



Helga Cristiana
Marques Fernandes

Medição e modelação da erosão do solo a micro-
escala, após incêndios florestais





**Helga Cristiana
Marques Fernandes**

**Medição e modelação da erosão do solo a micro-
escala, após incêndios florestais**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica de Jan Jacob Keizer, PhD e do Doutor João Pedro Nunes

Tese elaborada no âmbito do projecto EROSFIRE (POCI/AGR/60354/2004), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) com co-financiamento pelo FEDER no âmbito do Programa POCI2010
61166

o júri

presidente

Prof. Doutor António José Barbosa Samagaio

Professor associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António José Dinis Ferreira

Professor adjunto do Departamento de Ciências Exactas e do Ambiente da Escola Superior Agrária de Coimbra

Doutor Jan Jacob Keizer

Equiparado a Investigador Auxiliar do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro (Orientador)

Doutor João Pedro Carvalho Nunes

Estagiário de Pós-Doutoramento do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro (Co-Orientador)

agradecimentos

Agradeço ao meu namorado, Luís por todo o apoio e por compreender a minha ausência. Obrigada pelo ânimo e por tudo.

Agradeço à minha família por todo o apoio. Aos meus pais por toda a preocupação. À minha irmã por partilhar comigo toda uma vida.

Ao meu orientador Jacob Keizer pela orientação devida e por toda a compreensão, um especial agradecimento.

Ao meu co-orientador João Nunes por toda a ajuda com o modelo MEFIDIS e pela paciência, obrigado.

Um agradecimento especial a Maruxa pela ajuda preciosa em todo o trabalho. O meu muito obrigado.

Agradeço ao Sérgio todas as explicações sobre os processos hidrológicos e pela disponibilidade para tirar dúvidas.

A Ana Sofia Frias pela ajuda na compreensão do trabalho laboratorial e na sua execução, obrigado.

A Diana, Isabel, Marifé, Raquel, Silvia e Xana, pela simpatia e boa disposição que transmitem.

A todas as pessoas que contribuíram para que este trabalho fosse possível, muitos dos quais não tive a oportunidade de conhecer.

Obrigado a todos.

palavras-chave

Erosão hídrica, Incêndios florestais, Modelos de erosão, MEFIDIS

resumo

Esta dissertação tem como principal objectivo o aprofundamento do conhecimento sobre os fenómenos de erosão hídrica a micro-escala, nomeadamente após um incêndio florestal ocorrido no Verão de 2005 na localidade de Jafafe, onde se situa a área de estudo numa encosta composta por plantações de eucalipto.

São avaliadas as taxas de escorrência e erosão devidas a 18 simulações de chuva (RSE) realizadas em parcelas de simulação (0.28 m^2) em 5 períodos distintos, bem como as taxas de escorrência e erosão produzidas em micro-parcelas (0.28 m^2) sob chuva natural. Foi observada elevada variabilidade nos dados de escorrência e erosão ao nível temporal bem como espacial e para ambos os tipos de dados. A variabilidade temporal é devida à passagem do tempo após o incêndio, nomeadamente através da recuperação de vegetação, bem como a variações sazonais nas características do solo, nomeadamente a sua repelência à água e o seu teor de humidade.

Para a modelação da resposta hidrológica e de erosão foi seleccionado o modelo MEFIDIS, um modelo de base física. Na aplicação do modelo MEFIDIS, o ajuste dos parâmetros de entrada permitiu clarificar a influência da repelência à água e do coberto protector do solo como importantes factores condicionantes das taxas de escorrência e de perdas do solo observados nas simulações de chuva. Com o modelo, obtiveram-se melhores resultados para as simulações de chuva de alta intensidade do que de extrema intensidade. Uma possível explicação é que a extrema intensidade provoca maiores alterações nas condições de solo, nomeadamente a repelência à água, do que a alta intensidade.

keywords

Erosion, forest fire, Modelling, MEFIDIS

abstract

This thesis aims mainly to improve knowledge about erosion micro-scale phenomena, particularly after a forest fire occurred in the summer of 2005 in the town of Jafafe, which is the study area on a hillside composed of eucalyptus plantations.

Are evaluated the rates of runoff and erosion due to 18 rainfall simulations (RSE) conducted in simulation plots (0.28 m^2) in 5 separate periods, and rates of runoff and erosion produced in micro-plots (0.28 m^2) under natural rainfall. It was observed high variability in the data of runoff and erosion at time and space and for both types of data. The temporal variability is due to the passage of time after the fire, particularly by the recovery of vegetation and by the seasonal variations in soil characteristics, including its water repellency and moisture content.

For the modeling of hydrologic and erosion response, was selected model MEFIDIS, a physically based model. When applying this model, adjusting the input parameters have clarified the influence of water repellency and soil protective cover as important influential factors to rate of runoff and soil losses observed in the rainfall simulations. With the model, it was obtained better results for high rainfall intensity simulations than the extreme intensity. One possible explanation is that the extreme intensity causes major changes in soil conditions, such as water repellency, than high intensity.

Índice

Índice de Figuras.....	iii
Índice de Tabelas.....	vi
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Factores com influência na erosão do solo.....	2
1.2.1. Precipitação.....	2
1.2.2. Características topográficas do terreno.....	3
1.2.3. Repelência à água.....	3
1.2.4. Coberto vegetal e Uso do solo	5
1.3. Objectivos.....	6
2. Modelação da erosão	7
2.1. Breve revisão de Modelos de erosão.....	7
2.2. O modelo MEFIDIS	8
2.2.1. Pressupostos do Modelo.....	8
2.2.2. Formulação Matemática	9
2.2.3. Implementação	14
3. Área de estudo.....	15
3.1. Localização geográfica.....	15
3.2. Clima.....	16
3.3. Geologia e solos	17
3.4. Coberto vegetal e uso do solo.....	17
4. Material e Métodos.....	19
4.1. Simulações de Chuva.....	19
4.1.1. Desenho experimental	20
4.1.2. Medição e Monitorização das características do solo	21
4.2. Micro-parcelas sob chuva natural.....	24
4.3. Transectos	25
4.4. Análises laboratoriais	26



4.4.1.	Amostras de solo	26
	A – Humidade.....	26
	B - Textura do solo	26
4.4.2.	Concentração de sedimentos e conteúdo em matéria orgânica	27
4.5.	Análise de dados	29
4.5.1.	Dados de precipitação.....	29
4.6.	Modelo MEFIDIS.....	30
4.6.1.	Parâmetros de entrada – Parametrização	30
4.6.2.	Sensibilidade do modelo	32
5.	Resultados e discussão	35
5.1.	Simulações de chuva	35
5.1.1.	Resposta hidrológica	35
5.1.2.	Erosão hídrica.....	43
5.2.	Micro – Parcelas de Erosão por chuva natural.....	49
5.2.1.	Escurrência superficial.....	49
5.2.2.	Erosão hídrica.....	57
5.3.	Modelação da erosão.....	63
5.3.1.	Modelação das simulações de chuva	63
	A) Sensibilidade do modelo à alteração dos parâmetros de entrada	64
	B) Parametrização inicial - Escurrência.....	65
	C) Parametrização inicial - Erosão	68
	D) Calibração da escurrência	70
	E) Validação da escurrência.....	74
	F) Calibração da erosão	77
	G) Validação da erosão	79
6.	Conclusões.....	82
	Referências	86

Índice de Figuras

Figura 1 – Efeito da repelência à água, no solo.....	4
Figura 2 - Localização Geográfica.....	15
Figura 3 – Simulador de Chuva.....	19
Figura 4- Desenho esquemático das parcelas de simulação, ao longo da encosta em estudo (adaptado de Prats., 2007).....	21
Figura 5- Medidor de rugosidade.....	23
Figura 6- Desenho esquemático das micro-parcelas sob chuva natural, ao longo da encosta em estudo (adaptado de Prats., 2007).....	24
Figura 7 – Micro-parcelas sob chuva natural. Equipamento de recolha da escorrência.....	24
Figura 8 – Escorrência (mm; %) determinada nas parcelas de simulação segundo a intensidade da precipitação.....	35
Figura 9 – Variação temporal da taxa de escorrência (%) e da repelência MED (superfície) em cada secção parcela.....	36
Figura 10 - Correlação entre o coeficiente de escorrência (%) e o tempo para esta iniciar (minutos).....	38
Figura 11 - Correlação entre o coeficiente de escorrência (%) e o tempo para esta terminar (minutos).....	38
Figura 12 - Hidrograma referente ao período de Abril na parcela fixa F.RSE1.....	39
Figura 13 - Hidrograma referente ao período de de Julho para a parcela fixa, F.RSE3.....	39
Figura 14- Hidrograma referente ao período de Novembro para a parcela fixa, F.RSE ₄	39
Figura 15- Hidrograma referente ao período de Outubro para a parcela fixa, F.RSE ₄	39
Figura 16 – Representação das condições pluviométricas (precipitação semanal) nas datas de realização das simulações de chuva, em Jafafe.....	41
Figura 17 – Variação temporal da perda média de sedimentos ($g.m^{-2}$) em função da escorrência (mm), em cada parcela.....	44
Figura 18 - Variação temporal da perda média de sedimentos (mg/l) em função da escorrência (mm), em cada parcela.....	45
Figura 19 – Evolução do coberto do solo nas parcelas de simulação instaladas.....	46



Figura 20- Variação temporal do coberto, no topo da encosta de Jafafe I (parcela M.RSE1 e F.RSE1), ordem temporal: Setembro-2005, Abril-2006 e Outubro-2006.	46
Figura 21 - Relação entre a escorrência produzida em cada simulação e o coberto protector total da parcela (%).....	47
Figura 22 - Relação entre a perda de sedimentos (g.m^{-2}) em cada simulação e o coberto protector total da parcela (%)	47
Figura 23 - Escorrência (mm; %) determinada nas parcelas sob-chuva natural segundo a posição na encosta.	49
Figura 24 - Variação da precipitação semanal (mm) e do coeficiente de escorrência (%) para as 2 micro- parcelas na base da encosta: RP2-1, RP2-L1 n=36/parcela).....	50
Figura 25 - Variação da precipitação semanal (mm) e do coeficiente de escorrência (%) para as 2 micro-parcelas sob chuva natural no topo da encosta: RP3-2 e RP ₃ -L2 (n=36/parcela).	51
Figura 26 - Evolução temporal da produção de escorrência (%) nas nas micro-parcelas sob chuva natural; representação estatística.	52
Figura 27 - Evolução temporal da produção de escorrência (%) nas micro-parcelas sob chuva natural (esquerda) e nas parcelas de simulação (direita); representação estatística.	52
Figura 28 - Produção de escorrência (%) nas micro-parcelas sob chuva natural (esquerda) e nas parcelas fixas de simulação (direita) segundo a posição no declive (topo e base). Representação estatística.	54
Figura 29 – Variação da escorrência (mm; %) segundo sub-períodos de hidrofobia ou hidrofilia do solo, para as 4 micro-parcelas de Jafafe I (adaptado de Malvar, 2007)	55
Figura 30- Relação entre as perdas por erosão (g.m^{-2}) e a escorrência (mm) para os pares de micro-parcelas adjacentes (n = 20 – 26/parcela).....	57
Figura 31 - Perda de sedimentos (g.m^{-2} ; $\text{g/m}^2.\text{mm}$ precipitação), fracção orgânica e mineral, nas micro - parcelas sob chuva natural, conforme a sua posição na encosta.....	58
Figura 32 - Evolução temporal da taxa de erosão (g.m^{-2}) nas micro-parcelas sob chuva natural; representação estatística.	59
Figura 33- Evolução temporal da produção global de sedimentos (g.m^{-2}) nas micro-parcelas sob chuva natural (esquerda) e nas parcelas de simulação (direita); representação estatística (n=2-4).	59
Figura 34 – Frequência (%) associada a intervalos de taxas de erosão encontrados nas parcelas de simulação e sob chuva natural.....	61

Figura 35 - Relação entre a escorrência estimada pelo modelo e a escorrência observada, para três conjuntos de parâmetros, na calibração nº1 (n = 8 / calibração).....	66
Figura 36 – Curvas de evolução temporal dos resultados de escorrência observada e fornecida pelo modelo, para os três cenários da calibração 1.....	67
Figura 37 – Relação entre a escorrência estimada pelo modelo e a escorrência observada, para três conjuntos de parâmetros, na calibração nº1 (n = 8 / calibração).....	68
Figura 38 - Curvas de evolução temporal dos resultados de erosão observada e fornecida pelo modelo, para os três cenários da calibração 1.....	69
Figura 39 – Evolução temporal da escorrência (mm) observada e dos resultados do modelo nas várias calibrações.	74
Figura 40 - Evolução temporal da escorrência (mm) observada e dos resultados da validação.	76
Figura 41 – Relação entre a erosão modelada e observada (g) para as parcelas seleccionadas para calibração (F.RSE ₁ e F.RSE ₂).	78
Figura 42 - Evolução temporal da erosão (g) observada e dos resultados do modelo em várias calibrações.....	79
Figura 43 - Evolução temporal da erosão (g) observada e dos resultados da validação.	80



Índice de Tabelas

Tabela 1 – Indicadores da intensidade do incêndio.....	16
Tabela 2 – Características gerais do povoamento florestal.	17
Tabela 3-Classes de repelência segundo o teste (MED) do etanol; Classes segundo Doerr (1998)	22
Tabela 4- Diâmetro das fracções granulométricas mais importantes, segundo as escalas de classificação de Attemberg e USDA.	27
Tabela 5- Parâmetros de entrada no modelo, definição, metodologia de cálculo ou PTF's de conversão	31
Tabela 6 – Frequência de registo de cada uma das formas de hidrograma observadas nas simulações de chuva em estudo, segundo a intensidade da precipitação.....	42
Tabela 7 – Taxas de perda de sedimentos registadas ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$) em Jafafe 1, nas simulações de alta e baixa intensidade e conforme a sua posição na encosta.....	43
Tabela 8 – Escorrência produzida nas 4 simulações de chuva efectuadas nas parcelas fixas de simulação e escorrência devida à chuva natural ($\text{mm};\%$).....	54
Tabela 9 – Coeficientes de correlação da escorrência (mm) com a precipitação (mm) e a I-30 ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) para as várias parcelas, segundo períodos de repelência.....	56
Tabela 10 – Taxa de erosão média global ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{mm}$) produzida nas 4 simulações de chuva efectuadas nas parcelas fixas de simulação e escorrência devida à chuva natural ($\text{mm}; \%$).	60
Tabela 11- Sensibilidade da escorrência aos parâmetros de entrada ($n=10/\text{parâmetro}$).	64
Tabela 12 – Sensibilidade da Erosão aos parâmetros de entrada ($n=10/\text{parâmetro}$).....	65
Tabela 13 – Diferença numérica e coeficientes de correlação e de Nash – Sutcliffe entre resultados de escorrência do modelo e observados, para as três situações de parametrização.	67
Tabela 14 – Diferença numérica e coeficientes de correlação e de Nash – Sutcliffe entre resultados de erosão do modelo e observados, para as três situações de parametrização.	69
Tabela 15- Caracterização das calibrações efectuadas.....	71
Tabela 16 – Caracterização da terceira calibração efectuada.	72
Tabela 17 – Resultados da calibração da escorrência.....	73
Tabela 18 - Resultados da validação da escorrência.....	75
Tabela 19 – Resultados da calibração da erosão.	78
Tabela 20 - Resultados da validação da erosão.	80

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Os incêndios florestais, por induzirem alterações no coberto vegetal e nas propriedades do solo, levam a alterações consideráveis nos processos geomorfológicos e hidrológicos que, frequentemente intensificam o processo de erosão de solo (Shakesby e Doerr, 2006). Estas eventuais perdas representam uma preocupação crescente no âmbito da gestão de recursos naturais, dado que o solo é um recurso finito, limitado e pouco renovável com taxas de formação extremamente lentas.

A quantificação da vulnerabilidade ou susceptibilidade do solo à erosão é essencial para a gestão deste recurso. Esta necessidade torna-se imperativa em virtude da ocorrência de incêndios florestais que, nas últimas décadas, devastaram, em Portugal, cerca de 100.000 ha de áreas rurais por ano (Pereira et al., 2005). É, assim, crucial o desenvolvimento de ferramentas que permitam avaliar os potenciais impactos ao nível hidrológico, como base de tomada de decisão sobre implementação de estratégias de mitigação.

Este estudo pretende aprofundar o conhecimento acerca do risco de erosão em áreas florestais recentemente ardidas, pelo que se insere no âmbito do projecto “EROSFIRE”¹ (Ferramenta de apoio na decisão para identificação, com base em modelação, do risco de erosão do solo após incêndios florestais; POCI/AGR/60354/2004). Este Projecto, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito do programa nacional de apoio a projectos de I&D (Investigação e Desenvolvimento), foi criado para responder às necessidades ao nível da predição do risco de erosão, através do desenvolvimento de uma ferramenta de modelação para identificação das áreas com maior risco de erosão hídrica após incêndios, e na sequência das práticas florestais posteriores (Prats, 2007). Este conhecimento permite seleccionar as áreas prioritárias a actuar, dado ser impraticável a actuação sobre todo o terreno afectado. Contribui, assim, para a gestão sustentável de áreas recentemente ardidas.

