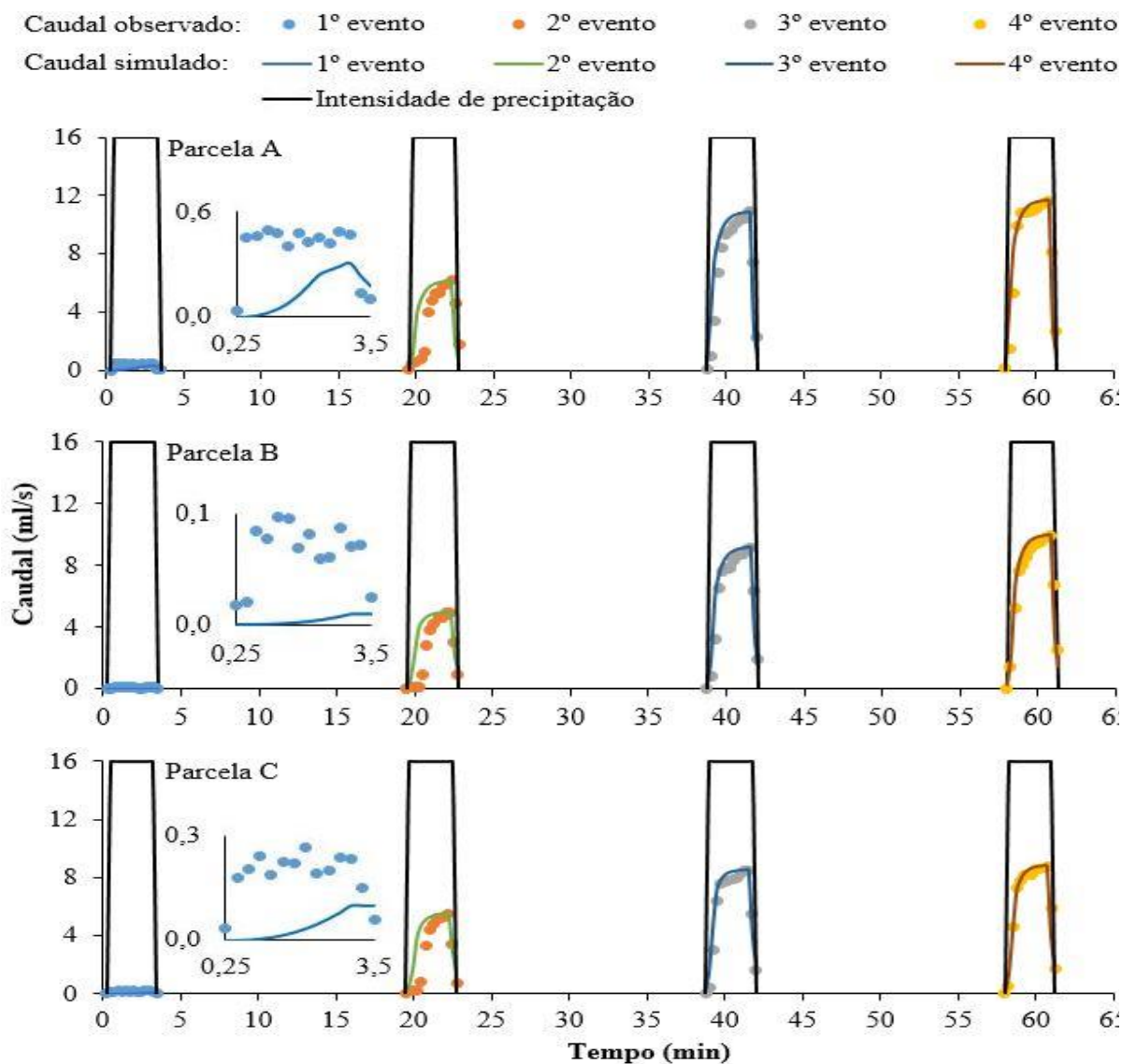


Figura 4.8 – Comparação entre os caudais observados em laboratório e os simulados pelo modelo da onda cinemática, utilizando como dados de infiltração e precipitação os valores do Quadro 3.2.

Quadro 4.1 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe, relativo ao ajuste aos hidrogramas observados pelos hidrogramas simulados pelo modelo da onda cinemática.

Parcela	NSE							
	Fase ascendente				Hidrograma completo			
	1º evento	2º evento	3º evento	4º evento	1º evento	2º evento	3º evento	4º evento
A	-6,288	0,263	0,796	0,893	-2,833	0,219	0,716	0,788
B	-6,785	0,267	0,894	0,953	-5,661	0,299	0,850	0,890
C	-9,078	0,463	0,942	0,988	-5,598	0,488	0,936	0,967



#### 4.2.2 Efeito da rugosidade e da inclinação na modelação do escoamento

O Quadro 4.2 mostra os resultados da análise de sensibilidade ao coeficiente de rugosidade de Manning usado no modelo, expresso pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe; a linha a amarelo sinaliza os resultados obtidos para o valor deste parâmetro que foi utilizado na modelação do escoamento superficial. O Quadro 4.3 mostra os resultados da análise de sensibilidade à inclinação da superfície de escoamento, com a linha a amarelo a sinalizar o valor da inclinação utilizado na modelação do escoamento superficial.

A análise de sensibilidade incidiu só sobre os dois últimos eventos de precipitação, visto que o modelo da onda cinemática foi considerado aceitável apenas para modelar estes dois eventos de precipitação.

Variando os valores dos parâmetros da onda cinemática, houve variação no ajuste dos valores simulados numericamente aos observados em laboratório. Houve maior variação na eficiência do ajuste dos resultados numéricos aos experimentais, variando o coeficiente de rugosidade de Manning do que variando a inclinação. Isto sugere que o coeficiente de Manning tem maior influência no escoamento superficial simulado pelo modelo da onda cinemática do que a inclinação, dentro da gama de valores analisados.

No geral, exceto no 4º evento de precipitação na parcela C, com o aumento do coeficiente de Manning, o ajuste dos valores simulados numericamente aos observados em laboratório foi maior, enquanto que com o aumento da inclinação o ajuste piorou.

Apesar destas variações nos parâmetros, os ajustes foram sempre maiores para a parcela C. A parcela A apresentou sempre os menores valores de ajuste. Na parcela A, o ajuste baixou até 0,703 no terceiro evento, estando este valor muito próximo do limiar de aceitabilidade ( $\approx 0,7$ ).

Quanto à previsão do caudal de ponta, praticamente não houve impacto devido às pequenas alterações introduzidas no modelo tanto na inclinação como no coeficiente de rugosidade. Isto implica que as maiores diferenças entre os hidrogramas observados e os simulados, devido à variação destes parâmetros, encontram-se imediatamente antes e depois do caudal de ponta. Um exemplo disto é os valores dos caudais de ponta estimados com a utilização dos coeficientes de rugosidade de Manning de 0,054 e 0,094 apresentados na Figura 4.2.