1.2. Factores com influência na erosão do solo

A erosão hídrica consiste na desagregação, transporte e deposição de partículas do solo através do impacto da precipitação (erosividade da precipitação) e do escoamento superficial do solo. É um processo complexo e de intensidade variável, dependendo de factores como o regime pluviométrico, características e usos do solo, topografia (relevo do terreno). A susceptibilidade à erosão pode mesmo variar de um tipo de solo para outro, mesmo para as condições iguais de declividade, precipitação, cobertura vegetal e práticas de controlo de erosão (Mendes, 2006). Essa diferença é devida às propriedades inerentes do solo e é referida como erodibilidade do solo, factor determinante no processo de erosão. A erodibilidade pode definir-se como vulnerabilidade ou susceptibilidade do solo à erosão hídrica superficial (Mendes, 2006).

Para que os processos erosivos aconteçam basta que exista solo e agentes transportadores, de entre os quais se destaca a água, resultante do escoamento superficial (Guerra e Botelho, 1996). A erosão do solo acontece, por si só, de forma natural, apesar de a um ritmo bastante lento. Se não ocorrerem quaisquer alterações no equilíbrio dinâmico deste processo, o seu ritmo permite que a redistribuição natural de partículas compense a perda do solo (Vieira, 2008). No entanto, existem factores que intensificam o fenómeno de erosão do solo, nomeadamente a ocorrência de incêndios, passando a ser denominada de erosão acelerada. De modo a compreender a variabilidade decorrente do processo de erosão acelerada do solo, abordam-se, de modo mais ou menos aprofundado, os principais factores que intervêm nessa variação e de que modo os incêndios florestais induzem alterações em cada um.

1.2.1. Precipitação

Pela própria definição de erosão, a precipitação é o principal factor condicionante deste processo, quer ao nível do seu impacto directo sobre o solo, quer relacionado com o arraste de partículas do solo através do escoamento (escoamento superficial) produzido, resultante da chuva que cai e não infiltra no solo. Em ambas as formas, a intensidade da

precipitação é determinante, dado que tanto o impacto da chuva no solo como a natureza do escoamento estão dependentes deste factor. O volume de água que o solo é capaz de reter, depois de precipitações intensas, está directamente relacionado com a porosidade total dos solos, que por sua vez depende de outros factores, como a textura, a estrutura e o conteúdo em matéria orgânica (Varela, 2007).

Foi calculado o I-30 para cada evento de precipitação (Intensidade máxima de precipitação durante 30 minutos). Esta foi calculada considerando que um evento inicia quando não há precipitação durante pelo menos seis horas.

1.2.2. Características topográficas do terreno

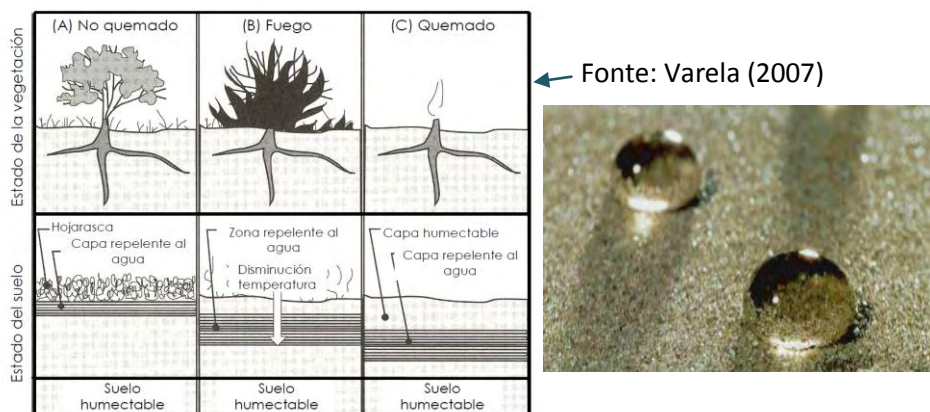
As características topográficas específicas do terreno, como sejam as características das encostas, influenciam de forma variada o processo de erosão. A combinação da forma (côncava ou convexa, com a primeira mais propensa à erosão), comprimento ou declividade das encostas determina se a água escoar com maior ou menor intensidade. O declive da encosta influencia na vulnerabilidade do solo à erosão, uma vez que para maiores inclinações, aumenta a velocidade da enxurrada e, conseqüentemente acresce a sua força de desagregação e a sua capacidade de transportar partículas maiores. Assim, a quantidade de chuva que cai no solo e que infiltra é diminuída, levando a uma produção superior de escorrência. O comprimento das encostas também é um importante factor controlador dos processos erosivos, pois quanto mais longas, maior a capacidade de concentração dos fluxos de água, aumentando, assim, os riscos de erosão.

1.2.3. Repelência à água

A repelência do solo à água é uma propriedade físico-química do solo em que as forças coesivas das moléculas de água são mais fortes que as forças de aderência entre as moléculas de água e as partículas do solo. A repelência entre a água e uma superfície

sólida é originada por forças de adesão (forças de atracção mútua) e forças de coesão (forças de atracção das moléculas da água) (Doerr et al., 2000). Ocorre naturalmente na maioria dos solos, sendo devida ao revestimento entre compostos orgânicos hidrofóbicos e as partículas do solo (Doerr et al., 2000).

A repelência varia frequentemente, entre estações secas e húmidas, em resposta às alterações meteorológicas, especialmente a precipitação e a temperatura e é afectada pela ocorrência de incêndios e pela proximidade ou afastamento temporal pós-incêndio (Keizer et al., 2008). A intensificação do fenómeno de repelência após incêndios florestais é considerada como devido à combustão da matéria orgânica, que ocorre a altas temperaturas (Varela, 2007). Esta vai produzir compostos orgânicos em forma de vapor, que se movem desde a superfície até camadas inferiores mais frias onde condensam, criando uma camada sub-superficial fortemente hidrofóbica. Acresce a este facto o fortalecimento, devido ao calor alcançado durante a combustão, da união entre as substâncias hidrofóbicas e as partículas de solo, o que torna estas últimas mais hidrofóbicas (Varela, 2007). A Figura 1 mostra o efeito da repelência no solo.



← Fonte: Varela (2007)

Figura 1 – Efeito da repelência à água, no solo.

As consequências da repelência do solo à água incluem a redução da capacidade de infiltração e aumentos dos fluxos de escoamento e erosão. Estes acréscimos dependem da severidade e variabilidade espacial da repelência à água. A variabilidade espacial é devida à existência de macroporos ou outros caminhos preferenciais de

infiltração que levam a que, eventualmente, a água entre no solo, provocando, no entanto uma distribuição desigual de humidade (Doerr et al, 2000).

A repelência pode ser induzida por incêndios florestais e, juntamente com a perda de coberto vegetal é referida como a principal causa do acréscimo da escorrência e erosão acelerada em solos ardidos (Varela et al, 2005). Em florestas maduras, a repelência do solo à água tem um menor contributo na produção de fluxo superficial e erosão em florestas maduras, onde a camada de litter e matéria orgânica do solo contribuem para minimizar os respectivos impactos hidrológicos.

1.2.4. Coberto vegetal e Uso do solo

O coberto do solo é um factor determinante na erosão hídrica, tendo uma acção directa e efectiva na sua redução. Como camada protectora do solo, promove a dissipação da energia cinética das gotas da chuva, a denominada intercepção pela vegetação, diminuindo a desagregação das partículas de solo. Actua ainda na redução da velocidade do escoamento superficial e, conseqüentemente, no potencial erosivo da enxurrada (Guerra e Botelho, 1996).

A presença de coberto vegetal tem efeito na alteração da rugosidade ('random roughness') (Cremers et al., 1996). A rugosidade superficial do solo condiciona a quantidade de água que pode ser armazenada em depressões, a fracção da superfície do solo coberta por água, a quantidade de chuva necessária para a escorrência iniciar e a taxa de fluxo superficial (Cremers et al., 1996). O coeficiente de rugosidade de Manning (n) é o principal factor na determinação da velocidade de escorrência e conseqüentemente, da altura de infiltração (HERNANDEZ et al., 2000). Sendo assim, limita o fluxo superficial e aumenta a infiltração e o armazenamento (HERNANDEZ et al., 2000). Os solos de áreas ardidas são, assim, mais propensos à erosão, uma vez que os incêndios florestais, ao destruírem a vegetação, deixam os solos expostos directamente à acção dos agentes erosivos. São reduzidas as taxas de infiltração, aumentando os coeficientes de escoamento superficial.

As práticas de gestão do solo (ex: mecanização intensa) podem também influenciar bastante na perda de solo, nutrientes e matéria orgânica, ao induzirem a erosão hídrica (Schwarz et al, 2003).

1.3. Objectivos

Este estudo tem como principal objectivo melhorar o conhecimento científico sobre os fenómenos de erosão hídrica a micro-escala, após incêndios florestais, de modo a possibilitar uma mais adequada gestão do solo após incêndios florestais e, assim, contribuir para uma maior sustentabilidade das florestas portuguesas.

Os objectivos específicos são:

- Compilar e analisar dados de medição de escoamento e erosão obtidos anteriormente num eucaliptal recentemente ardido;
- Comparar as respostas hidrológicas e de erosão do solo medidos por dois métodos distintos: Simulações de chuva (RSE's) e micro – parcelas, medidos sob condições de chuva artificial e natural, respectivamente;
- Aplicar o modelo MEFIDIS, para modelação da erosão.

2. Modelação da erosão

2.1. Breve revisão de Modelos de erosão

Os modelos são importantes ferramentas dado que possibilitam a compreensão dos processos hidrológicos, o desenvolvimento de práticas de conservação bem como a avaliação dos riscos e benefícios de determinados usos do solo durante vários períodos de tempo (Spruill et al., 2000).

A Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) ou a sua versão modificada RUSLE parecem ser um modelo bastante usado na estimação da erosão do solo, tendo em conta a vasta bibliografia encontrada nesse âmbito (Angima et al., 2003). A USLE é um modelo empírico, desenvolvido para aplicação em áreas agrícolas, e modificado para RUSLE (REVISED Universal Soil Loss Equation). Estima as perdas de solo para longos períodos (ex. erosão média num período de tempo superior a 10 anos.), pelo que não é adequado para eventos isolados.

Nas últimas décadas, passou-se de uma abordagem essencialmente empírica, como o caso da USLE, para a utilização de modelos de erosão cada vez mais complexos capazes de estimar as consequências de eventos singulares de chuva (Nunes et al., 2005). Alguns exemplos destes modelos são EUROSEM, KINEROS, LISEM, WEPP e MEFIDIS (Nunes et al., 2005). Não obstante o progresso científico que estes modelos reflectem, a predição da erosão ainda envolve um grau de incerteza considerável. A incerteza está relacionada com a variabilidade dos dados de entrada e com a natureza não - linear dos processos de escorrência e erosão (Nunes et al., 2005). Esta incerteza leva a resultados de simulação altamente variáveis e muito sensíveis aos parâmetros de entrada (Nunes et al., 2005) e depende em larga medida de uma calibração adequada dos modelos.

2.2. O modelo MEFIDIS

O modelo MEFIDIS foi desenvolvido para simular as consequências (ex: risco de inundação e erosão) das alterações climáticas e do uso do solo na escorrência superficial e erosão hídrica no interior de bacias hidrográficas, causada por eventos extremos de precipitação (com duração na ordem de horas) (Nunes et al., 2005). Apresenta, assim, aplicação válida no estudo da erosão em áreas áridas. Importa referir que a formulação de base física associada a este modelo é relativamente complexa e, como tal, requer uma parametrização intensa e, por conseguinte um largo conjunto de dados (Harmon et al, 2001). De modo a ultrapassar as dificuldades em termos de disponibilidade de dados que, muitas vezes dificultam a modelação da erosão, o projecto EROSFIRE aposta em trabalho de campo para medição e recolha de todos os dados necessários para modelação, nomeadamente a realização de simulações de chuva (RSE's) em parcelas de erosão. São, também, usadas as parcelas de erosão sob precipitação natural (da mesma dimensão das parcelas de RSE) com o principal objectivo de validar os resultados das RSE's. Estas micro-parcelas são, então, usadas para avaliar se as taxas de escorrência superficial e erosão produzidas pelas simulações de chuva são comparáveis com as taxas produzidas por eventos naturais.

2.2.1. Pressupostos do Modelo

O modelo MEFIDIS simula padrões de erosão dentro de sub-bacias causados por eventos singulares de chuva, portanto tem de se modelar evento a evento. O MEFIDIS foi testado em eventos isolados (duração entre 20 min e 72 h e a área de aplicação é uma bacia de tamanho pequeno-médio (testada entre 0.05 e 120 km²).

O modelo tem em conta a distribuição espacial dos dados. A área de simulação é dividida numa grelha ortogonal de células quadradas que, por assumpção, representa condições homogéneas. As dimensões da grelha dependem da resolução da informação espacial disponível. A resolução típica está entre 5x5m e 30x30m, mas o modelo também

tem sido aplicado para simular plumas no laboratório em células de 0.3x0.3m (Prats, 2007). Neste estudo, o modelo simula a resposta a erosão em micro-parcelas de 0.28 m².

A dinâmica temporal associada aos processos erosivos também é tida em conta. . A aproximação explícita utilizada para resolver as equações requer curtos intervalos de tempo, normalmente entre 0.1 e 0.3s x tamanho de célula em metros (ou de 1s a 10s).

A modelação da erosão pode ser dividida em duas fases paralelas: a produção de escorrência e o desprendimento-deposição de sedimentos. Este último é simulado tanto ao nível do impacto das gotas da chuva (salpicadura) como através do fluxo superficial. São tidos em conta ambos os processos de produção de escorrência: Hortoniano (entrada de água superior à capacidade de infiltração) e por excesso de saturação (Nunes et al., 2005).

O fluxo superficial e a erosão são calculados para cada célula tendo em conta equações de base física (Nunes et al., 2005). A escorrência é calculada como uma onda cinemática, enquanto o fluxo de sedimentos suspensos é determinado tendo em conta a capacidade de transporte da escorrência. Os outputs de escorrência e sedimentos suspensos em cada célula são encaminhados para a célula seguinte seguindo a linha de máxima pendente.

2.2.2. Formulação Matemática

A - Produção de escorrência

A produção e direcção da escorrência através da bacia são determinadas através das equações de St. Venant. A equação da Continuidade tem em conta a interceptção e a infiltração (Eq. 2.1):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = R - I - F \quad (\text{Eq.2.1})$$

Onde:

$Q = \text{taxa de fluxo superficial } [m^3 \cdot s^{-1}]$

$A = \text{secção de fluxo superficial } [m^2]$

$R = \text{taxa de precipitação por unidade de comprimento de fluxo } [m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$

$I = \text{taxa de Intercepção por unidade de comprimento de fluxo } [m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$

$F = \text{taxa de infiltração por unidade de comprimento de fluxo } [m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$

$x, t = \text{dimensão espacial } [m] \text{ e temporal } [s]$

A evapotranspiração e o fluxo lateral sub-superficial não são simulados, uma vez que na maioria dos casos ocorrem em escalas temporais superiores à de um evento singular. A equação (2.1) é resolvida com uma aproximação de diferencial finito, usando um esquema explícito de FTBS ('Forward-Time Backward-Space' = adiante no tempo e atrás no espaço), assumindo que o tamanho da célula iguala o comprimento de fluxo (Nunes, 2007). Este método requer o uso de intervalos de tempo muito curtos, de modo a assegurar a estabilidade dos resultados (Nunes et al., 2005).

A formulação de base do MEFIDIS para o cálculo das variáveis necessárias para a determinação da escorrência, que constam na Eq. (2.1), apresentam-se a seguir.

A.1.- Determinação da Intercepção

A intercepção é calculada segundo Linsley et al. (1975), conforme refere Nunes et al (2005), como função da capacidade máxima de retenção de água através da intercepção e da fracção de coberto vegetal.

A.2. -Determinação da taxa de infiltração

A taxa de infiltração é calculada, para cada passo de tempo, segundo o método de Green-Ampt, conforme refere Nunes et al. (2005), através da equação seguinte (Eq.2.2).

$$F = K_{sat} \left(\frac{\psi (1 - S_i) \theta}{F_c} + 1 \right)$$

(Eq. 2.2)

Onde:

F : taxa de infiltração [$mm.h^{-1}$]

K_{sat} : Condutividade hidráulica saturada do solo [$mm.h^{-1}$]

ψ : potencial mátrico do solo (mm)

S_i : Saturação em humidade do solo, no início do evento

θ : Porosidade do solo (fracção)

F_c : Infiltração acumulada (mm)

O modelo MEFIDIS tem em conta, na simulação dos processos hídricos, a precipitação e a capacidade de infiltração, simulando também a retenção superficial bem como o excesso de saturação do solo com base na água contida dentro de cada célula.

A.3.- Fluxo superficial de escorrência

A retenção superficial da escorrência é um fenómeno que ocorre como resultado da rugosidade superficial do terreno. A fracção de escorrência superficial, é calculada tendo em conta o armazenamento em depressões, sendo estimada a partir da capacidade máxima de armazenamento superficial e da taxa de fluxos laterais (R-I-F na eq. (2.1)), segundo Linsley et al. (1975), como refere Nunes et al., 2005. O fluxo de escorrência é estimado considerando a aproximação de uma onda cinemática, de acordo com a equação de Manning-Strickler (Eq. 2.3):

$$Q = \frac{A^{5/3} \times S_0^{1/2}}{n \times P_0^{2/3}} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde:

S : declive (m/m)

n : Coeficiente de rugosidade de Manning

P : Perímetro da superfície de fluxo ou perímetro molhado (m)

$Q, A \rightarrow$ definidos na Eq.(2.1)

A largura do fluxo que determina o perímetro molhado é calculada através da fracção de célula coberta por água, que é tida como uma aproximação da relação entre a altura de escorrência superficial e a capacidade máxima de armazenamento em depressões.