Quadro 4.2 – Análise de sensibilidade do modelo de escoamento superficial ao coeficiente de rugosidade de Manning, no ajuste aos valores experimentais, traduzida pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Rugosidade ( $s/m^{1/3}$ )	NSE					
	Parcela A		Parcela B		Parcela C	
	3º evento	4º evento	3º evento	4º evento	3º evento	4º evento
0,054	0,703	0,811	0,838	0,907	0,847	0,955
0,064	0,751	0,847	0,866	0,932	0,884	0,976
0,074	0,796	0,893	0,894	0,953	0,942	0,988
0,084	0,810	0,906	0,909	0,959	0,956	0,987
0,094	0,829	0,922	0,937	0,973	0,972	0,982
	Caudal de ponta (ml/s)					
0,054	10,875	11,668	9,172	9,975	8,546	8,844
0,074	10,873	11,667	9,170	9,973	8,545	8,841
0,094	10,872	11,666	9,168	9,972	8,545	8,840

Quadro 4.3 – Análise de sensibilidade do modelo de escoamento superficial à inclinação, no ajuste aos valores experimentais, traduzida pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Inclinação (m/m)	NSE					
	Parcela A		Parcela B		Parcela C	
	3º evento	4º evento	3º evento	4º evento	3º evento	4º evento
0,07	0,818	0,913	0,921	0,964	0,963	0,986
0,08	0,807	0,903	0,904	0,958	0,953	0,988
0,09	0,796	0,893	0,894	0,953	0,942	0,988
0,10	0,786	0,883	0,887	0,948	0,931	0,987
0,11	0,776	0,873	0,881	0,944	0,918	0,986
	Caudal de ponta (ml/s)					
0,07	10,872	11,666	9,169	9,972	8,545	8,840
0,09	10,873	11,667	9,170	9,973	8,545	8,841
0,11	10,873	11,667	9,170	9,974	8,545	8,842

### **4.3 Efeito da forma na resposta hidrológica das parcelas**

Usou-se o modelo da onda cinemática para explorar o efeito da forma das parcelas na resposta hidrológica; os dados simulados são apresentados no Anexo C, Quadros C.4 a C.7.

O modelo da onda cinemática mostrou-se inadequado para prever o escoamento superficial para o 1º evento de precipitação (situação em que quase toda a totalidade da água infiltra-se no solo) em parcelas com comprimento maiores que 1,3 metros de comprimento. Por isso nas Figuras 4.9, 4.11 e 4.13 o comprimento das parcelas está compreendido entre 0,04 a 1,3 metros. No 2º, 3º e 4º evento de precipitação o modelo gerou dados realistas para todas as formas de parcelas consideradas no Quadro 3.5.

A forma das parcelas influenciou a forma dos hidrogramas, apesar de não haver diferenças significativas no caudal de ponta para as diversas formas de parcelas, como pode ser visto nas Figuras 4.9 a 4.13.

Apesar de serem muito pequenas as diferenças, pode ser visto nas Figuras 4.9 e 4.10 que, com o aumento do fator de forma (aumento do comprimento no sentido do escoamento), o caudal de ponta diminui.

A forma das parcelas teve maior influência sobre a fase ascendente e descendente dos hidrogramas do que na estimativa do caudal de ponta. Pode ser visto nas Figuras 4.11 e 4.12 que nas parcelas com menor fator de forma (menor comprimento), o escoamento superficial começa mais cedo, atingindo maior volume de escoamento em pouco tempo, até atingir o caudal de ponta. Nestas parcelas a fase descendente é caracterizada por um rápido decréscimo no escoamento superficial depois do final do período de precipitação, terminando mais cedo o escoamento. As parcelas com maior fator de forma apresentaram um comportamento inverso, com o escoamento superficial a começar mais tarde, com menor volume de escoamento superficial antes de atingir o caudal de ponta, mas com maior volume de escoamento superficial depois do final do período de precipitação. Estes resultados estão de acordo com Wei e Larson (1971) em que em parcelas mais alongadas o escoamento superficial começa mais tarde e atinge um menor caudal de ponta, enquanto que em parcelas mais compactas (fator de forma aproxima-se de 1) o escoamento superficial começa mais cedo atingindo um caudal de ponta maior.

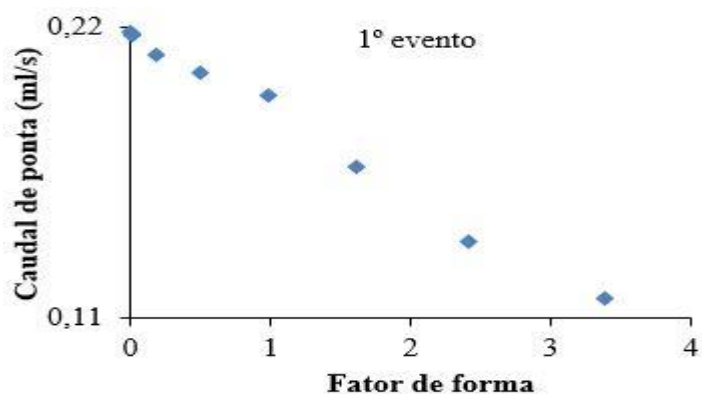


Figura 4.9 – Caudal de ponta simulado pelo modelo da onda cinemática no 1º evento de precipitação para as várias formas de parcelas, ver Quadro 3.5.

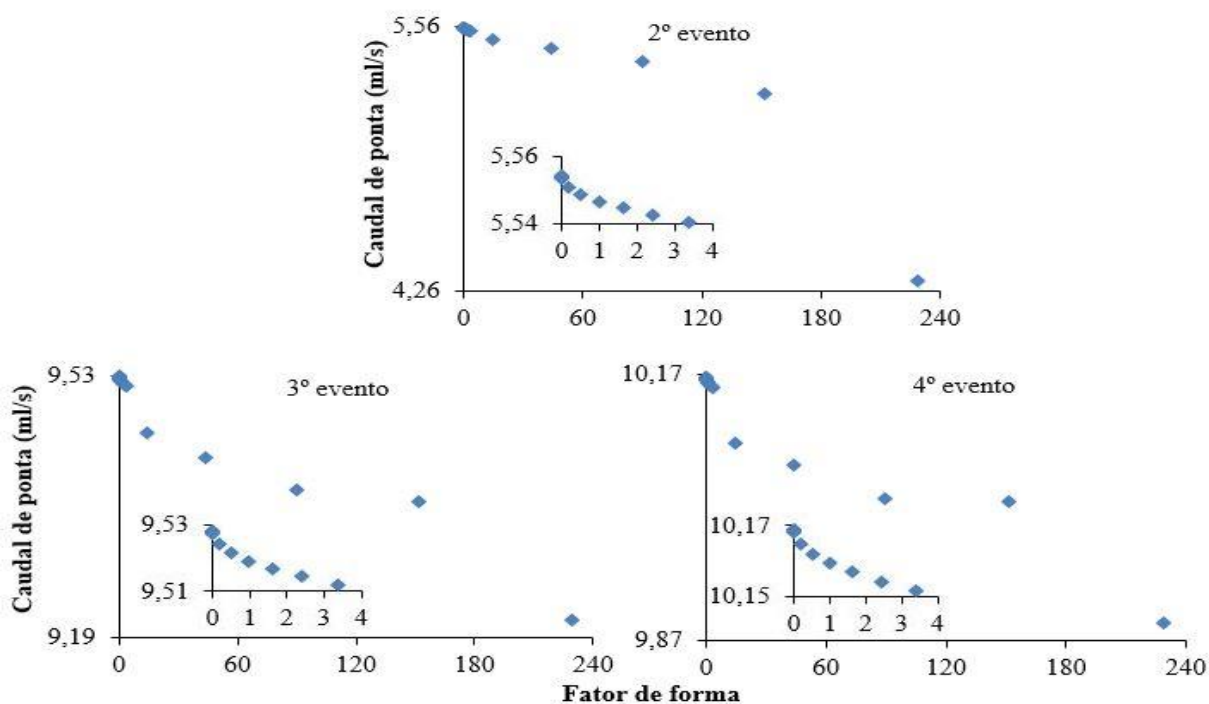


Figura 4.10 – Caudal de ponta simulado pelo modelo da onda cinemática no 1º, 2º e 3º evento de precipitação para as várias formas de parcelas, ver Quadro 3.5.

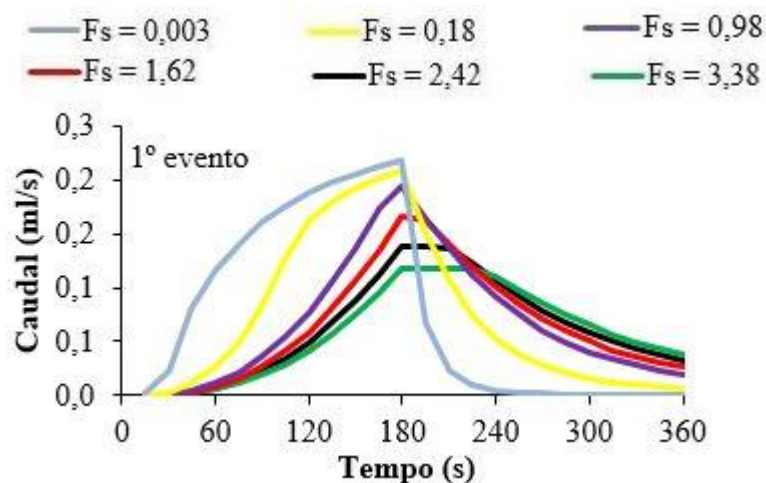


Figura 4.11 – Caudal simulado pelo modelo da onda cinemática no 1º evento de precipitação para as formas de parcelas, ver Quadro 3.5.

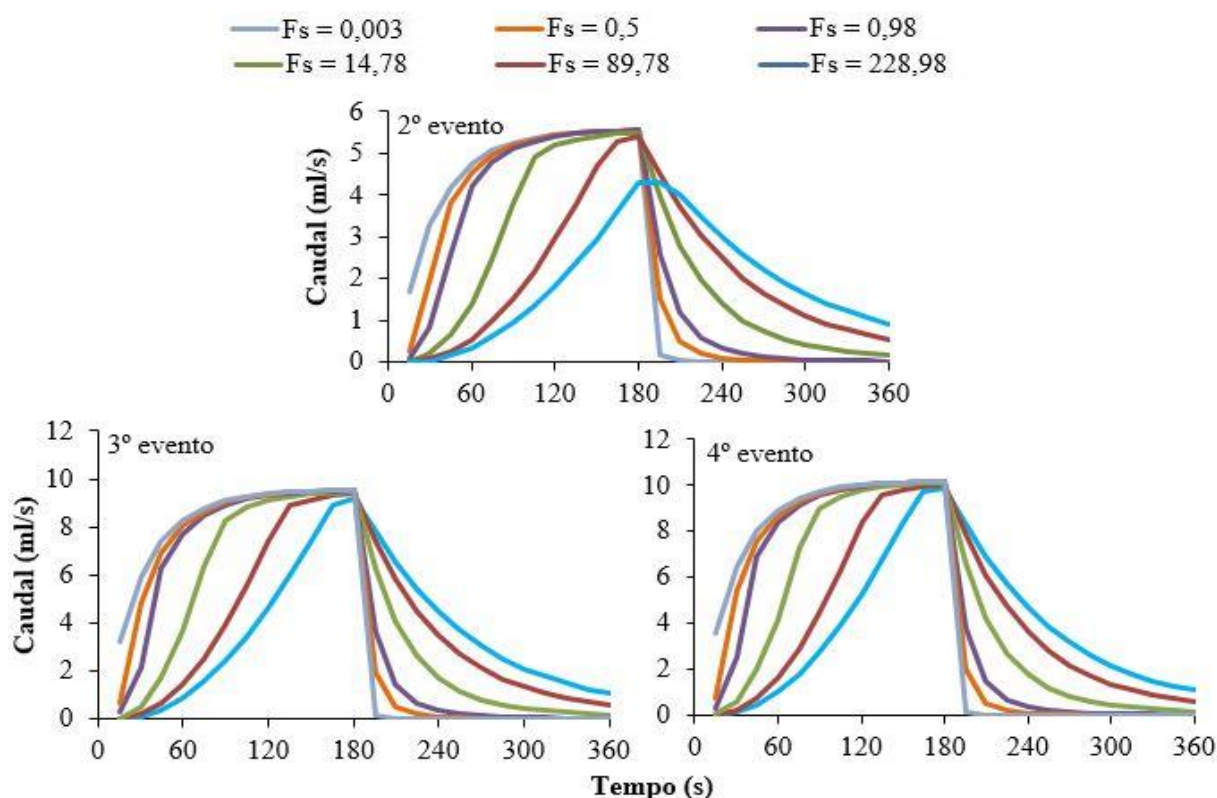


Figura 4.12 – Caudal simulado pelo modelo da onda cinemática no 1º, 2º e 3º evento de precipitação para as formas de parcelas, ver Quadro 3.5.

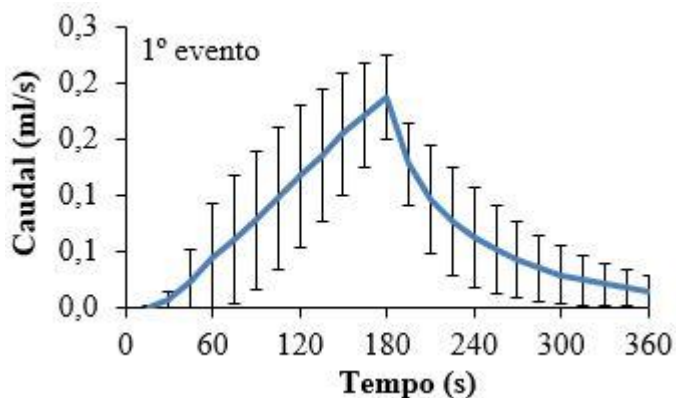


Figura 4.13 – Média e desvio padrão do caudal no 1º evento de precipitação para todas as formas de parcelas com comprimento até 1,3 metros, ver Quadro 3.5.