B - Desagregação e transporte das partículas de solo

Para simular o processo de desagregação e transporte do solo, o modelo MEFIDIS tem por base a equação de continuidade, descrita por Foster (1982) e Chapra (1997), como refere Nunes. (2007). Neste domínio, toma-se em conta os rácios de distribuição de sedimentos em interfluvios ('interrill') e em pequenos canais ('rills'). A deposição do solo ocorre quando a taxa de distribuição, em 'rills', de sedimentos suspensos no fluxo é negativa. Por seu lado, nos pequenos interfluvios esta tem lugar devido à salpicadura da gota de chuva. Neste processo, os fluxos de entrada e saída são, também considerados. A equação que engloba estes processos (eq. 2.4) é a seguinte:

$$\frac{\partial(A \cdot C_{sed})}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_{sed})}{\partial x} = D_s + D_r \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Onde:

C_{sed} : Concentração de sedimentos no fluxo [$kg \cdot m^{-3}$]

D_s e D_r : taxas de produção de sedimentos nos interfluvios e pequenos canais,

por unidade de comprimento de fluxo [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]

A, Q, t e x : definidos na Eq.(2.1)

Tal como a equação (2.1), a Eq. (2.4) é resolvida com uma aproximação de diferencial finito, usando um esquema FTBS (adiante no tempo e atrás no espaço).

Os processos de erosão em grandes canais ('gully erosion') não são simulados devido às incertezas associadas aos modelos actuais (Nunes et al., 2005).

B.1.- Erosão devida ao impacto das gotas

É assumido que a distribuição de sedimentos a partir de interfluvios resulta apenas da erosão por salpico (‘splash erosion’). A taxa de desagregação do solo por efeito de salpico é calculada de acordo com a Eq. (2.5.). O coberto do solo com vegetação ou pedras é considerado como factor de protecção face ao impacto das gotas de chuva e, assim, contra a desagregação do solo. A taxa de desagregação, em solos sem coberto protector, é calculada a partir da coesão do solo e da percentagem de argila, de acordo com “Sharma et al., 1993”, como refere Nunes et al.,2005.

$$D_s = K_p \times E \times (R - R_c) \times R_h \times R_{c_v} \times A_s \quad \text{(Eq. 2.5)}$$

Onde:

K_p : Taxa de desagregação do solo por uma gota de água [kg/kJ]

E : Energia cinética efectiva da precipitação [J/m^3]

i : taxa de precipitação (m/s)

i_c : limiar da taxa de precipitação para dar início à desagregação do solo [m/s]

R_h : coeficiente de amortecimento do impacto da precipitação

R_c : fracção da superfície coberta por pedras ou vegetação

A : Área da célula do modelo [m^2]

D_s : definida na Eq.(2.4)

A taxa de desagregação do solo (K_p), a energia cinética da precipitação (E) e a taxa de precipitação crítica (i_c) são função da força crítica de desagregação do solo (‘Critical shear stress’) e da fracção mássica de argila no solo. O coeficiente de amortecimento do impacto da precipitação (R_h) está, por seu lado, relacionado com a profundidade de água acumulada à superfície e com o diâmetro das gotas de chuva, sendo mínimo para profundidades de água entre 1/3 e 3 vezes o diâmetro das gotas de chuva.

B.2.- Erosão devida ao fluxo superficial

A desagregação do solo e sua deposição em pequenos canais (rills) são simuladas em função do fluxo superficial, utilizando a abordagem da capacidade de transporte de sedimentos. Esta é calculada a partir da velocidade do fluxo e do tamanho das partículas do solo, ocorrendo a desagregação de mais partículas se esta capacidade excede os sedimentos em suspensão, senão ocorre a deposição. A equação que traduz este processo (Eq. (2.6)) é:

$$D_r = Y (T_C - C_{sed}) \times u_{sed} \times w \times dx \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Onde:

Y : *factor de eficiência de desagregação/deposição*

T_C : *Capacidade de transporte de sedimentos do fluxo superficial [kg/m³]*

C_{sed} : *Concentração de sedimentos no fluxo superficial [kg/m³]*

u_{sed} : *Velocidade de sedimentação de partículas [m/s]*

w e dx : *largura e comprimento do fluxo [m]*

D_r : *definido na Eq.(2.5)*

O modelo assume que os pequenos canais se formam por todo o comprimento da célula, com larguras que totalizam a largura total de fluxo. A velocidade de sedimentação está relacionada com o diâmetro das partículas.

2.2.3. Implementação

O modelo MEFIDIS é implementado como um programa baseado em ambiente Matlab. É usada a versão do modelo 'Single Cell' para simulação da erosão em parcelas experimentais (0.25 m² a 0.50 m², equivalente a um parcela singular na versão do modelo 'Grid'); Nunes e Benali, 2009.

3. Área de estudo

3.1. Localização geográfica

A área de estudo localiza-se na localidade de Jafafe, na zona Centro de Portugal, distrito de Aveiro, concelho de Águeda, freguesia de Macinhata do Vouga (Figura 2). Encontra-se a uma altitude média de 65 m acima do nível médio da água do mar, apresentando as seguintes coordenadas UTM:

X : 29546991

Y : 4502660

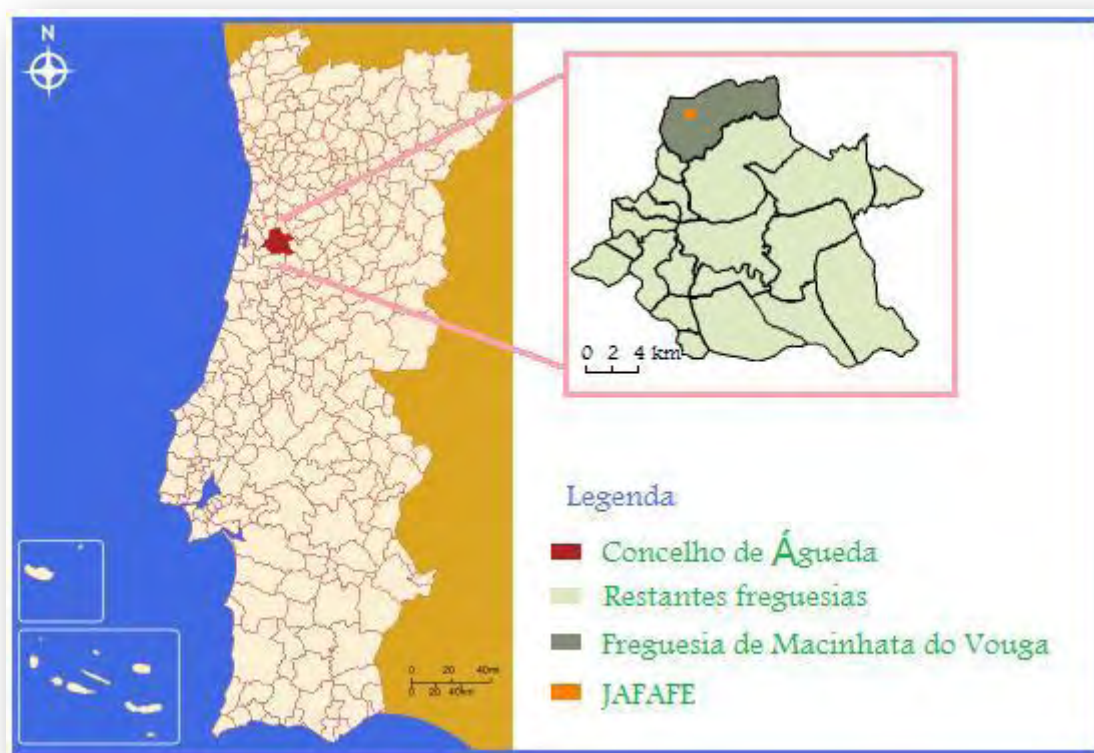


Figura 2 - Localização Geográfica.

(adaptado de Wikipedia)

Em Julho de 2005 ocorreu um incêndio em Jafafe que apresentou características de acordo com os critérios inicialmente estipulados para a selecção de uma área de estudo para o projecto EROSFIRE. O período de estudo correspondente ao primeiro ano hidrológico a seguir ao incêndio ocorrido na área, nomeadamente desde Setembro 2005 a Setembro 2006. O facto da copa se apresentar totalmente queimada (Tabela 1) considera-se como indicador de uma severidade alta de incêndio (Prats, 2007).

Tabela 1 – Indicadores da intensidade do incêndio

Indicadores da severidade do incêndio	Cor cinzas	Preta
	Copa queimada	Total
	Altura dos troncos queimados	8
	Superfície do Solo queimada	Parcial
	Data /Severidade do incêndio	Julho 2005

3.2. Clima

O clima, pela acção que exerce no regime de humidade e temperatura do solo, bem como na recuperação da vegetação após um incêndio, é um factor de elevada importância ao nível dos fenómenos de erosão. A sua importância assenta também no facto de ser a precipitação o responsável directo da erosão hídrica.

A área de estudo localiza-se numa região de clima temperado atlântico, com influências mediterrânicas, com Verões quentes e secos (Julho e Agosto) e Invernos moderados. A precipitação anual situa-se entre os 1200 a 1400mm (Atlas do Ambiente, 2009). A média anual da temperatura do ar varia entre os 12.5 e os 15°C (valores de 1931-1960), segundo Atlas do Ambiente, 2009.

3.3. Geologia e solos

A descrição do perfil do solo indica que o solo é do tipo Cambissolo húmico, derivado de xisto. Os Cambissolos caracterizam-se, em geral, como solos jovens, moderadamente desenvolvidos sobre uma rocha parental pouco a moderadamente meteorizada, não apresentando quantidades apreciáveis de argila, matéria orgânica e componentes de alumínio ou ferro (Vieira, 2008 em FAO, 2006).

3.4. Coberto vegetal e uso do solo

A área de estudo é composta por plantações de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), destinadas à comercialização da respectiva madeira, dado ser uma espécie bastante produtiva. Os povoamentos de *Eucalyptus globulus* sofreram uma mobilização do solo em vale e cômodo (lavrado seguindo as curvas de nível) antes da instalação do povoamento, cerca de 5 anos antes do incêndio. A Tabela 2 mostra algumas características do povoamento florestal no local de estudo.

Tabela 2 – Características gerais do povoamento florestal.

Características do povoamento florestal	Uso do solo	Eucaliptal
	Práticas de conservação do solo	Lavrado seguindo as curvas de nível
	DBH (cm) (n=10/secção)	14
	Idade das árvores (anos)	5

4. Material e Métodos

4.1. Simulações de Chuva

Durante o período de Setembro – 2005 a Outubro de 2006, foram realizadas, na área de estudo, várias campanhas de simulações de chuva, utilizando um simulador portátil segundo CERDÁ *et al.*, (1997), (Figura 3). O simulador (figura ao lado) inclui os seguintes componentes:

- 1 Aspersor;
- 4 Pernas telescópicas;
- 1 Bomba de 12V com um balão de ar que puxa a água a uma pressão constante pré-calibrada no laboratório.
- 1 Bateria;
- 2 Tanques de água (para encher durante as simulações).
- Tenda ao redor do simulador permite limitar a influência do vento na distribuição da chuva dentro da parcela.



Figura 3 – Simulador de Chuva

O procedimento é efectuado com base no definido pelo projecto europeu MEDAFOR (ENV4-CT98-0686):

- Parcelas quadradas de 0.28 m²;
- Duração de 60 minutos;
- Recolha de cinco amostras de escoamento para posterior análise em laboratório.

As simulações são efectuadas a duas intensidades diferentes, representativas de condições extremas e, portanto, com elevado poder erosivo:

- Intensidade de 45 mm/h: registo máximo horário na estação do Caramulo (Brandão et al., 2001, segundo refere Prats., 2007);
- Intensidade de 85 mm/h: máximo histórico em Portugal.

O simulador é colocado para produzir chuva a partir de uma altura de 2 m e o nozzle é centrado sobre a parcela para produzir um cone (de aproximadamente 1 m²) de chuva sobre o solo.

A experiência tem início quando a pressão é igual à requerida. A escorrência produzida é medida minuto a minuto, e as amostras de escorrência vão sendo recolhidas. No local de estudo foram efectuadas 18 simulações de chuva, sendo que as duas primeiras (Setembro 2005) se realizaram em parcelas móveis removidas após as experiências e amostragem, enquanto as outras 16 foram realizadas em 4 parcelas fixas (Figura 4). Em cada parcela fixa foram realizadas 4 simulações de chuva, distribuídas ao longo do ano: Novembro-05, Fevereiro, Abril, Julho e Outubro de 2006.

4.1.1. Desenho experimental

Em cada secção da encosta (topo ou base), efectuam-se duas simulações simultâneas, uma de alta e outra de extrema intensidade, em cada um dos períodos. A parcela controlo foi colocada no meio de cada par de parcelas de simulação e serviu para monitorizar as condições iniciais do solo mediante amostragem destrutiva. A Figura 4 representa o esquema das parcelas de simulação na encosta de Jafafe e respectivos declives, bem como as simulações efectuadas em cada parcela. Em cada experiência é efectuada a recolha de amostras de solo (amostragem) a várias profundidades: 0-5, 5-10 e 10-20 cm, bem como de cinzas e litter. A amostragem é efectuada antes e depois da simulação, da seguinte forma:

- Antes da simulação: a amostragem é efectuada na parcela controlo entre as parcelas fixas e móveis;
- Após a simulação: amostragem efectuada nas próprias parcelas (apenas móveis) e/ou na parcela controlo.

Desta forma não se procede à amostragem nas próprias parcelas fixas, ficando intactas para experiências futuras.

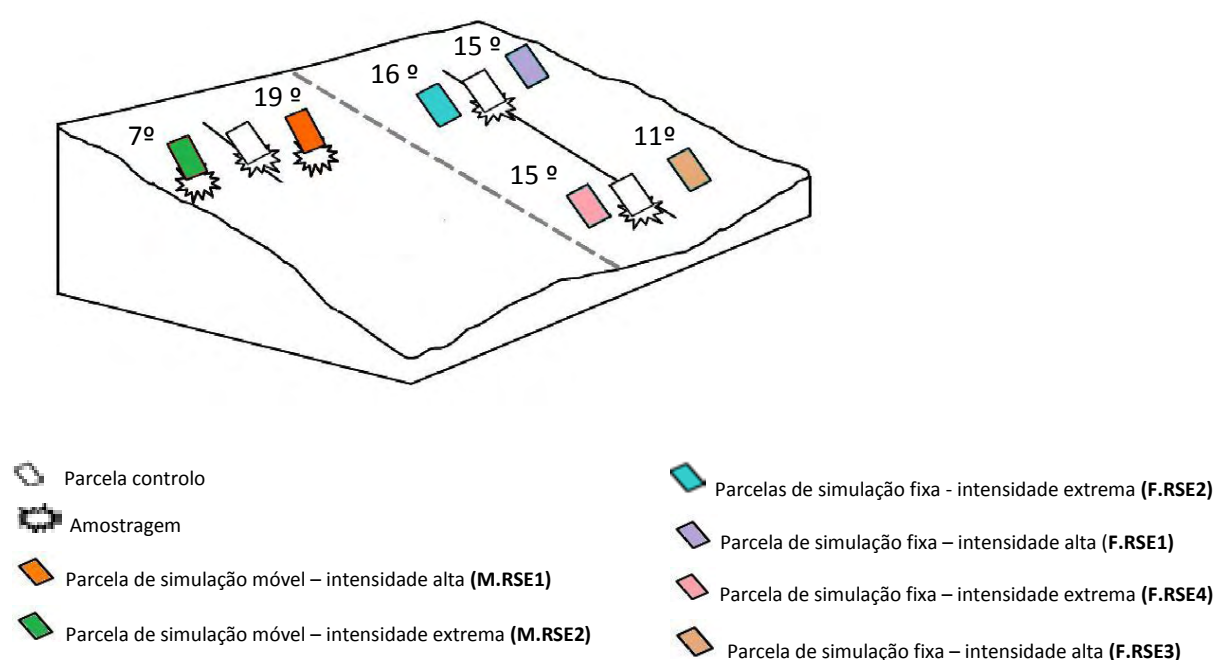


Figura 4- Desenho esquemático das parcelas de simulação, ao longo da encosta em estudo (adaptado de Prats., 2007).

4.1.2. Medição e Monitorização das características do solo

A - Humidade

Nas parcelas de simulação, a humidade é monitorizada ao longo de toda a experiência, minuto a minuto, através de sondas inseridas no solo durante toda a experiência: Theta Probe ML2 (base da parcela) e Trime (base e topo da parcela). Em

cinco pontos da parcela foi, então, medida a humidade com uma sonda ou por análise em laboratório das amostras de solo recolhidas.

B - Repelência do solo à água

Existem inúmeras metodologias para estimar a repelência do solo à água. As mais utilizadas são: *Water Drop Penetration Time* (WDPT) que mede a persistência da repelência e *Molarity of an Ethanol Droplet* (MED) que mede o grau de repelência. Esta é medida no início da experiência nas parcelas de controlo e apenas nas parcelas móveis foi também realizada medição no final. A medição é efectuada a diferentes profundidades (superfície, 0-5cm, 5-10 cm e 10-20 cm), segundo o método do Molarity of an Ethanol Droplet (MED). Esta técnica envolve a aplicação no solo de 3 gotas de etanol a concentrações crescentes (Tabela 3) até ocorrer a infiltração instantânea (< 5 segundos) de 2 ou 3 gotas com a mesma concentração (Keizer et al., 2005). Este procedimento é efectuado em 5 pontos ao longo da parcela e permite estabelecer uma escala de 8 classes de hidrofobia (quanto à concentração de etanol).