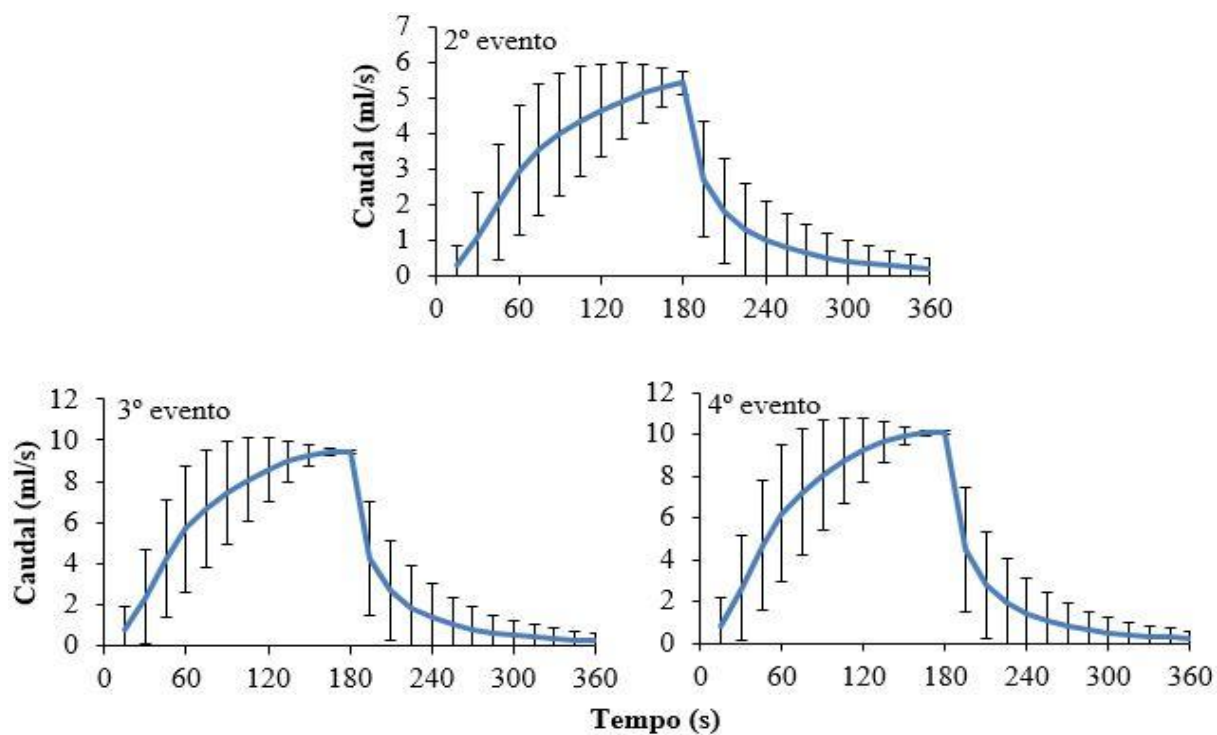


Figura 4.14 – Média e desvio padrão do caudal no 2º, 3º e 4º evento de precipitação para todas as formas de parcelas encontradas no Quadro 3.5.

## 5 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser tiradas deste trabalho:

- Os resultados laboratoriais sugerem que o escoamento superficial e o transporte de sedimentos diminuem com o aumento do comprimento de superfícies infiltrantes (para a mesma área);
- O modelo da onda cinemática é adequado para modelar o escoamento superficial com alturas de escoamento baixas, tendo obtido melhores resultados em situações com o solo perto da saturação;
- A utilização do modelo da onda cinemática mostrou que a forma das parcelas influencia o escoamento superficial, com o escoamento a iniciar-se mais cedo e atingindo um caudal de ponta maior, e com um rápido decréscimo após término da precipitação para parcelas com menor fator de forma;

Como trabalhos futuros sugere-se a realização de experiências laboratoriais com solos de características diferentes das utilizadas neste trabalho. Também se recomenda o aumento da espessura do solo nas parcelas e da escala espacial das parcelas, para um maior entendimento dos processos de precipitação-escoamento e transporte de sedimentos. Recomenda-se igualmente que sejam utilizados outros métodos de solução do modelo da onda cinemática e também modelos de infiltração que consideram a distribuição espacial da infiltração.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrantes JRCB, de Lima JLMP, Montenegro AAA (2015) Desempenho da modelagem cinemática do escoamento superficial para chuvas intermitentes em solos com cobertura morta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 166–172.
- Águas de Coimbra (2017) Relatórios Trimestrais - 2017 - Águas de Coimbra. <http://www.aguasdecoimbra.pt/index.php/qualidade-da-agua/relatorios-trimestrais/category/53-rt-2017>.
- Beven K (2012) *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer: Second Edition*.
- Beven K (1979) On the generalized kinematic routing method. *Water Resources Research* 15:1238–1242. doi: 10.1029/WR015i005p01238
- Black PE (1972) Hydrograph responses to geomorphic model watershed characteristics and precipitation variables. *Journal of Hydrology* 17:309–329. doi: 10.1016/0022-1694(72)90090-X
- Bowyer-Bower TAS, Burt TP (1989) Rainfall simulators for investigating soil response to rainfall. *Soil Technology* 2:1–16. doi: 10.1016/S0933-3630(89)80002-9
- Cerdà A, Ibáñez S, Calvo A (1997) Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology* 11:163–170. doi: 10.1016/S0933-3630(96)00135-3
- Chery DL (1966) Design and tests of a physical watershed model. *Journal of Hydrology* 4:224–235.
- Ciarapica L, Todini E (2002) TOPKAPI: A model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales. *Hydrological Processes* 16:207–229. doi: 10.1002/hyp.342
- de Lima JLMP (1992) Model KININF for overland flow on pervious surfaces. Em: *Hydraulics and erosion mechanics of overland flow*, T.Parson and A.Abrahams (Eds.), UCL Press., pp 69–88
- de Lima JLMP, Singh VP (2003) Laboratory experiments on the influence of storm movement on overland flow. *Physics and Chemistry of the Earth* 28:277–282. doi: 10.1016/S1474-7065(03)00038-X
- de Lima JLMP, Singh VP (2002) The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow. *Advances in Water Resources* 25:817–828. doi: 10.1016/S0309-1708(02)00067-2
- de Lima JLMP, Singh VP, de Lima MIP (2003) The influence of storm movement on water erosion: Storm direction and velocity effects. *Catena* 52:39–56. doi: 10.1016/S0341-8162(02)00149-2



- 
- Deng ZQ, de Lima JLMP, Jung HS (2008) Sediment transport rate-based model for rainfall-induced soil erosion. *Catena* 76:54–62. doi: 10.1016/j.catena.2008.09.005
- Deng ZQ, de Lima JLMP, Singh VP (2005) Transport rate-based model for overland flow and solute transport: Parameter estimation and process simulation. *Journal of Hydrology* 315:220–235. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.03.042
- Di Cristo C, Iervolino M, Vacca A (2013) Applicability of Kinematic, Diffusion and Quasi-Steady Dynamic Wave Models to Shallow Mud Flows. *Journal of Hydrologic Engineering* 19:956–965. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000881
- Di Pietro L, Ruy S, Capowiez Y (2003) Predicting preferential water flow in soils by traveling-dispersive waves. *Journal of Hydrology* 278:64–75. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00124-0
- Foster GR, Huggins LF, Meyer LD (1968) Simulation of Overland Flow on Short Field Plots. *Water Resources Research* 4:1179–1187. doi: 10.1029/WR004i006p01179
- Goff KM, Gentry RW (2006) The influence of watershed and development characteristics on the cumulative impacts of stormwater detention ponds. *Water Resources Management* 20:829–860. doi: 10.1007/s11269-005-9010-2
- Hamby DM (1994) A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment* 32:135–154. doi: 10.1007/BF00547132
- Helming K, Römkens MJM, Prasad SN (1998) Surface Roughness Related Processes of Runoff and Soil Loss: A Flume Study. *Soil Science Society of America Journal* 62:243. doi: 10.2136/sssaj1998.03615995006200010031x
- Kilinc M, Richardson E V. (1973) Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. *Hydrology Papers* 63 61.
- Krause P, Boyle DP, Bäse F (2005) Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5:89–97. doi: 10.5194/adgeo-5-89-2005
- Lane LJ, Woolhiser DA, Yevjevich V (1975) Influence of simplifications in watershed geometry in simulation of surface runoff. *Hydrology paper* 80.
- Lighthill MJ, Whitham GB (1955a) On Kinematic Waves. I. Flood Movement in Long Rivers. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 229:281–316. doi: 10.1098/rspa.1955.0088
- Lighthill MJ, Whitham GB (1955b) On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 229:317–345. doi: 10.1098/rspa.1955.0089
-

- 
- Mein RG, Larson CL (1971) Modeling the Infiltration Component of the Rainfall-runoff Process. 72.
- Miller JE (1984) Basic Concepts of Kinematic-Wave Models. U.S. Geological Survey Professional Paper 1302 36.
- Montenegro AAA, Abrantes JRCA, de Lima JLMP (2013) Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena* 109:139–149. doi: 10.1016/j.catena.2013.03.018
- Morris EM, Woolhiser DA (1980) Unsteady one-dimensional flow over a plane: Partial equilibrium and recession hydrographs. *Water Resources Research* 16:355–360. doi: 10.1029/WR016i002p00355
- Navas A, Alberto F, Machín J, Galán A (1990) Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. *Soil Technology* 3:385–397. doi: 10.1016/0933-3630(90)90019-Y
- Parsons AJ, Stone PM (2006) Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. *Catena* 67:68–78. doi: 10.1016/j.catena.2006.03.002
- Pereira SB, Pruski FF, Silva DD Da, Matos AT De (2003) Desprendimento e arraste do solo pelo escoamento superficial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 7:423–429. doi: 10.1590/S1415-43662003000300003
- Poesen JWA, Lavee H (1991) Effects of size and incorporation of synthetic mulch on runoff and sediment yield from interrills in a laboratory study with simulated rainfall. *Soil and Tillage Research* 21:209–223. doi: 10.1016/0167-1987(91)90021-O
- Ponce V, Li R, Simons D (1978) Applicability of kinematic and diffusion models. *Journal of the Hydraulics Division* 104:353–360.
- Ponce V, Simons D (1977) Shallow Wave Propagation in Open Channel Flow. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 103, No. H:1461–1476.
- Ponce VM (1991) The Kinematic Wave Controversy. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce* 117:511–525. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:4(511)
- Rai RK, Upadhyay A, Singh VP (2010) Effect of variable roughness on runoff. *Journal of Hydrology* 382:115–127. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.12.022
- Rieke-Zapp DH, Nearing MA (2005) Slope Shape Effects on Erosion: A Laboratory Study. *Soil Science Society of America Journal* 69:1463–1471. doi: 10.2136/sssaj2005.0015
- Ries JB, Iserloh T, Seeger M, Gabriels D (2013) Rainfall simulations - constraints, needs and challenges for a future use in soil erosion research. *Zeitschrift Fur Geomorphologie* 57:1–
-

- 
10. doi: 10.1127/0372-8854/2013/S-00130
- Ritter A, Muñoz-Carpena R (2013) Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology* 480:33–45. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.004
- Şensoy H, Kara Ö (2014) Slope shape effect on runoff and soil erosion under natural rainfall conditions. *IForest* 7:110–114. doi: 10.3832/ifor0845-007
- Singh VP (2001) Kinematic wave modelling in water resources: A historical perspective. *Hydrological Processes* 15:671–706. doi: 10.1002/hyp.99
- Singh VP (2002) Is hydrology kinematic? *Hydrological Processes* 16:667–716. doi: 10.1002/hyp.306
- Singh VP (1988) *Hydrologic systems: Rainfall-Runoff modeling*. Prentice Hall
- Singh VP (1989) *Hydrologic systems: Watershed Modeling*. Prentice Hall
- Singh VP (1975a) A laboratory investigation of surface runoff. *Journal of Hydrology* 25:187–200. doi: 10.1016/0022-1694(75)90020-7
- Singh VP (1975b) Hybrid formulation of kinematic wave models of watershed runoff. *Journal of Hydrology* 27:33–50. doi: 10.1016/0022-1694(75)90097-9
- Singh VP, Woolhiser D a. (2002) Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering* 7:270–292. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(270)
- Smith RE, Goodrich DC, Woolhiser DA, Unkrich CL (1995) KINEROS: a kinematic runoff and erosion model. Em: *Computer Models of Watershed Hydrology*. pp 697–732
- Smith RE, Woolhiser DA (1971) Overland Flow on an Infiltrating Surface. *Water Resources Research* 7:899–913. doi: 10.1029/WR007i004p00899
- Stephenson D, Meadows ME (1986) *Kinematic Hydrology and Modelling*. Elsevier
- Todini E (1988) Rainfall-runoff modeling - Past, present and future. *Journal of Hydrology* 100:341–352. doi: 10.1016/0022-1694(88)90191-6
- Vieira JHD (1983) Conditions governing the use of approximations for the Saint-Venant equations for shallow surface water flow. *Journal of Hydrology* 60:43–58. doi: 10.1016/0022-1694(83)90013-6
- Wainwright J, Parsons AJ, Abrahams AD (2000) Plot-scale studies of vegetation, overland flow and erosion interactions: Case studies from Arizona and New Mexico. *Hydrological Processes* 14:2921–2943. doi: 10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2921::AID-
-

HYP127>3.0.CO;2-7

Wei TC, Larson CL (1971) Effects of areal and Time Distribution of Rainfall on Small watershed Runoff Hydrographs. Water Resources Research Center, University of Minnesota

Woolhiser DA (1973) Hydrologic and Watershed Modeling-State of the Art.

Woolhiser DA, Liggett JA (1967) Unsteady, one-dimensional flow over a plane—The rising hydrograph. Water Resources Research 3:753–771. doi: 10.1029/WR003i003p00753

Woolhiser DA, Smith RE, Giraldez J V. (1996) Effects of spatial variability of saturated hydraulic conductivity on Hortonian overland flow. Water Resources Research 32:671–678. doi: 10.1029/95WR03108

## ANEXO A – EQUIPAMENTOS E RECIPIENTES



Figura A.1 – Recipientes e equipamentos utilizados na realização das experiências laboratoriais.

## ANEXO B – DADOS EXPERIMENTAIS

Quadro B.1 – Representação esquemática da distribuição espacial da intensidade de precipitação na parcela A.