Tabela 3-Classes de repelência segundo o teste (MED) do etanol; Classes segundo Doerr (1998)

Concentração de etanol (%)	Classe de etanol	Estado de repelência
0	0	Hidrófilo
1	1	Hidrofobia ligeira
3	2	
5	3	
8.5	4	Hidrofobia forte
13	5	
18	6	Hidrofobia severa
24	7	
≥ 36	8	Hidrofobia extrema

Adaptado de Malvar., 2007

C - Rugosidade

O micro-relevo ou rugosidade das parcelas é determinado através de uma ferramenta de 26 varas equidistantes que pousam na superfície do solo (Figura 5). Tira-se uma fotografia e é determinado o desvio padrão da altitude das varas como medida da rugosidade, com o auxílio do programa PMPproj, versão de Juha Kilpelainen, Agricultural Research Centre of Finland - MMT.



Figura 5- Medidor de rugosidade

Importa referir que as parcelas fixas de simulação não foram monitorizadas para o 2º período (Novembro de 2005) no que diz respeito à repelência e resistência do solo. Foram assumidos os dados obtidos de transectos, nomeadamente na data mais próxima da data da simulação.

4.2. Micro-parcelas sob chuva natural

Na encosta de Jafafe foram instaladas, em Setembro de 2005 quatro micro-parcelas sob chuva natural, duas no topo e duas na base, com a mesma dimensão das parcelas de simulações. A Figura 6 representa o esquema das micro-parcelas sob chuva natural na encosta de Jafafe e respectivos declives

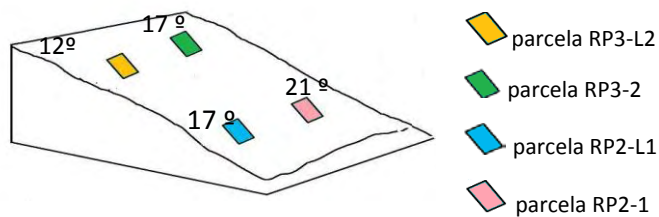


Figura 6- Desenho esquemático das micro-parcelas sob chuva natural, ao longo da encosta em estudo (adaptado de Prats., 2007).

Cada parcela possui uma saída ligada a uma mangueira que encaminha a escorrência para 2 tanques de recolha que armazenam a escorrência, que é medida semanalmente, no caso de ocorrência de precipitação, e amostrada para análise posterior em laboratório (Figura 7).



Figura 7 – Micro-parcelas sob chuva natural. Equipamento de recolha da escorrência.

A medição da precipitação foi efectuada recorrendo a um pluviómetro totalizador e um automático instalado na área.

O coeficiente de escorrência (%) é calculado como o rácio produção de escorrência/quantidade de precipitação. É multiplicado pela razão entre a área da parcela (0.28 m²) e a denominada área horizontal projectada (AHP), de modo a corrigir o coeficiente de escorrência com o declive, para possibilitar a comparação entre parcelas. A fórmula de cálculo é a seguinte:

$$C.E. (\%) = \frac{Rt}{P} \times \frac{1}{\cos(\theta)} \times 100 = \frac{Rt}{P} \times \frac{0.28}{AHP}$$

(Eq. 4.1.)

Onde,

C.E. = Coeficiente de escorrência [%]

Rt = Escorrência total em dado período (mm)

P = Quantidade total de precipitação durante o mesmo período (mm)

AHP = Área Horizontal projectada (m²)

4.3. Transectos

A monitorização da humidade, repelência e resistência do solo à torção foi efectuada quinzenalmente pela equipa do projecto EROSFIRE, em 3 ou 5 pontos equidistantes ao longo de transectos colocados ao lado das micro-parcelas sob chuva natural (Malvar., 2007).

Os métodos são:

- Humidade: medida em 3 pontos da parcela com a sonda Theta Probe HH3, em unidades de volume (profundidades de medição: 0-5, 5-10 e 10-20 cm);
- Repelência: a medição é efectuada pelo método MED em 3 pontos da parcela (profundidades de medição: superfície do solo, 0-5, 5-10 e 10-20 cm);
- Resistência do solo à torção: medida com o torvane para medir a resistência do solo à desagregação (Kg/cm²) (profundidades de medição: superfície do solo).

4.4. Análises laboratoriais

4.4.1. Amostras de solo

A – Humidade

O conteúdo de humidade do solo é determinado através da pesagem da amostra antes e depois de retirada da estufa após 24 h, a 105 °C e de a arrefecer durante 2 horas no exsiccador, de modo a evitar oscilações na pesagem devido ao calor. Calcula-se assim:

$$H = \frac{(Ph - Ps)}{Ps} \quad \text{(Eq. 4.2.)}$$

Onde,

H = Conteúdo de humidade do solo [% gravimétrica]

Ph_1 = Peso amostra húmida [g]

Ps = Peso amostra seca (depois da estufa) [g]

B - Textura do solo

A textura é uma característica importante que afecta as propriedades do solo. A metodologia é iniciada com a crivagem dos elementos grosseiros (superior a 2 mm).

A argila e o limo são determinados por pipetagem numa coluna de sedimentação, em que a profundidade e tempo de sedimentação estão tabelados em função da temperatura. Por seu lado, a areia fina determina-se por métodos alternados de sedimentação e decantação da suspensão do solo (tempos de espera tabelados), de forma a restar apenas a areia fina na coluna de sedimentação. Estes procedimentos foram efectuados no laboratório da Escola Superior Agrária de Coimbra (ESAC). Dada a estabilidade desta característica, não é necessária a sua repetição no tempo.

Para esta determinação, é necessário recorrer a escalas de classificação quanto ao diâmetro das partículas. As mais comuns são a Escala Atterberg adoptada pela International Society of Soil Science (ISSS), e a do United States Department of Agriculture (USDA); ver Tabela 4.

Tabela 4- Diâmetro das frações granulométricas mais importantes, segundo as escalas de classificação de Atterberg e USDA.

	Diâmetro das partículas (mm)	
	Atterberg	USDA
Argila	<0.002	<0.002
Limo	0.002-0.02	0.002-0.05
Areia fina	0.02-0,2	0.05-0.5
Areia grossa	0.2-2	0.5-2

4.4.2. Concentração de sedimentos e conteúdo em matéria orgânica

A determinação da concentração de sedimentos e matéria orgânica na escorrência de cada parcela é determinada em laboratório. O primeiro passo consiste em colocar a amostra de escorrência em banho de areia até evaporar toda a água; a amostra, ainda húmida, é colocada a secar na estufa (a 105 °C durante 24 h), sendo de seguida pesada. Após este procedimento a amostra é colocada na mufla para destruição da matéria orgânica por incineração a 550 °C, durante tempo suficiente para queimar toda a fracção orgânica. Após arrefecer em exsiccador, a amostra é pesada e o conteúdo em matéria orgânica é determinado da seguinte forma:

$$\%M.O. = \left(\frac{P_s - P_I}{P_s} \right) \times 100 \quad \text{(Eq. 4.3.)}$$

Onde,

$\% M.O. = \text{teor do solo em matéria orgânica} [\%]$

$Ps = \text{Peso amostraseca (depois da estufa)} [g]$

$PI = \text{Peso amostra incinerada (depois da mufla)} [g]$

A concentração total de sedimentos existente na amostra é determinada dividindo o peso obtido após a estufa pelo volume inicial de amostra. Assim,

$$C_s = \frac{P_s}{V} \quad (\text{E. 4.4.})$$

Onde,

$C_s = \text{Concentração de sedimentos na amostra} [g/l.]$

$P_s = \text{Peso amostra solo seco (depois da estufa)} [g.]$

$V = \text{Volume da amostra (runnoff)} [l.]$

Partindo da concentração de sedimentos nas amostras de escorrência (g/L), determina-se a quantidade total de sedimentos (g) na parcela. Deste modo,

$$Q_{sp} = \frac{C_s \times Rt}{Area} \quad (\text{Eq. 4.5.})$$

Onde,

$Q_{sp} = \text{Perdas de sedimentos totais na parcela} [g/m^2.]$

$C_s : \text{definida na Eq.4.4}$

$Rt = \text{Escorrência total na parcela} [l.]$

$A = \text{Área da parcela} [m^2]$

A quantificação da erosão através do procedimento laboratorial descrito pode envolver erros, principalmente se o volume de amostra de escorrência for demasiado pequeno. Nesse caso, devido ao elevado erro que estaria inerente na análise de amostras muito pequenas, o que resultaria numa sobre-estimativa da perda de sedimentos, estas não foram alvo de análise de laboratório. No que diz respeito especificamente às micro-

parcelas, caso o volume no tanque de recolha seja demasiado baixo, como seja pouco mais que uma gota no fundo, a quantidade de escorrência é considerada desprezável.

4.5. Análise de dados

4.5.1. Dados de precipitação

Os dados de precipitação têm origem na anterior recolha e/ou registo em pluviómetros específicos instalados na área, quer totalizadores quer automáticos. Dada a inexistência de dados concretos nos udómetros totalizadores em certas datas, estes são substituídos pelos dados do automático do mesmo local. Caso estes também apresentem falhas, são substituídos pelos dados de locais adjacentes.



4.6. Modelo MEFIDIS

4.6.1. Parâmetros de entrada – Parametrização

Os parâmetros de entrada no modelo (Tabela 5) são obtidos através de medições no campo ou no laboratório ou derivam de Funções de Pedotransferência (PTF's) definidas na bibliografia para as classes USDA de textura (obtida por amostragem a três profundidades). Estas apresentam-se na Tabela 5, onde consta também a metodologia de cálculo de todos os parâmetros de entrada.

Uma vez que os valores medidos não são constantes no espaço, é necessário seleccionar a profundidade de medição a considerar. Assim, toma-se em conta que a camada superior do solo (entre 0 a 5 cm) é determinante ao nível dos processos hidrológicos e de erosão, em que influem os parâmetros Coef. de rugosidade_ks, diâmetro_diam. (mm) e fracção de argila_clay (%). Por seu lado, para os parâmetros pressão capilar_psi (cm), taxa de infiltração_ksat (cm/h) e porosidade efectiva_o.e. (%), devido à alta variabilidade que lhes está associada, foi considerada a mediana entre duas profundidades (0 a 5 cm e 5 a 10 cm).

Tabela 5- Parâmetros de entrada no modelo, definição, metodologia de cálculo ou PTF's de conversão

<p>➤ Parâmetros de simulação:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Tempo total, 't (min.)': Duração do tempo de simulação do modelo ○ Tempo (intervalo), 'dt (seg.)': Intervalo para a corrida da formulação do modelo <p>➤ Parâmetros relativos à parcela:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Largura, 'wid (m)' → $wid = raizq(A)$, A = área da parcela (m²) ○ Declive, 'slope (m/m)' → $slope (m/m) = \tan(\theta)$, θ = declive (º) <p>➤ Parâmetros de precipitação:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Intensidade, 'int. (mm/h)' ^(a) ○ Duração, 'td (min.)' ^(a) <p>➤ Parâmetros de uso do solo</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Coeficiente de rugosidade, 'k_s' → $k_s = 1/n^2$ Manning, n^o Manning - varia entre 0 e 1. ○ Fracção de coberto vegetal, 'veg. (%)' ^(a) ○ Fracção de coberto por pedras, 'paved (%)' ^(a) ○ Capacidade de armazenamento superficial, 's. ret. (mm)' – deriva da rugosidade e declive, segundo Kamphorst et al. (2000) ○ Intercepção da precipitação pelo coberto vegetal, 'Intercep. (mm)' → deriva do Índice de Área Foliar (LAI). Pode ser determinada segundo Hoyningen-Huene (1983). Assume-se como zero dado que as parcelas na área de estudo não apresentam vegetação. <p>➤ Parâmetros de características do solo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Porosidade efectiva, 'o.e. (%)': porosidade total, quando todos os poros estão preenchidos com água (humidade de saturação) – thetas para USDA (PTF segundo Saxton et al., 1986), deriva da argila e areia (%); mediana entre 0-5 cm e 5-10 cm de profundidade. ○ Pressão capilar, 'psi (cm)' – potencial de frente húmido da água no solo para classes USDA (PTF segundo Rawls et al., 1983); mediana entre 0-5 cm e 5-10 cm de profundidade. ○ Taxa de infiltração, 'K_{sat} (cm/h)': Capacidade do solo para conduzir o fluxo de água; em condições de saturação é constante – condutividade hidráulica saturada para classes USDA (PTF segundo Saxton et al., 1986); mediana entre 0-5 cm e 5-10 cm de profundidade. ○ Diâmetro das partículas de solo, 'diam.(mm)': Diâmetro que contem 50% das partículas – d50 para classes USDA (PTF segundo Skaggs et al., 2001) ○ Força crítica de desagregação, 'CHS (kPa)': Força capaz de desagregar as partículas do solo – $\text{toc (kPa)} = 0.1 \times \text{valor torvane} \times 98$; 'critical shear stress' ○ Fracção de argila, 'clay (%)' – obtida a partir das classes USDA (PTF segundo Skaggs et al., 2001); mediana (0-5 cm) ○ Humidade inicial do solo, 'moist (% vol.)' – mediana à profundidade (0-5 cm) ^(a) <p>(a) Entrada directa do valor medido</p>
--

A parametrização tem por base as medições de campo ou laboratório que, por sua vez são transformadas através de PTF's para alguns parâmetros, que contam na Tabela 5 em cima. O modelo necessita de um ajuste dos parâmetros de entrada para fornecer bons resultados. Importa referir que os valores de k_{sat} calibrados são significativamente menores que os valores médios medidos, devendo-se provavelmente ao facto do MEFIDIS usar o método de Green-Ampt para calcular as taxas de infiltração (Nunes et al., 2005).

No que diz respeito à capacidade de armazenamento superficial, esta foi determinada segundo Kamphorst et al. (2000), em função do declive da rugosidade medida ('random roughness'). A rugosidade foi medida em todas as parcelas, mas não em todos os períodos. Para as falhas, foi assumido o valor medido na mesma parcela, na data mais próxima.

4.6.2. Sensibilidade do modelo

A determinação da sensibilidade dos modelos à alteração dos parâmetros de entrada é um procedimento importante e que tem sido feito no âmbito da modelação da erosão com vários modelos (ex: Nearing et al (1990) para a WEPP e Prats (2007) com o próprio MEFIDIS). A metodologia seguida neste estudo foi a utilizada por estes dois autores. Deste modo, Esta, tem limitações devido à ausência de interacção entre variáveis, no entanto, neste caso, a representação das condições extremas é suficiente. A sensibilidade é calculada da seguinte forma (Eq. (4.6)):

$$S = \frac{(x_2 - x_1)/x_{12}}{(I_2 - I_1)/I_{12}} \quad \text{(Eq. 4.6.)}$$

Onde: S = Medida da sensibilidade
 I_1 e I_2 : valor inferior e superior do parâmetro de entrada, respectivamente
 I_{12} : Média de I_1 e I_2
 x_1 e x_2 : Resultado da aplicação do modelo com I_1 e I_2 , respectivamente
 x_{12} : Média de x_1 e x_2

A sensibilidade do MEFIDIS aos seus parâmetros é, assim, testada parâmetro a parâmetro, considerando os casos extremos (valores mínimos e máximos de cada parâmetro).

4.6.3. Estratégia de calibração

A calibração do modelo, através do ajuste dos parâmetros de entrada, é um procedimento a tomar para que o modelo tenha bons resultados.

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (recomendado pela ASECE-American Society of Civil Engineering para estudos hidrológicos; Malvar (2007)) é usado como indicador do desempenho do modelo juntamente com o coeficiente de correlação linear (r). O índice de eficiência mede a diferença entre os resultados simulados e observados. Pode variar entre 1 e $-\infty$, mas apenas acima de 0.5 é considerado satisfatório (Morgan e Quinton, 2001) . Se:

- Índice Nash-Sutcliffe=1 → perfeita relação entre resultados observados e modelação;
- Índice Nash-Sutcliffe> 0 → sugere alguma utilidade do modelo;
- Índice Nash-Sutcliffe< 0 → o modelo fornece informação inferior à média do modelo.

A fórmula de cálculo deste índice é a seguinte:

$$\text{Coef. } N - S = 1 - \frac{\sum_n (x_m - x_r)^2}{n-1} / \frac{\sum_n (x_r - \bar{x})^2}{n-1} = 1 - \frac{\text{var} (x_m - x_r)}{\text{var} (x_r)} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Onde:

x_m : resultado do modelo

x_r : resultado real

\bar{x} : média dos valores observados

var : significa variância



Quanto ao coeficiente de correlação (r^2), são considerados aceitáveis valores superiores a 0.36 (Motovilov et al., 1999), sendo que baixos coeficientes de correlação podem ser atribuídos a alta dispersão dos resultados do modelo para a escorrência e erosão.

O erro relativo (BIAS) mede a tendência para os resultados do modelo serem superiores ou inferiores aos observados (Beldring et al., 2003). Foi calculado de acordo com a seguinte equação, encontrada em Beldring et al. (2003); Eq. 4.8.

$$BIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (x_m - x_r)}{\sum_{t=1}^n x_r} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Onde:

x_m e x_r : definidos na Eq. 4.7

5. Resultados e discussão

5.1. Simulações de chuva

5.1.1. Resposta hidrológica

No total, caíram, ao longo do ano, sobre todas o total de parcelas de simulação em estudo 1176 mm de chuva simulada. Esta levou a coeficientes médios globais de escorrência de 38 %, correspondente a aproximadamente 54 % para as simulações de alta intensidade e 21 % para as de extrema intensidade (Figura 8). Há que ter em atenção o facto das parcelas móveis M.RSE₁ e M.RSE₂ corresponderem a apenas um período de estudo (Setembro-2005), enquanto as restantes parcelas são respeitantes aos restantes quatro períodos.