Intensidade de precipitação (mm/h) - Parcela A								
113,16	108,99	104,66	112,69	114,15	107,08	105,54	109,07	106,21
106,94	100,75	99,56	107,74	113,04	108,62	107,54	109,94	105,72
104,35	98,17	101,01	106,89	108,48	106,14	106,36	108,45	105,05
105,19	102,06	105,14	111,33	107,78	107,14	108,13	108,14	104,18

Quadro B.2 – Representação esquemática da distribuição espacial da intensidade de precipitação na parcela B.

Intensidade de precipitação (mm/h) - Parcela B					
98,82	99,49	98,78	98,47	97,49	95,92
104,18	103,12	102,41	102,28	101,58	97,77
113,85	108,24	104,27	103,78	104,29	101,42
120,88	114,69	106,87	103,05	106,71	104,24
114,11	115,94	110,21	105,79	107,68	107,69
104,88	114,58	114,42	109,52	109,87	109,70

Quadro B.3 – Representação esquemática da distribuição espacial da intensidade de precipitação na parcela C.

Intensidade de precipitação (mm/h) - Parcela C			
98,50	97,56	96,37	94,56
101,87	101,30	99,39	97,36
105,23	103,85	103,15	100,26
105,12	105,37	106,06	103,25
105,24	103,43	107,41	105,49
104,98	102,57	107,10	108,16
106,79	105,87	109,37	108,48
109,88	108,04	109,65	108,92
110,02	109,44	109,80	106,95

Quadro B.4 – Resultados experimentais de escoamento superficial e transporte de sedimentos na parcela A.

Parcela A								
Tempo (s)	Escoamento (ml)				Transporte de sedimentos (g)			
	1º evento	2º evento	3º evento	4º evento	1º evento	2º evento	3º evento	4º evento
15	0,55	0,86	1,52	2,64	0	0	0	0
30	6,78	7,18	15,11	22,58	0,05	0,01	0	0
45	6,89	8,65	51,31	79,89	0,05	0,02	0,07	0,09
60	7,42	11,21	100,46	148,84	0,09	0,01	0,5	0,31
75	7,12	19,02	126,46	162,31	0,04	0,02	0,5	0,22
90	6,03	60,05	140,31	162,6	0,04	0,06	0,42	0,16
105	7,15	71,47	144,05	162,71	0,06	0,09	0,34	0,13
120	6,46	78,91	150,51	164,21	0,1	0,06	0,26	0,12
135	6,8	79,98	152,72	164,84	0,03	0,09	0,23	0,14
150	6,28	86,77	155,81	169,69	0,01	0,1	0,19	0,15
165	7,27	88,44	156,07	172,98	0,02	0,17	0,2	0,17
180	7,07	92,81	163,29	174,89	0,01	0,51	0,19	0,2
195	2,03	69,4	112,02	122,05	0	0,01	0,03	0,08
210	1,55	26,38	34,16	39,87	0	0	0,01	0,04

Quadro B.5 – Dados experimentais de escoamento superficial e transporte de sedimentos na parcela B.

Parcela B									
Tempo (s)	Escoamento (ml)				Transporte de sedimentos (g)				
	1º evento	2º evento	3º evento	4º evento	1º evento	2º evento	3º evento	4º evento	
15	0,31	0,42	0,56	0,8	0	0	0	0	
30	0,36	1,25	12,66	20,88	0	0	0	0	
45	1,52	2,24	48,57	78,57	0	0	0,12	0,09	
60	1,39	2,39	98,47	113,83	0,01	0	0,27	0,07	
75	1,74	13,51	114,73	120,56	0,01	0	0,3	0,1	
90	1,72	41,94	117,59	127,76	0,04	0,02	0,2	0,13	
105	1,24	57,1	117,79	136,13	0,05	0,04	0,2	0,17	
120	1,48	64,19	124,5	140,73	0,03	0,07	0,19	0,11	
135	1,08	69,44	129,67	141,31	0,03	0,11	0,14	0,12	
150	1,09	69,84	131,4	143,36	0,02	0,1	0,14	0,14	
165	1,57	74,32	135,39	147,6	0,03	0,17	0,14	0,15	
180	1,27	74,52	137,63	149,6	0,02	0,13	0,12	0,14	
195	1,3	45,79	95	101,32	0	0,05	0,08	0,09	
210	0,43	13,4	29,38	37,84	0	0	0,05	0,03	

Quadro B.6 – Resultados experimentais de escoamento superficial e transporte de sedimentos na parcela C.

Parcela C									
Tempo (s)	Escoamento (ml)				Transporte de sedimentos (g)				
	1º evento	2º evento	3º evento	4º evento	1º evento	2º evento	3º evento	4º evento	
15	0,43	0,57	0,78	0,95	0	0	0	0	
30	2,22	3,04	6,68	8,61	0	0	0	0	
45	2,56	3,16	45,55	69,32	0	0	0,13	0,1	
60	3,02	3,79	95,82	109,82	0	0	0,16	0,15	
75	2,34	12,19	114,14	117,08	0	0	0,17	0,11	
90	2,82	49,38	116,12	122,94	0	0,02	0,19	0,11	
105	2,76	66,63	116,4	122,94	0	0,04	0,2	0,12	
120	3,35	72,62	118,55	123,27	0,01	0,05	0,2	0,12	
135	2,42	77,43	120,39	129,32	0,02	0,04	0,16	0,1	
150	2,51	78,68	124,51	129,54	0,02	0,07	0,18	0,1	
165	2,98	79,16	127,79	130,94	0,01	0,15	0,13	0,09	
180	2,89	82,94	127,81	132,54	0	0,15	0,15	0,08	
195	1,89	51,31	82	88,92	0	0,03	0,07	0,05	
210	0,72	10,74	24,69	26,31	0	0	0	0	



## ANEXO C – MODELAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

```

*****Data for PROGRAM Rain_Runoff_Tiles*****

Time increment      Maximum simulation      Time interval for writing
-DT(s)              time-TM(s)              intermediate results-TIM(s)
    0.01              360.                     1.

Number of gridpoints  Length of plane      Width of plane      Slope of plane
in x -IL(-)          -L(m)                 -W(m)                -S0(m/m)
    101                0.5                    1.0                   0.09

M coeficient        Manning's coefficient
-M(-)                -N(s/m**1/3)
    1.67                0.074

Initial absorption    Final absorption      Absortion decay exponent      Initial time in the absorption
-ABSOR0(m/s)          -ABSORF(m/s)          -KH(/s)                curve - TIABSOR(s)
0.0000316636049382716  0.000030848207648416  0.00958501951750434      0.

Index of storm type  Storm velocity        Rainfall simulation
-1=Down;2=Up;3=Stat -VS(m/s)              time-TRT(s)
    3                    0.                     180.

Intensity of rainfall  Length of storm      Initial position of
storm block-P(m/s)    block-LS(m)          storm block-DLS(m)
0.0000316636049382716  0.5                    0.
    
```

Figura C.1 – Exemplo dos dados necessários para introduzir no programa desenvolvido.

Quadro C.1– Caudal simulado pelo modelo da onda cinemática para a parcela A.