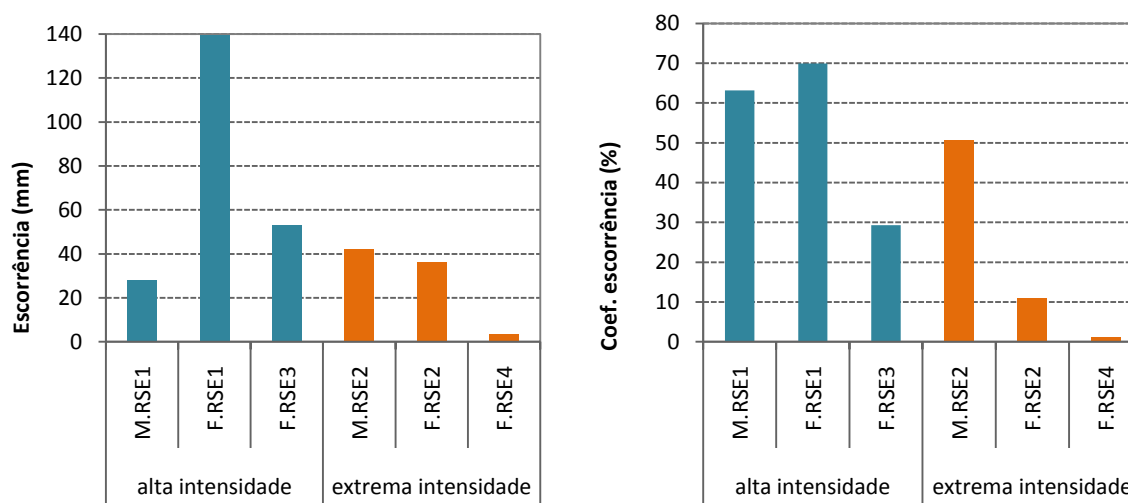


Figura 8 – Escorrência (mm; %) determinada nas parcelas de simulação segundo a intensidade da precipitação.

As simulações de extrema intensidade apresentam, por diversas razões, uma resposta hidrológica global inferior às simulações de menor intensidade, em particular a parcela fixa F.RSE₄. Por outro lado, destaca-se a parcela fixa de alta intensidade (F.RSE₁)



por apresentar as maiores produções de escorrência. Sendo assim, a intensidade da precipitação não parece influenciar a produção de escorrência nas várias parcelas.

Há que ter em conta que as parcelas apresentam características diferentes, como sejam o declive, micro-relevo, repelência do solo, coberto, entre outras e, conseqüentemente têm diferentes respostas hidrológicas. No entanto, a inclinação das parcelas não parece influenciar em termos de escorrência produzida, já que a F.RSE₂ é a parcela fixa com maior declive e, no entanto, mostra uma produção bastante baixa e inferior a parcelas com declive inferior, como a F.RSE₃. Por outro lado, algumas características (humidade, repelência, coberto) podem variar bastante ao longo do tempo e determinam a distinta resposta hidrológica entre as parcelas e dentro da mesma parcela, em diferentes períodos (Figura 9).

A Figura 9 mostra a evolução temporal da taxa de escorrência a par com a variação da repelência, à superfície do solo. Em geral, acontece que a escorrência tende a diminuir com o decorrer do tempo após o incêndio e à medida que o solo se torna menos repelente pela ocorrência de precipitação no local.

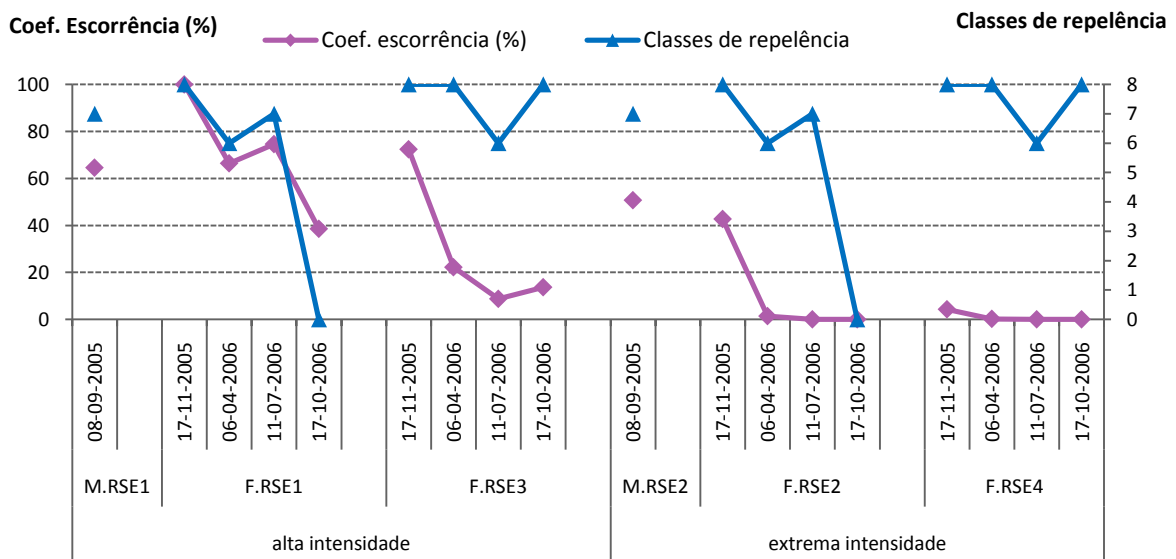


Figura 9 – Variação temporal da taxa de escorrência (%) e da repelência MED (superfície) em cada secção parcela.

De acordo com a figura acima, nota-se uma elevada distinção nas respostas das parcelas de simulação face à repelência medida à superfície do solo, o que revela a elevada variabilidade inerente aos processos hidrológicos. Seria de esperar que a escorrência aumentasse sempre que o solo se torne mais hidrofóbico. Isto nem sempre ocorreu, provavelmente devido à existência de canais de infiltração, para os quais a água se encaminhou e infiltrou em profundidade.

Embora a metodologia de simulações de chuva permita obter dados sobre um conjunto significativo de factores condicionantes dos processos hidrológicos, existe uma elevada variabilidade inerente a estes processos, dado o difícil controlo de todas as variáveis que os condicionam e que interagem conjuntamente.

O tempo que a escorrência demora a iniciar desde o início da simulação e o tempo para a mesma terminar após os 60 minutos de chuva simulada, dão uma ideia do que se passa ao longo de cada simulação. Em geral, a escorrência e o tempo para iniciar a escorrência variam de modo inverso (Figura 10). No entanto, a parcela F.RSE₄ regista um tempo início de escorrência mais rápido que nas restantes simulações (53 e 56 seg.), apresentando, contudo as menores taxas de escorrência (máximo de 7.8 % durante toda a simulação). Desprezando a parcela RSE₄² (representada pelos 2 pontos marcados na figura abaixo), o coeficiente de correlação entre o coeficiente de escorrência (%) e o tempo de início da mesma aumentaria, em módulo, de 0.21 para 0.60 (em ambos relação inversamente proporcional). Por outro lado, a escorrência é tanto maior quanto mais tempo durar desde o fim da chuva (Figura 11), com um boa relação entre ambos (Correlação de 0.81). Neste aspecto, o tempo até acabar a escorrência, na simulação de Abril parcela RSE₄ está de acordo com as baixas taxas de escorrência, dado acabar no momento em que termina a chuva, após 1 hora do início da simulação³, o tempo de finalização global menor entre as parcelas. O facto de menores tempos de finalização

² Não se despreza esta parcela efectivamente, apenas se menciona para mostrar o quanto esta parcela tem comportamento diferente face às restantes.

³ Nota: faz-se cair chuva durante 1 hora, após este período pode continuar a escorrência.

levarem a taxas de escorrência inferiores aponta para a ideia de que ao longo da simulação acontece um aumento na capacidade de retenção do solo, principalmente quando tempos de início rápidos estão associados a menores tempos de finalização.

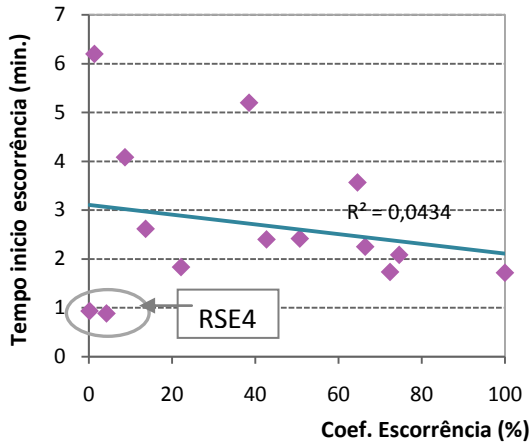


Figura 10 - Correlação entre o coeficiente de escorrência (%) e o tempo para esta iniciar (minutos)

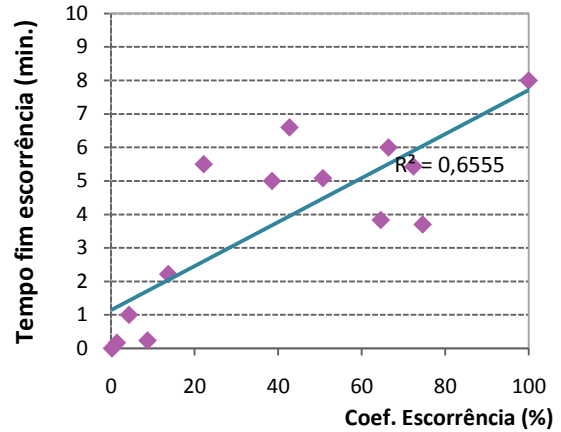


Figura 11 - Correlação entre o coeficiente de escorrência (%) e o tempo para esta terminar (minutos)

Com o intuito de averiguar a evolução na escorrência ao longo das simulações, relacionando-a com distintos tipos de respostas hidrológicas, apresentam-se os quatro tipos de hidrogramas característicos das simulações de chuva em estudo (Figura 12 a Figura 15).

Hidrograma forma a

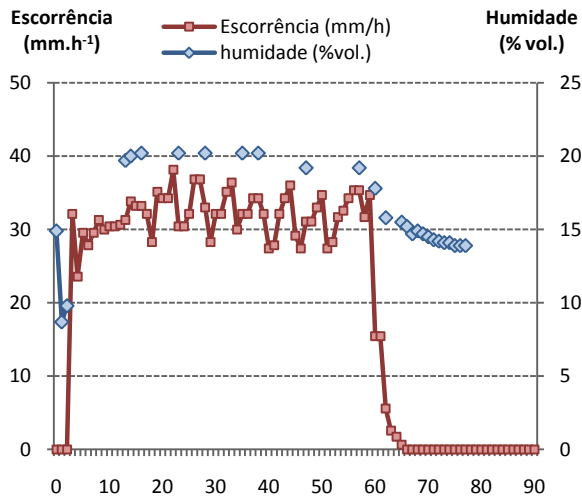


Figura 12 - Hidrograma referente ao período de Abril na parcela fixa F.RSE1

Hidrograma forma b

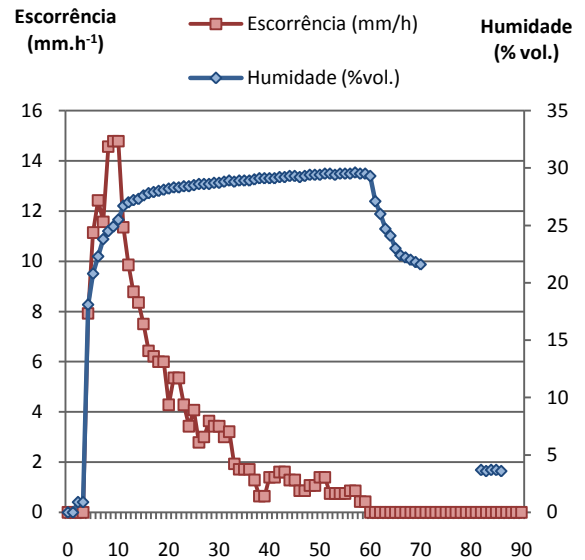


Figura 13 - Hidrograma referente ao período de de Julho para a parcela fixa, F.RSE3.

Hidrograma forma c

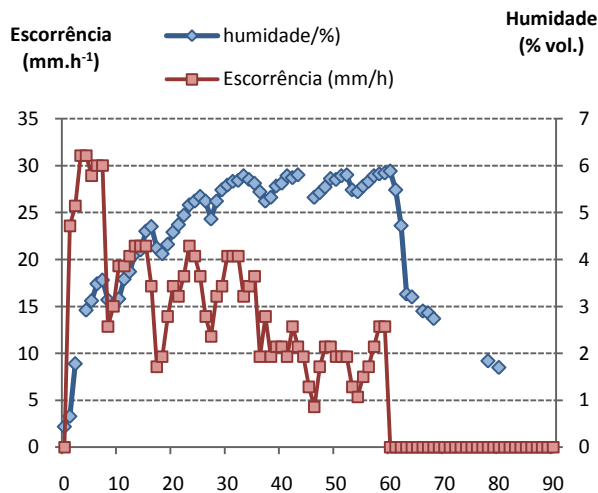


Figura 14- Hidrograma referente ao período de Novembro para a parcela fixa, F.RSE₄

Hidrograma forma d

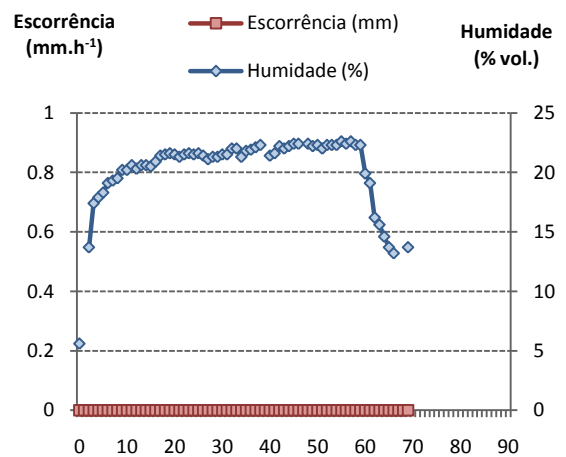


Figura 15- Hidrograma referente ao período de Outubro para a parcela fixa, F.RSE₄



- Hidrograma forma **a**: curva de escorrência com patamar estável.
- Hidrograma forma **b**: Curva de escorrência com descida acentuada após atingir o máximo perto do início da simulação.
- Hidrograma forma **c**: Curva de escorrência com tendência a descida (menos acentuada que a forma **b**)
- Hidrograma forma **d**: Não houve produção de escorrência.

A Tabela 6 mostra a frequência de cada uma das formas de hidrograma em termos globais e consoante a intensidade da precipitação, globalmente e para cada período de simulações. Em geral, o hidrograma **a** ocorre em maior proporção, com uma frequência de ocorrência de aproximadamente 61 %, correspondente a 11 simulações face ao total de 18 em estudo. Com o segundo maior registo de ocorrência está a forma do hidrograma **d**, ou seja, a ausência de resposta hidrológica é observada em mais de 22% das simulações de chuva. Importa referir que a forma do hidrograma **a** está mais frequentemente associada a maiores produções de escorrência, registando-se uma diminuição na frequência deste comportamento ao longo dos vários períodos de simulação (Entre Setembro a Julho), entre os quais a resposta hidrológica tende igualmente a diminuir. O hidrograma **d** ocorre apenas em uma ocasião (período de Novembro na parcela F.RSE₄). Na mesma data, a simulação de extrema intensidade efectuada na parcela fixa do topo da encosta (F.RSE₂) apresenta uma evolução na sua resposta hidrológica ao longo da simulação equivalente à do hidrograma **a**, com uma produção superior de escorrência.

O comportamento característico exemplificado nos hidrogramas **b** e **c** é referido como devido a uma 'quebra' progressiva da repelência do solo à água, ao longo da simulação (Pierson et al., 2001). Esta forma de evolução da escorrência ao longo das simulações em estudo é registada pela primeira vez no mês de Novembro na parcela F.RSE₄, registando-se novamente em Abril, nesta mesma parcela e em Julho na F.RSE₃. A intensa precipitação natural ocorrida nos meses de Outubro – 2005 e Março - 2006 (Figura 16) pode ter alterado o regime de humidade do solo e diminuído a intensidade da

repelência e, no entanto só mais tarde esta última ter sido destruída, com um consequente aumento na capacidade de infiltração.

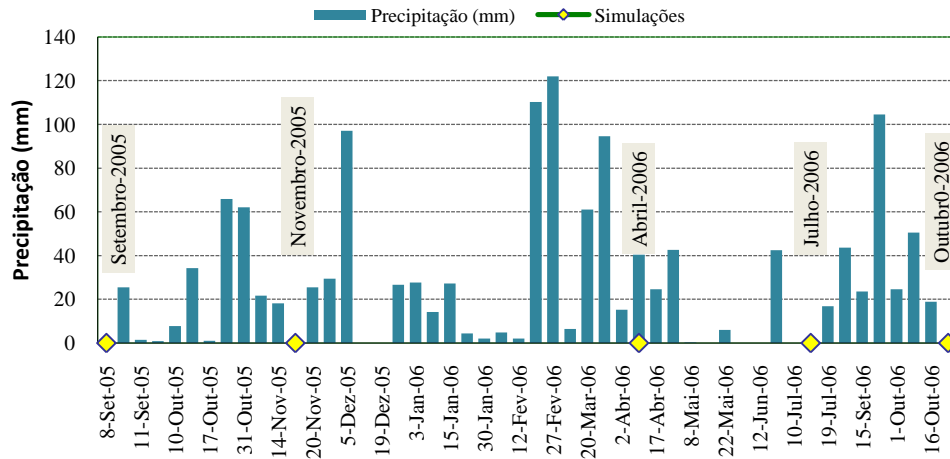


Figura 16 – Representação das condições pluviométricas (precipitação semanal) nas datas de realização das simulações de chuva, em Jafafe.

Tabela 6 – Frequência de registo de cada uma das formas de hidrograma observadas nas simulações de chuva em estudo, segundo a intensidade da precipitação.

Período de estudo	Tipo parcela	Intensidade precipitação	Frequência de registo (%)			
			Hidrograma forma a	Hidrograma forma b	Hidrograma forma c	Hidrograma forma d
Global	Global	Global	61.1 (11 de 18)	11.1	5.6	22.2 (4 de 18)
		Alta	77.8	50	0	0
		Extrema	22.2	50	100	100
1º (Setembro-2005)	Móvel	Global	100	0	0	0
		Alta	100 (1 de 1)	0	0	0
		Extrema	100 (1 de 1)	0	0	0
2º (Novembro-2005)	Fixa	Global	75	0	25	0
		Alta	100 (2 de 2)	0	0	0
		Extrema	50 (1 de 2)	0	50 (1 de 2)	0
3º (Abril-2006)	Fixa	Global	75	25	0	0
		Alta	100 (2 de 2)	0	0	0
		Extrema	50 (1 de 2)	50 (1 de 2)	0	0
4º Período (Julho 2006)	Fixa	Global	25	25	0	50
		Alta	50 (1 de 2)	50 (1 de 2)	0	0
		Extrema	0	0	0	100
5º Período (Outubro- 2006)	Fixa	Global	50	0	0	50
		Alta	100 (2 de 2)	0	0	0
		Extrema	0	0	0	100

5.1.2. Erosão hídrica

As perdas por erosão resultante do escoamento hídrico diferem consideravelmente entre parcelas (Tabela 7). As perdas globais ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}$) são menores nas simulações de extrema intensidade para as parcelas fixas, com registos globais de pouco mais de $9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}$ quando comparadas com perto de $18 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}$ nas simulações menos intensas. No entanto, no 1º período (parcelas móveis) as simulações de maior intensidade levam a perdas duas vezes superiores. Nesta altura, ainda não havia ocorrido eventos naturais significativos.

De notar que os sedimentos perdidos apresentam elevada fracção de material orgânico (Tabela 7) quando comparada com a proporção existente no próprio solo (máximo de 14.4 % à profundidade entre 0 a 5 cm), o que é justificado pela mistura de cinzas nos sedimentos erodidos.

Tabela 7 – Taxas de perda de sedimentos registadas ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$) em Jafafe 1, nas simulações de alta e baixa intensidade e conforme a sua posição na encosta.

Intensidade Precipitação simulada	Perda média de sedimentos ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$) (n=3)	R S E	Posição no declive	Parcela	Perda de Sedimentos ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$)	Perda de sedimentos (mg/l)	Fracção Orgânica nos sedimentos (%)
Alta	17.8	1	Topo	Móvel	8.1	288	38.0
				Fixa	29.6	206	
		3	Base	Fixa	24.6	314	48.9
Extrema	9.03	2	Topo	Móvel	17.0	403	41.2
				Fixa	8.6	114	
		4	Base	Fixa	1.7	565	35.7

O comportamento evolutivo entre a resposta hidrológica (mm) e erosiva global ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) para cada simulação é bastante semelhante (Figura 17). A quantidade de escorrência produzida é um indicador de risco de erosão, dado que a quantidade total de

sedimentos transportados através da escorrência superficial está dependente da quantidade desta última. No que diz respeito à concentração de sedimentos (Figura 18), as simulações de extrema intensidade na parcela F.RSE₄ tendem a apresentar registos superiores (g/l), apresentando produções de escorrência bastante baixas associada a elevadas concentrações de sedimentos. O registo de maiores concentrações de sedimentos em simulações de intensidade extrema faz sentido, dado o maior impacto que precipitações mais intensas exercem no solo, desagregando-o mais facilmente. Assim, nem sempre uma elevada quantidade de escorrência está associada a elevadas concentrações de sedimentos (g/l), embora a resposta hidrológica tenha influência directa ao nível da perda total.

Também há que destacar as maiores concentrações de sedimentos perdidos nas simulações efectuadas na base da encosta (F.RSE₃ e F.RSE₄) por esta secção apresentar solo menos resistente que a secção de topo.

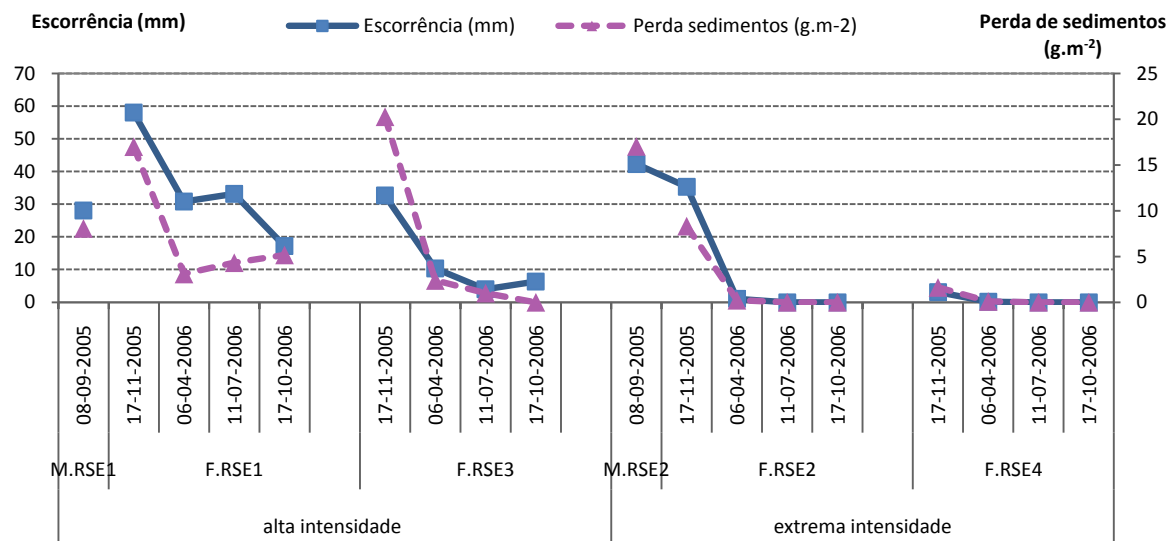


Figura 17 – Variação temporal da perda média de sedimentos (g.m⁻²) em função da escorrência (mm), em cada parcela.

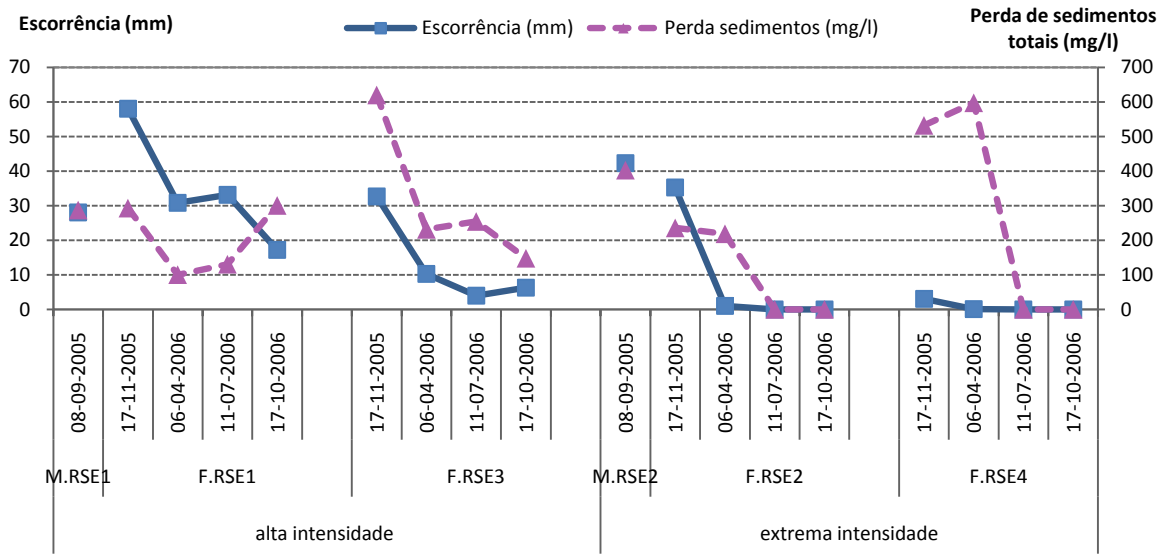


Figura 18 - Variação temporal da perda média de sedimentos (mg/l) em função da escorrência (mm), em cada parcela.

Assim, para que se compreenda o porquê da reduzida resposta nas simulações de maior intensidade é essencial perceber quais os factores que possam limitar a escorrência nessas parcelas. Para isso há que ter em atenção as características distintas das parcelas que possam influenciar a hidrologia. A distribuição espacial do coberto e propriedades do solo, de onde se destaca a repelência, é referida como um dos factores que mais influi na distribuição espacial da própria escorrência e erosão (Nunes et al., 2006). O coberto do solo (Figura 19) tem influência na resposta hidrológica e erosiva dado que este protege o solo do impacto da precipitação, limitando a escorrência e erosão. O coberto protector tende a aumentar ao longo do tempo e inclui a presença de folhas, vegetação, bem como de pedras. Protegem o solo através do efeito que exercem na intercepção da precipitação.

As cinzas, tanto podem ser associadas a um efeito de intercepção e protecção do solo nos primeiros meses após um incêndio, dada a sua capacidade de retenção da água, diminuindo a escorrência (Cerdá & Doerr, 2008), como à limitação da infiltração pela obstrução dos poros, reduzindo o arejamento e a capacidade de infiltração do solo (Varela, 2007). Verifica-se, como esperado, diminuição da percentagem de cinzas no solo (Figura 19). Algum aumento pontual pode ser justificado pelo arrastamento das cinzas

pele processo de erosão. Este arrastamento de cinzas juntamente com o provável espalhamento das partículas finas no solo desagregadas pelo impacto da chuva pode levar ao preenchimento dos poros existentes, limitando a infiltração.

Na Figura 20 mostram-se alguns exemplos de fotografias das parcelas de simulação em estudo, mostrando a variação temporal do coberto.

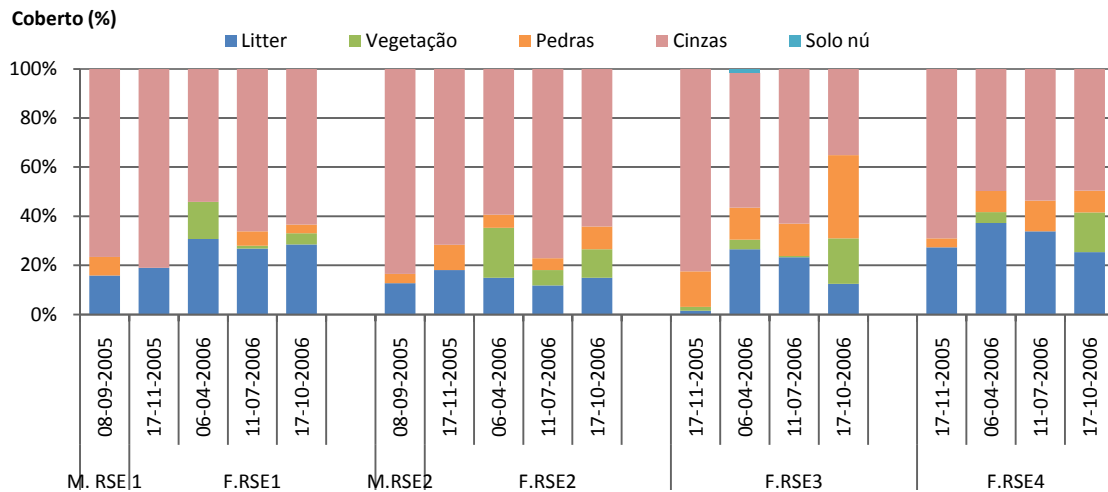


Figura 19 – Evolução do coberto do solo nas parcelas de simulação instaladas.



Figura 20- Variação temporal do coberto, no topo da encosta de Jafafe I (parcela M.RSE1 e F.RSE1), ordem temporal: Setembro-2005, Abril-2006 e Outubro-2006.

Considera-se o coberto protector total como o somatório do coberto de litter, pedras e vegetação. A Figura 21 e Figura 22 mostram que esta variável apresenta alguma relação com a resposta hidrológica e a perda de sedimentos nas simulações de chuva, onde a forma logarítmica representa a melhor analogia. Em geral, quanto maior a protecção do solo, menos escorrência é produzida e, consequentemente o risco de erosão diminui devido à protecção que o coberto confere ao solo. Apesar da correlação razoável do coberto com a produção de escorrência e sedimentos (Figura 21 e Figura 22), observa-se que algumas simulações de extrema intensidade se desviam um pouco da resposta esperada. Importa lembrar que será a interacção de todas as condicionantes dos processos hidrológicos e erosivos que determina a resposta hidrológica e de erosão. Quanto a factores isolados, apenas uns poderão ter mais influência que outros, dependendo do grau de diferença entre parcelas face a cada variável. A variabilidade associada a estes processos é incontornável e torna difícil a interpretação dos factores determinantes das respostas encontradas.

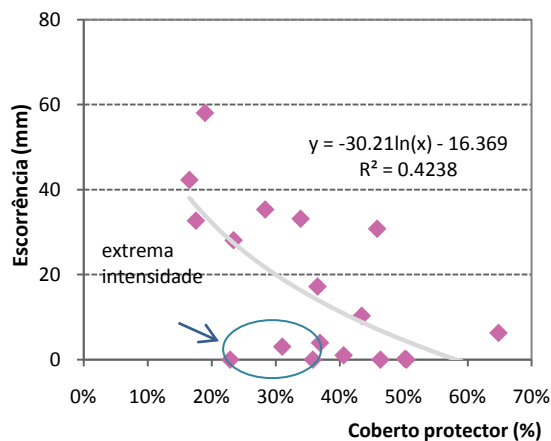


Figura 21 - Relação entre a escorrência produzida em cada simulação e o coberto protector total da parcela (%)

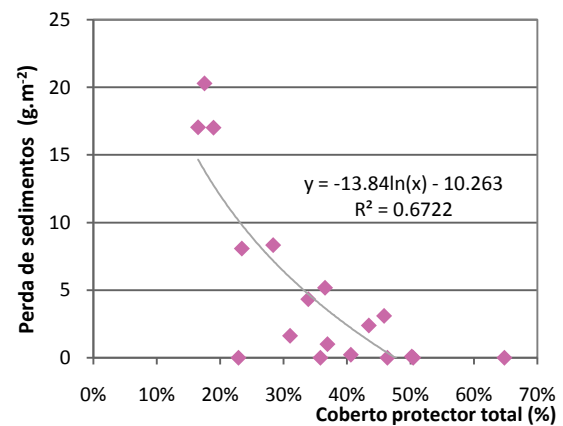


Figura 22 - Relação entre a perda de sedimentos (g.m⁻²) em cada simulação e o coberto protector total da parcela (%)

A fim de avaliar a resposta hidrológica e erosiva das parcelas de simulação na área de estudo, refere-se o estudo de Prats (2007) em povoamentos de eucalipto



recentemente ardidos, na área de Açores em Albergaria – a – Velha, próxima de Jafafe. O estudo de Prats (2007) foi efectuado em duas encostas de eucaliptal recentemente ardido sujeitas a diferentes práticas de conservação do solo antes do incêndio, uma encosta sem qualquer tipo de intervenção, enquanto outra foi sujeita a lavragem vertical. Prats (2007) obteve coeficientes de 52.1 % e 48.6 %, respectivamente para alta e extrema intensidade. Estes valores são substancialmente próximos entre si ao contrário do que acontece em Jafafe, onde se observam taxas de escorrência de 54% e 21% para simulações de alta e extrema intensidade, respectivamente. No que diz respeito à perda de sedimentos, Prats (2007) refere valores medianos de 5.5 g.m^{-2} para alta intensidade e 13 g.m^{-2} para extrema intensidade, enquanto em Jafafe este valores se fixam em 3.4 g.m^{-2} e 0.1 g.m^{-2} , respectivamente. Revela-se, assim, a resposta hidrológica e de erosão reduzida nas simulações de extrema intensidade efectuadas em Jafafe quando comparadas com as de menor intensidade nesta área e com aquelas obtidas na área próxima de Açores no período de Setembro-2005 a Julho-2006.

As diferenças entre as taxas de erosão obtidas entre simulações de alta e extrema intensidade devem-se, certamente, às características distintas entre as parcelas que, dada a reduzida escala não representam toda a encosta e que, em muito devido à variabilidade provocada pelo incêndio, tem características espaciais bastante variáveis. A incontornável variabilidade relativa aos fenómenos de erosão torna difícil controlar todas as condicionantes dos mesmos e, conseqüentemente a interpretação dos resultados torna-se restrita.