Tempo (s)	Parcela A			
	Caudal simulado numericamente (ml/s)			
	1º evento	2º evento	3º evento	4º evento
15	0,00	0,17	0,47	0,58
30	0,00	1,33	3,70	4,51
45	0,01	3,87	7,53	8,42
60	0,02	4,83	8,93	9,84
75	0,05	5,37	9,73	10,63
90	0,08	5,68	10,20	11,08
105	0,12	5,88	10,48	11,33
120	0,18	6,00	10,65	11,48
135	0,24	6,07	10,75	11,57
150	0,27	6,12	10,81	11,62
165	0,29	6,15	10,85	11,65
180	0,31	6,16	10,87	11,67
195	0,23	2,29	3,12	3,23
210	0,17	0,88	1,01	1,02

Quadro C.2 – Caudal simulado pelo modelo da onda cinemática para a parcela B.

Tempo (s)	Parcela B			
	Caudal simulado numericamente (ml/s)			
	1º evento	2º evento	3ºevento	4ºevento
15	0,00	0,10	0,26	0,31
30	0,00	0,80	2,04	2,40
45	0,00	2,42	5,98	6,66
60	0,00	3,98	7,41	8,16
75	0,00	4,43	8,16	8,94
90	0,00	4,68	8,59	9,38
105	0,00	4,81	8,84	9,64
120	0,00	4,89	8,98	9,79
135	0,01	4,93	9,07	9,87
150	0,01	4,95	9,12	9,93
165	0,01	4,97	9,15	9,96
180	0,01	4,97	9,17	9,97
195	0,01	2,39	3,56	3,75
210	0,01	1,13	1,42	1,46

Quadro C.3 – Caudal simulado pelo modelo da onda cinemática para a parcela C.

Tempo (s)	Parcela C			
	Caudal simulado numericamente (ml/s)			
	1º evento	2º evento	3º evento	4º evento
15	0,00	0,10	0,26	0,31
30	0,00	0,80	2,04	2,40
45	0,00	2,42	5,98	6,66
60	0,00	3,98	7,41	8,16
75	0,00	4,43	8,16	8,94
90	0,00	4,68	8,59	9,38
105	0,00	4,81	8,84	9,64
120	0,00	4,89	8,98	9,79
135	0,01	4,93	9,07	9,87
150	0,01	4,95	9,12	9,93
165	0,01	4,97	9,15	9,96
180	0,01	4,97	9,17	9,97
195	0,01	2,39	3,56	3,75
210	0,01	1,13	1,42	1,46

Quadro C.4 – Caudal simulado pelo modelo da onda cinemática para diferentes formas das parcelas no 1º evento de precipitação.

Tempo (s)	Caudal simulado para as várias formas no 1º evento (ml/s)								
	Fator de forma								
	0,003	0,007	0,013	0,18	0,5	1	1,62	2,42	3,38
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
45	0,08	0,05	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
60	0,12	0,11	0,10	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
75	0,14	0,14	0,13	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
90	0,16	0,16	0,15	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02
105	0,18	0,17	0,17	0,13	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03
120	0,19	0,19	0,18	0,16	0,11	0,08	0,06	0,05	0,04
135	0,20	0,20	0,19	0,18	0,15	0,10	0,08	0,07	0,06
150	0,21	0,20	0,20	0,19	0,18	0,14	0,11	0,09	0,07
165	0,21	0,21	0,21	0,20	0,19	0,17	0,13	0,11	0,09
180	0,22	0,22	0,22	0,21	0,20	0,19	0,17	0,14	0,12
195	0,07	0,09	0,10	0,15	0,16	0,16	0,16	0,14	0,12
210	0,02	0,04	0,05	0,11	0,13	0,14	0,14	0,14	0,12
225	0,01	0,02	0,02	0,08	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12
240	0,00	0,01	0,01	0,05	0,08	0,09	0,10	0,11	0,11
255	0,00	0,01	0,01	0,04	0,06	0,07	0,09	0,09	0,10
270	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
285	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
300	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
315	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
330	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
345	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
360	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04

Quadro C.5 – Caudal simulado pelo modelo da onda cinemática para diferentes formas das parcelas no 2º evento de precipitação.

Tempo (s)	Caudal simulado para as várias formas no 2º evento (ml/s)														
	Fator de forma														
	0,003	0,007	0,013	0,18	0,5	1	1,62	2,42	3,38	14,58	44,18	89,78	151,38	228,98	
15	1,67	1,22	0,92	0,24	0,14	0,10	0,08	0,07	0,06	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	
30	3,28	3,22	3,15	1,95	1,15	0,83	0,65	0,53	0,45	0,20	0,11	0,07	0,07	0,03	
45	4,19	4,15	4,12	3,82	3,48	2,56	2,01	1,65	1,39	0,65	0,37	0,25	0,21	0,15	
60	4,73	4,71	4,69	4,53	4,39	4,23	4,06	3,51	2,97	1,40	0,80	0,55	0,44	0,34	
75	5,06	5,05	5,04	4,94	4,86	4,79	4,71	4,62	4,51	2,46	1,40	0,98	0,77	0,60	
90	5,26	5,25	5,24	5,19	5,14	5,10	5,06	5,01	4,96	3,81	2,18	1,52	1,19	0,94	
105	5,38	5,38	5,37	5,34	5,31	5,29	5,26	5,23	5,21	4,91	3,11	2,18	1,70	1,35	
120	5,45	5,45	5,45	5,43	5,41	5,40	5,38	5,37	5,35	5,18	4,19	2,93	2,28	1,83	
135	5,50	5,50	5,50	5,48	5,47	5,47	5,46	5,45	5,44	5,33	5,12	3,79	2,94	2,36	
150	5,53	5,53	5,53	5,52	5,51	5,51	5,50	5,50	5,49	5,41	5,30	4,73	3,66	2,95	
165	5,54	5,54	5,54	5,54	5,53	5,53	5,53	5,52	5,52	5,46	5,40	5,28	4,46	3,60	
180	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	5,54	5,54	5,54	5,49	5,46	5,39	5,23	4,29	
195	0,16	0,27	0,39	1,52	2,16	2,57	2,86	3,09	3,27	3,95	4,33	4,51	4,57	4,31	
210	0,03	0,05	0,08	0,48	0,86	1,19	1,45	1,69	1,89	2,79	3,39	3,71	3,90	4,01	
225	0,01	0,02	0,03	0,20	0,40	0,59	0,77	0,95	1,11	1,96	2,64	3,04	3,30	3,47	
240	0,01	0,01	0,01	0,10	0,21	0,33	0,45	0,57	0,69	1,39	2,05	2,48	2,78	3,00	
255	0,00	0,01	0,01	0,06	0,13	0,20	0,28	0,36	0,44	0,99	1,59	2,02	2,34	2,58	
270	0,00	0,00	0,01	0,04	0,08	0,13	0,18	0,24	0,30	0,73	1,25	1,65	1,97	2,22	
285	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06	0,09	0,13	0,17	0,21	0,54	0,99	1,36	1,66	1,90	
300	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,07	0,09	0,12	0,16	0,42	0,79	1,12	1,40	1,64	
315	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,12	0,32	0,63	0,93	1,18	1,41	
330	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,05	0,07	0,09	0,26	0,52	0,77	1,01	1,22	
345	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,21	0,43	0,65	0,86	1,05	
360	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,04	0,05	0,06	0,17	0,36	0,55	0,74	0,91	

Quadro C.6 – Caudal simulado pelo modelo da onda cinemática para diferentes formas das parcelas no 3º evento de precipitação.