5.2. Micro – Parcelas de Erosão por chuva natural

5.2.1. Escurrência superficial

Os dados de escurrência devida a eventos naturais estão distribuídos, no período de estudo, ao longo de 44 semanas de monitorização, 38 das quais coincidiram com a existência de precipitação. Foram registados, aproximadamente, 1277 mm de precipitação natural. Esta levou a coeficientes médios globais de escurrência de 7.5 % (Figura 23).

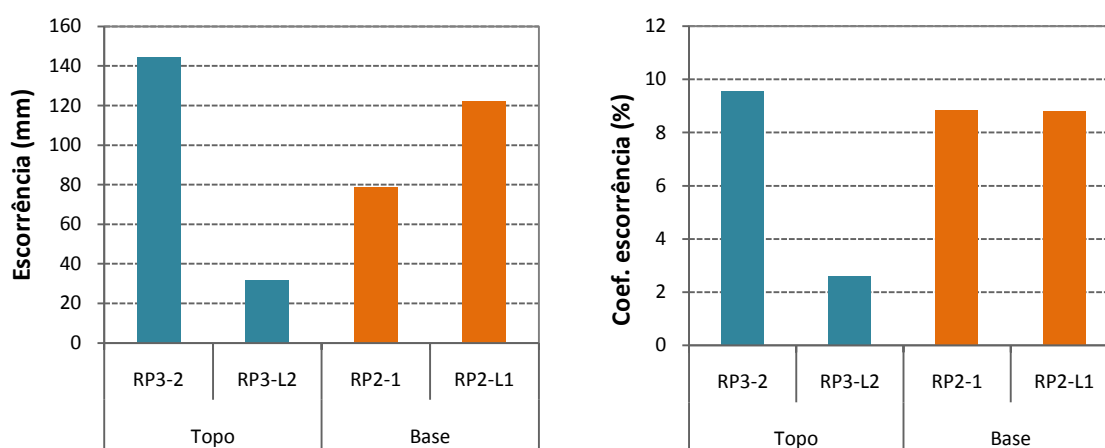


Figura 23 - Escurrência (mm; %) determinada nas parcelas sob-chuva natural segundo a posição na encosta.

A variação temporal da escurrência permite atribuir uma dada resposta hidrológica em função da precipitação ocorrida. Enquanto na base da encosta se regista uma frequência de escurrência nula entre 31 % a 37 % quando há registo de chuva, para o topo estes valores situam-se entre 47 % e 55 %. Verifica-se que as maiores produções de escurrência nem sempre coincidem com os eventos chuvosos mais extremos (

Figura 24 e Figura 25), existindo bastantes períodos em que se registou produções nulas ou bastante reduzidas de escurrência devidas a quantidades e intensidades relativamente elevadas de precipitação. Em Jafafe, foi em Fevereiro-2006 que ocorreu o evento mais significativo em quantidade (92.2 mm), no entanto com uma duração de 3 dias e 7 horas. Embora tenha I-30 elevada (14.4 mm/h) face à média anual (5.26 mm/h),

foi no mês de Outubro-2005 que ocorreu o evento com maior I-30 (38.4 mm/h), em que caíram 36.6 mm de chuva em 3 horas e 15 minutos. No mês de Fevereiro-2006 aconteceu o evento seguinte mais extremo, com I₃₀ máximo de 31.6 mm/h (queda de 65.6 mm de precipitação em 44 horas e 25 minutos). Além disso, é necessário ter em conta as características do solo nas parcelas como humidade, repelência e coberto.

A correlação entre a escorrência produzida e a precipitação total semanal é bastante baixa (coeficiente de correlação entre 0.02 e 0.27). No entanto, a intensidade máxima de precipitação verificada num intervalo de 30 minutos (I-30 máxima) apresenta melhores correlações (Correlação entre 0.44 e 0.75); ver Figura 24 e Figura 25). Estas diferenças são devidas à não linearidade conjunta da precipitação com a I-30 (Correlação 0.62).

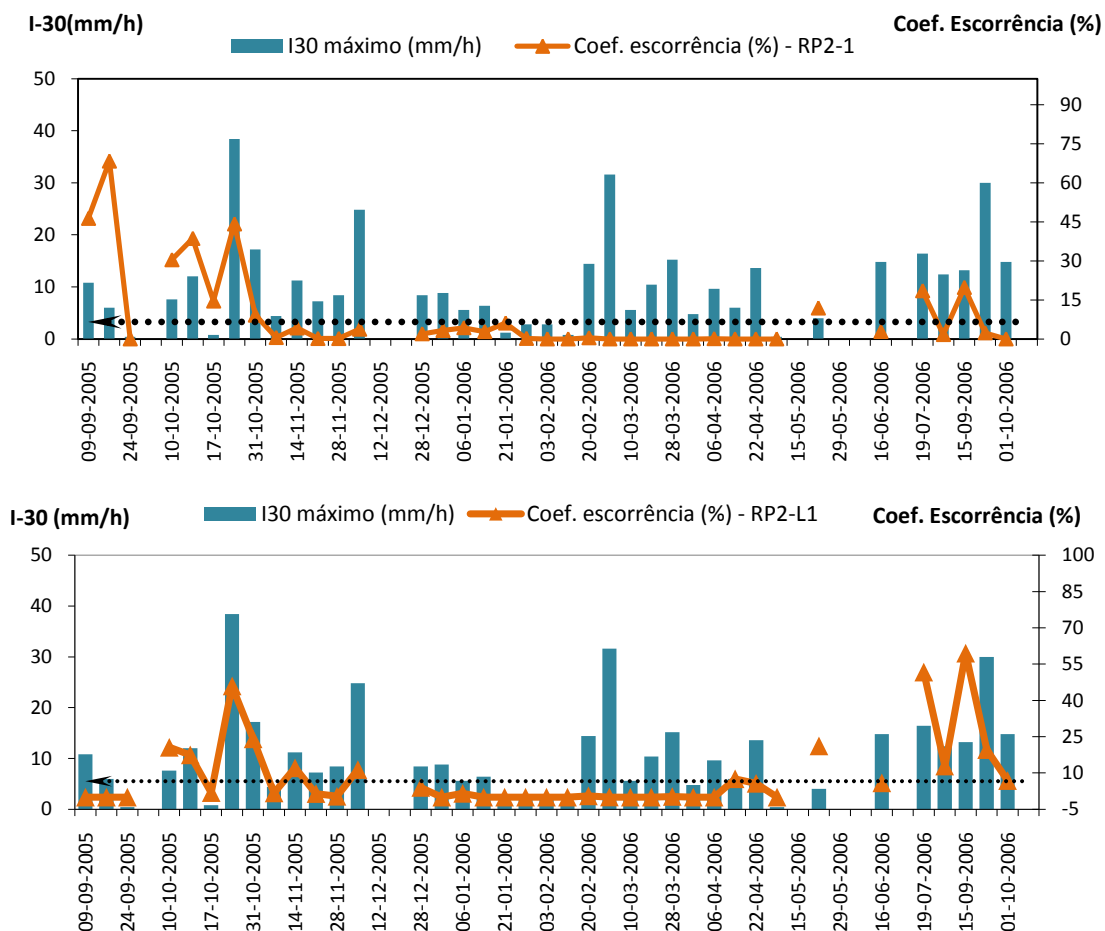


Figura 24 - Variação da precipitação semanal (mm) e do coeficiente de escorrência (%) para as 2 micro-parcelas na base da encosta: RP2-1, RP2-L1 n=36/parcela).

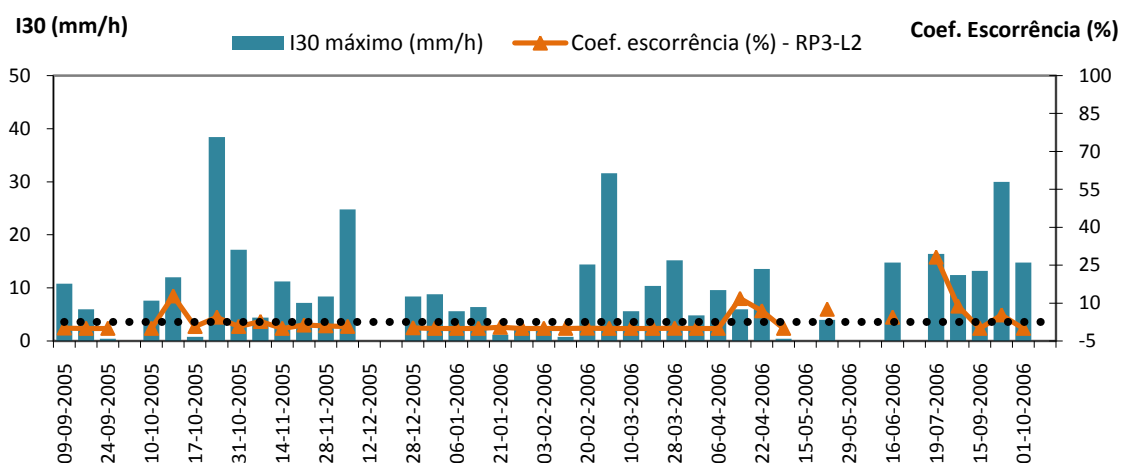
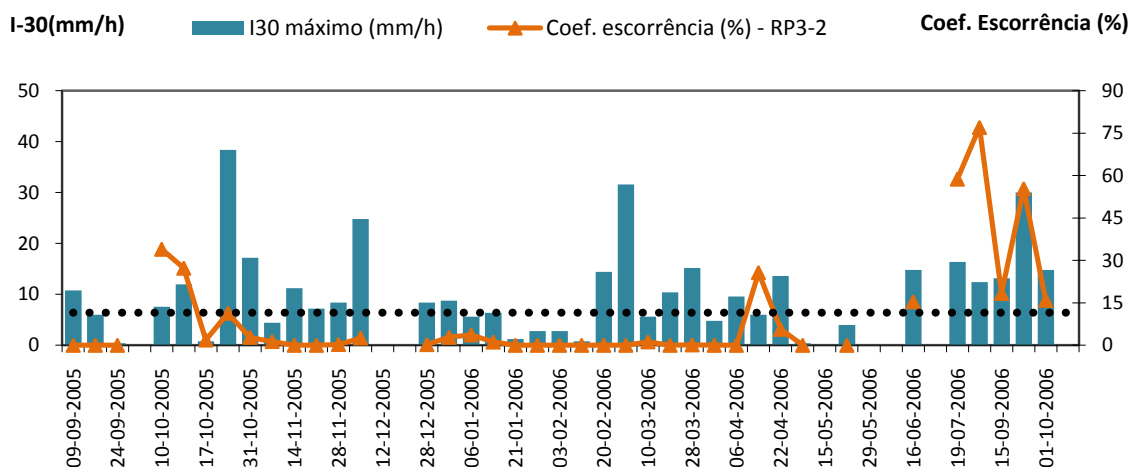


Figura 25 - Variação da precipitação semanal (mm) e do coeficiente de escorrência (%) para as 2 micro-parcelas sob chuva natural no topo da encosta: RP3-2 e RP₃-L2 (n=36/parcela).

Nota: nas figuras anteriores, a linha a tracejado representa o coeficiente de escorrência global da parcela respectiva.

Todas as parcelas apresentam uma tendência para maiores coeficientes de escorrência em duas épocas distintas, entre Setembro a Outubro de 2005, os meses mais próximos do incêndio e no fim do período de estudo, nomeadamente nos meses de Julho e Setembro, devido à elevada repelência registada nestes períodos (classe de repelência entre 7 a 8). Exceptuando a parcela RP2-1, no mês de Abril os registos de escorrência são também consideráveis face à produção média semanal em cada parcela.

Com o intuito de facilitar a visualização global, os resultados são igualmente mostrados em termos mensais. Na Figura 27 apresenta-se a variação temporal da escorrência, estando representada para cada mês os registos relativos a todas as 4 parcelas sob chuva natural (figura à esquerda). Por seu lado, a fim de facilitar a comparação entre as produções de escorrência devida a chuva simulada e natural, a Figura 27 apresenta a evolução temporal da taxa de escorrência relativamente a apenas os meses em comum de ambos os métodos, nomeadamente todos os meses de realização de simulações de chuva. De notar que o mês de Setembro, nas simulações de chuva engloba apenas duas parcelas de simulação.

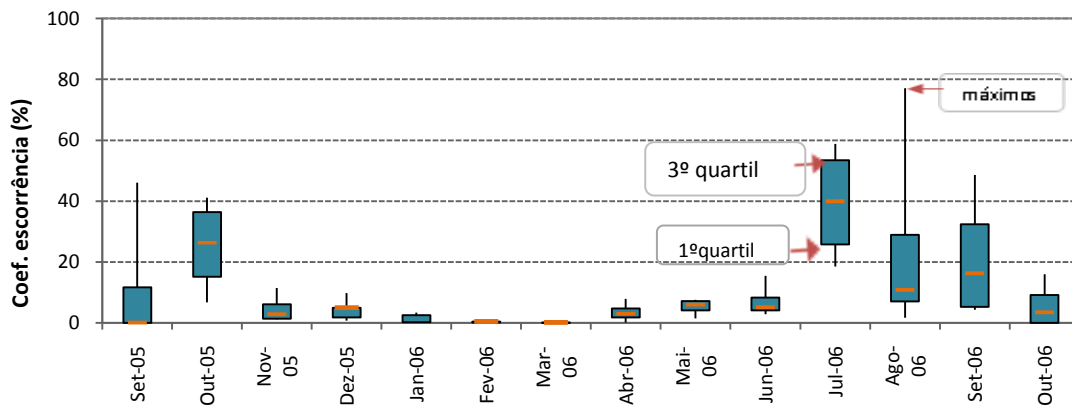


Figura 26 - Evolução temporal da produção de escorrência (%) nas nas micro-parcelas sob chuva natural; representação estatística.

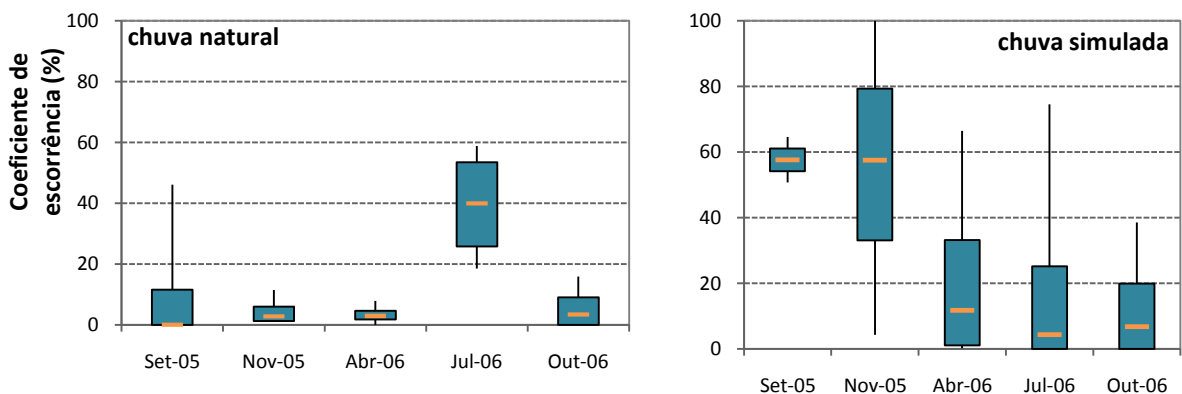


Figura 27 - Evolução temporal da produção de escorrência (%) nas micro-parcelas sob chuva natural (esquerda) e nas parcelas de simulação (direita); representação estatística.

Nota: nas duas figuras anteriores, os pontos cor de laranja representam a mediana entre as várias parcelas.

Verifica-se que, em termos globais, as simulações de chuva estimam escorrência aproximadamente quatro vezes superiores relativamente à resposta gerada pela chuva natural. Ao nível da evolução temporal e em termos medianos, as diferenças são notáveis (Figura 27). Tanto para a situação de chuva simulada como para eventos naturais, a escorrência apresenta consideráveis variações ao longo do período de estudo, no entanto nas simulações de chuva há uma maior amplitude entre os mínimos e máximos registados. Os máximos de escorrência devida quer a chuva simulada como natural ocorrem nos meses mais próximos do incêndio (entre Setembro a Novembro). A escorrência devida a chuva natural é também elevada após o Verão de 2006. Estes períodos de escorrência máxima (próximo do incêndio e após o Verão) são períodos em que o solo se apresenta seco e, conseqüentemente bastante repelente. Este facto denota o importante e evidente papel da repelência do solo à água.

Em geral, as simulações de extrema intensidade apresentam uma resposta hidrológica aproximada à ocorrida nas parcelas sob chuva natural (Tabela 8), no entanto a escorrência produzida nas simulações de chuva de menor intensidade mostram uma produção de escorrência cerca de 7 vezes superior à devida a chuva natural. Estas diferenças obtidas nos dois métodos devem-se, provavelmente às intensidades elevadas nas simulações de chuva. Os eventos naturais, mesmo os mais extremos, estão longe de alcançar a intensidade da chuva simulada, já que mesmo as simulações menos intensas (> 40mm/h) superam os máximos naturais (38.4 mm/h). Este facto por si só leva a que se esperem variações entre os resultados de ambas as metodologias. Um factor a ter em conta tem a ver com as características distintas entre as parcelas que, dada a reduzida escala não representam toda a encosta e que, em muito devido à variabilidade provocada pelo incêndio, tem características espaciais bastante variáveis. As maiores divergências entre ambos os métodos são respeitantes à produção de escorrência na base da encosta (Figura 28), especialmente devido à resposta bastante reduzida da parcela F.RSE₄.