Tempo (s)	Caudal simulado para as várias formas no 3º evento de precipitação (ml/s)													
	Fator de forma													
	0,0032	0,0072	0,0128	0,18	0,5	0,98	1,62	2,42	3,38	14,58	44,18	89,78	151,38	228,98
15	3,24	2,98	2,44	0,63	0,38	0,28	0,22	0,18	0,15	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00
30	5,90	5,81	5,73	4,85	3,02	2,17	1,70	1,39	1,18	0,54	0,29	0,21	0,18	0,11
45	7,40	7,35	7,31	6,93	6,61	6,24	5,23	4,28	3,62	1,71	0,97	0,67	0,54	0,40
60	8,27	8,25	8,23	8,02	7,87	7,71	7,54	7,36	7,15	3,64	2,07	1,44	1,14	0,88
75	8,79	8,78	8,76	8,65	8,56	8,48	8,40	8,31	8,21	6,33	3,62	2,52	1,98	1,56
90	9,10	9,09	9,08	9,02	8,97	8,92	8,87	8,83	8,78	8,28	5,57	3,90	3,04	2,42
105	9,28	9,28	9,27	9,23	9,21	9,18	9,15	9,12	9,10	8,82	7,89	5,54	4,30	3,45
120	9,39	9,39	9,38	9,36	9,35	9,33	9,31	9,30	9,28	9,10	8,82	7,43	5,76	4,63
135	9,45	9,45	9,45	9,44	9,43	9,42	9,41	9,40	9,39	9,27	9,12	8,88	7,40	5,97
150	9,49	9,49	9,49	9,48	9,48	9,47	9,47	9,46	9,46	9,36	9,28	9,15	8,95	7,44
165	9,52	9,51	9,51	9,51	9,51	9,50	9,50	9,50	9,49	9,43	9,37	9,30	9,23	8,90
180	9,53	9,53	9,53	9,53	9,52	9,52	9,52	9,52	9,52	9,45	9,42	9,38	9,37	9,21
195	0,16	0,28	0,42	1,97	2,94	3,65	4,16	4,58	4,92	6,25	7,04	7,44	7,68	7,82
210	0,03	0,05	0,08	0,54	1,00	1,44	1,82	2,18	2,50	4,03	5,16	5,81	6,23	6,53
225	0,01	0,02	0,03	0,21	0,43	0,66	0,88	1,11	1,34	2,61	3,77	4,51	5,03	5,42
240	0,01	0,01	0,01	0,11	0,22	0,35	0,48	0,63	0,77	1,72	2,77	3,50	4,05	4,48
255	0,00	0,01	0,01	0,06	0,13	0,21	0,29	0,38	0,48	1,17	2,04	2,72	3,26	3,70
270	0,00	0,00	0,01	0,04	0,08	0,14	0,19	0,25	0,32	0,82	1,53	2,13	2,63	3,06
285	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06	0,09	0,13	0,18	0,22	0,60	1,16	1,68	2,14	2,53
300	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,07	0,10	0,13	0,16	0,45	0,90	1,34	1,74	2,11
315	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,10	0,12	0,34	0,71	1,08	1,43	1,76
330	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,06	0,07	0,09	0,27	0,57	0,88	1,19	1,48
345	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,22	0,46	0,73	0,99	1,25
360	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,04	0,05	0,06	0,18	0,38	0,61	0,84	1,06

Quadro C.7 – Caudal simulado pelo modelo da onda cinemática para diferentes formas das parcelas no 4º evento de precipitação.

Caudal simulado para as várias formas no 4º evento de precipitação (ml/s)														
Fator de forma														
Tempo (s)	0,0032	0,0072	0,0128	0,18	0,5	0,98	1,62	2,42	3,38	14,58	44,18	89,78	151,38	228,98
15	3,59	3,34	2,86	0,74	0,45	0,32	0,25	0,21	0,18	0,06	0,02	0,01	0,01	0,00
30	6,44	6,35	6,27	5,40	3,52	2,52	1,98	1,62	1,37	0,62	0,34	0,24	0,20	0,13
45	8,02	7,97	7,93	7,55	7,24	6,87	6,04	4,94	4,18	1,97	1,12	0,77	0,63	0,46
60	8,93	8,90	8,88	8,68	8,52	8,37	8,21	8,03	7,82	4,18	2,38	1,66	1,31	1,02
75	9,45	9,44	9,43	9,31	9,23	9,15	9,07	8,98	8,89	7,24	4,14	2,89	2,26	1,79
90	9,76	9,75	9,74	9,68	9,63	9,59	9,54	9,50	9,45	8,99	6,35	4,44	3,46	2,76
105	9,94	9,93	9,93	9,89	9,86	9,84	9,81	9,79	9,76	9,49	8,87	6,29	4,89	3,92
120	10,04	10,04	10,03	10,01	10,00	9,98	9,97	9,95	9,94	9,77	9,52	8,42	6,53	5,26
135	10,10	10,10	10,10	10,08	10,08	10,07	10,06	10,05	10,04	9,92	9,79	9,55	8,36	6,75
150	10,13	10,13	10,13	10,13	10,12	10,12	10,11	10,11	10,10	10,01	9,94	9,82	9,69	8,40
165	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,14	10,14	10,14	10,14	10,06	10,02	9,95	9,91	9,71
180	10,17	10,17	10,17	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,09	10,07	10,03	10,03	9,89
195	0,16	0,29	0,42	2,02	3,04	3,79	4,34	4,79	5,16	6,59	7,45	7,90	8,16	8,33
210	0,03	0,05	0,08	0,54	1,01	1,46	1,87	2,24	2,58	4,21	5,42	6,12	6,59	6,91
225	0,01	0,02	0,03	0,21	0,43	0,66	0,89	1,13	1,36	2,69	3,93	4,72	5,28	5,70
240	0,01	0,01	0,01	0,11	0,22	0,35	0,49	0,63	0,78	1,76	2,85	3,64	4,23	4,69
255	0,00	0,01	0,01	0,06	0,13	0,21	0,29	0,39	0,48	1,19	2,09	2,81	3,38	3,85
270	0,00	0,00	0,01	0,04	0,08	0,14	0,19	0,25	0,32	0,83	1,56	2,19	2,72	3,17
285	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06	0,09	0,13	0,18	0,22	0,60	1,18	1,72	2,20	2,61
300	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,07	0,10	0,13	0,16	0,45	0,91	1,37	1,78	2,16
315	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,10	0,12	0,35	0,72	1,10	1,46	1,80
330	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,06	0,07	0,10	0,27	0,57	0,90	1,21	1,51
345	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,22	0,46	0,74	1,01	1,27
360	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,04	0,05	0,06	0,18	0,38	0,61	0,85	1,08