Tabela 8 – Escorrência produzida nas 4 simulações de chuva efectuadas nas parcelas fixas de simulação e escorrência devida à chuva natural (mm;%).

Resposta	Escorrência média global (mm/ano)		Coeficiente escorrência médio global (%)			
	Parcelas sob chuva natural	Simulações de chuva		Parcelas sob chuva natural	Simulações de chuva	
		Alta	Extrema		Alta	Extrema
Global	94.2	96.2	19.8	7.5	49.6	6.1

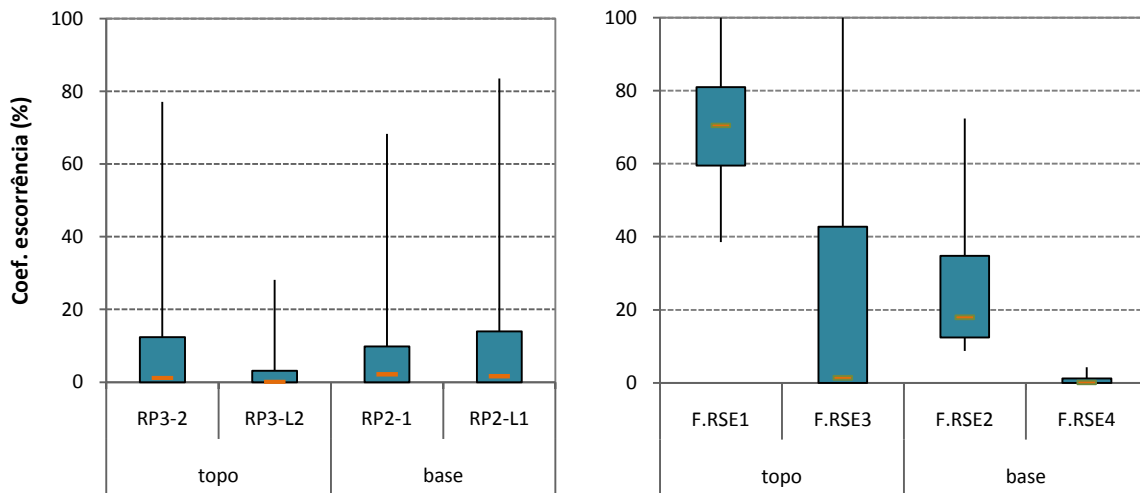


Figura 28 - Produção de escorrência (%) nas micro-parcelas sob chuva natural (esquerda) e nas parcelas fixas de simulação (direita) segundo a posição no declive (topo e base). Representação estatística.

A variabilidade espacial e temporal da repelência é um dos factores principais a ter em conta nos processos hidrológicos. Com o intuito de avaliar o efeito da repelência do solo na resposta hidrológica das parcelas sob chuva natural, o facto da mesma ser monitorizada a intervalos variáveis leva a que não se conheça a repelência exacta em algumas semanas de recolha de escorrência. Assim, é possível apenas um análise relativa a períodos mais longos, procedimento já tomado por Malvar (2007), dividindo o ano de estudo em sub - períodos de repelência. Embora não seja facilmente identificável os períodos de hidrofobia ou hidrofilia, verificou-se que o solo se apresentava nitidamente

hidrófilo no mês de Março-2006 e com alguma frequência de características hidrofílicas em Abril-2006 e Maio-2006. Estes meses representam o período menos repelente do ano hidrológico em estudo, embora em Abril-2006 as condições não sejam tão favoráveis à infiltração.

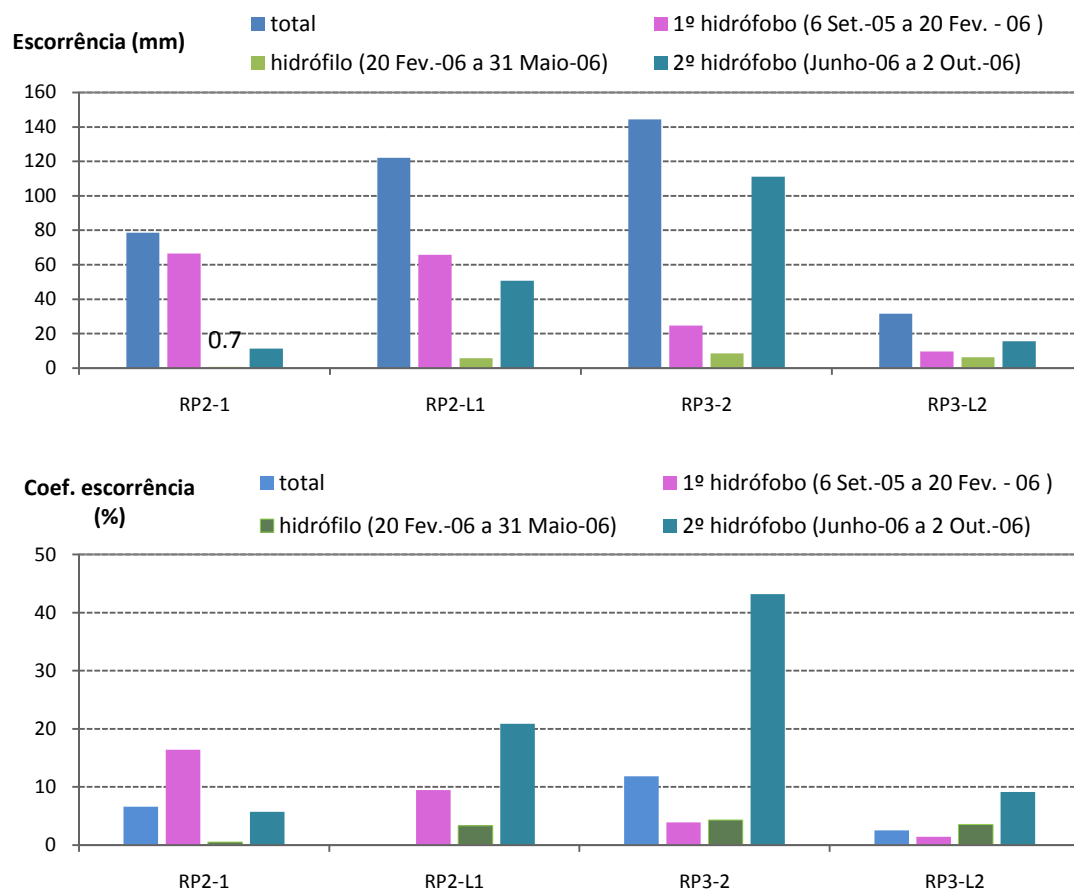


Figura 29 – Variação da escorrência (mm; %) segundo sub-períodos de hidrofobia ou hidrofília do solo, para as 4 micro-parcelas de Jafafe I (adaptado de Malvar, 2007)

Em geral, verificam-se menores taxas de escorrência no período hidrofílico relativamente a ambos os períodos de hidrofobia. Na Figura 26, é nítida a menor resposta hidrológica nos meses hidrofílicos de Fevereiro-2006 e Março-2006. É nítido que quando o solo se torna mais húmido a escorrência é menor, o que está relacionado com a presença de repelência, dada a relação entre esta e a humidade já referida.



Para reforçar a constatação do efeito da repelência na resposta hidrológica do solo face à precipitação natural, note-se (Tabela 9) as alterações na correlação entre a escorrência e a precipitação ou a escorrência e a I30 máxima para os três sub-períodos de repelência em relação ao global mencionado anteriormente (coeficiente de correlação entre 0.02 e 0.27 para a precipitação e entre 0.44 e 0.75 para a I30). O período hidrófilo apresenta sempre uma correlação bastante fraca, já em ambos os períodos de hidrofobia, as correlações apresentam-se, em geral entre razoáveis a bastante boas, exceptuando-se a parcelas RP₂-2 no 2º período de repelência extrema. Salvo esta excepção e o período de hidrofília, as relações apresentadas revelam melhorias significativas quando divididas por períodos (Tabela 9) relativamente ao global anual. Embora continue a ser a I-30 que melhor explica as diferentes respostas hidrológicas relativamente à quantidade total, revela-se, nesta parcela (RP3-2) uma excepção no 2º período de repelência severa, em que a precipitação se revela como a mais infuente (Correlação de 0.91).

Tabela 9 – Coeficientes de correlação da escorrência (mm) com a precipitação (mm) e a I-30 (mm.h⁻¹) para as várias parcelas, segundo períodos de repelência.

Coef. Correlação Linear (r)						
Parcelas	Precipitação (mm) vs Escorrência (mm)			I-30 (mm/h) vs Escorrência (mm)		
	1º Hidrófobo (Set.-05 a FEv.-06)	Hidrófilo (Março-06 a Maio-06)	2º Hidrófobo (Junho-06 a Out.-06)	1º Hidrófobo (Set.-05 a FEv.-06)	Hidrófilo (Março-06 a Maio-06)	2º Hidrófobo (Junho-06 a Out.-06)
RP2-2	0.36	-0.31	-0.06	0.80	-0.25	0.73
RP2-L2	0.53	-0.16	0.64	0.90	-0.06	0.74
RP3-2	0.32	-0.13	0.91	0.63	-0.11	0.78
RP3-L2	0.30	-0.13	0.58	0.55	-0.045	0.62
n	22	10	6	22	10	6

Dadas as correlações globais entre a escorrência devida a chuva natural com a intensidade máxima da precipitação num período de 30 minutos de 0,44 a 0.75 para correlações bastante boas na maior parte do período de estudo, na tabela acima,

considera-se que este factor (intensidade da precipitação) é o determinante para as respostas hidrológicas verificadas nestas parcelas, o qual condiciona o regime de humidade do solo, com conseqüentes alterações na repelência à água do solo. Por seu lado, nas simulações de chuva verificou-se respostas hidrológicas das parcelas bastante distintas face às duas intensidades de simulação, podendo dever-se a um possível ‘quebra’ da repelência do solo à água durante as simulações de extrema intensidade.

5.2.2. Erosão hídrica

No que diz respeito à relação entre as taxas de erosão e a produção de escorrência (Figura 30), esta é em geral boa (Correlação entre 0.72 a 0.86 para as parcelas). Ao nível da concentração de sedimentos (g/l), quer total ou em cada fracção, verifica-se, com excepção da parcela RP2-1 (parcela com os registos mais baixos de erosão; Figura 31), uma correlação negativa desta com a escorrência. Este facto indica que altas quantidades de escorrência não levam a maiores concentrações de sedimentos. No entanto, importa lembrar a existência de erros inerentes à determinação dos sedimentos em volumes reduzidos de amostra.

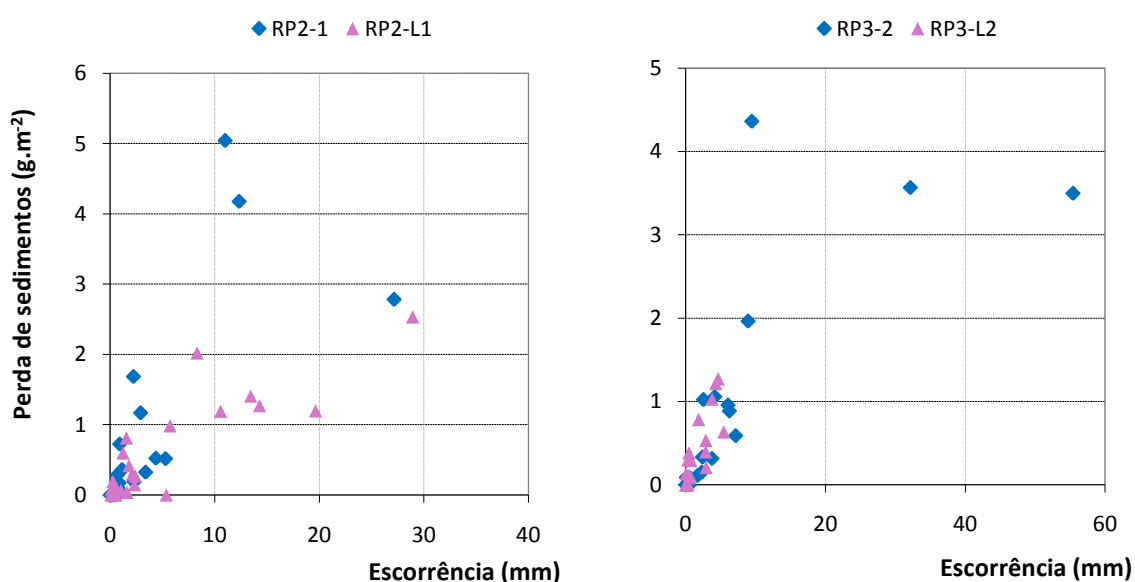


Figura 30- Relação entre as perdas por erosão (g.m^{-2}) e a escorrência (mm) para os pares de micro-parcelas adjacentes ($n = 20 - 26/\text{parcela}$).

Apresentam-se as perdas de sedimentos (fracção orgânica e mineral) nas micro-parcelas sob chuva natural. A erosão média global nestas parcelas foi de 14.6 g.m^{-2} transportados com a escorrência superficial correspondente a $11.42 \text{ g/m}^2.\text{mm}$ de precipitação natural (Figura 31).

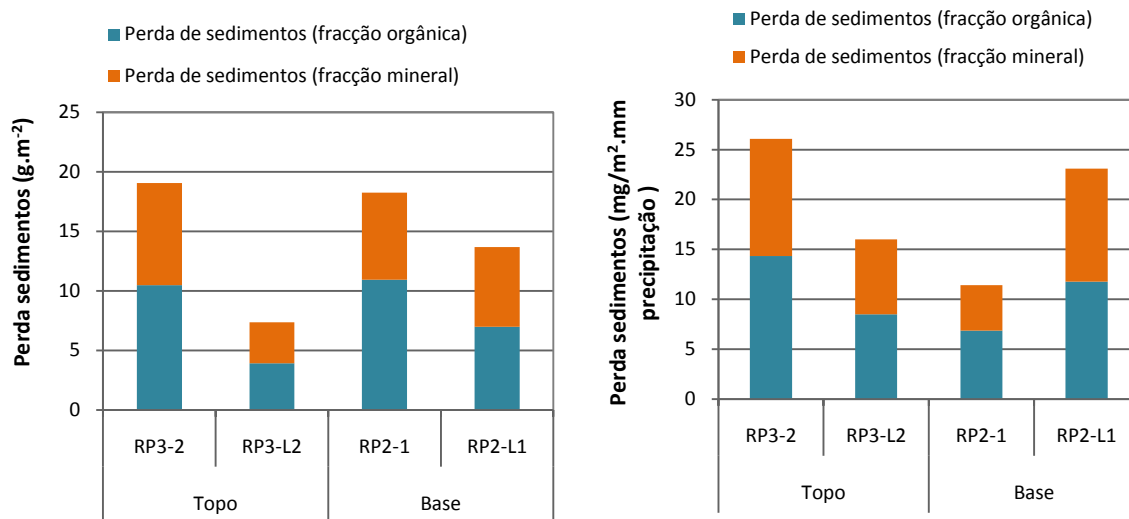


Figura 31 - Perda de sedimentos (g.m^{-2} ; $\text{g/m}^2.\text{mm}$ precipitação), fracção orgânica e mineral, nas micro-parcelas sob chuva natural, conforme a sua posição na encosta.

De acordo com a figura anterior, não parece que a posição na encosta (topo ou base) exerça influência na resposta erosiva das parcelas. No entanto, evidencia-se a parcela de topo, RP3-L2 por apresentar as menores taxas de erosão.

Apresenta-se os resultados da taxa de erosão, em totais mensais (Figura 32) e a comparação dos totais mensais nos meses de simulações (Figura 33). As maiores perdas ocorrem nos mesmos períodos em que se registou maior resposta hidrológica, ou seja, nos primeiros meses após o incêndio (de Setembro a Novembro) e/ou após o Verão de 2006, devido ao efeito da repelência. No entanto, o primeiro período é predominante em termos de erosão, quer devida a chuva simulada ou natural.

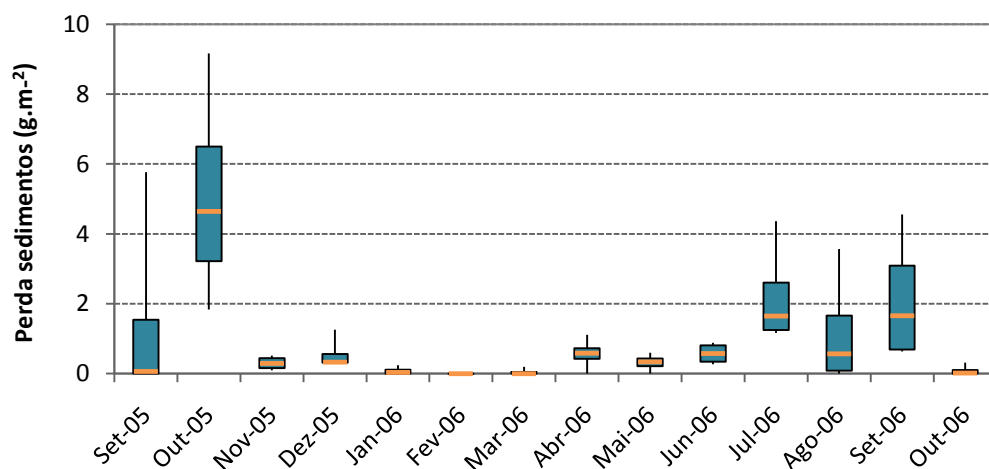


Figura 32 - Evolução temporal da taxa de erosão (g.m^{-2}) nas micro-parcelas sob chuva natural; representação estatística.

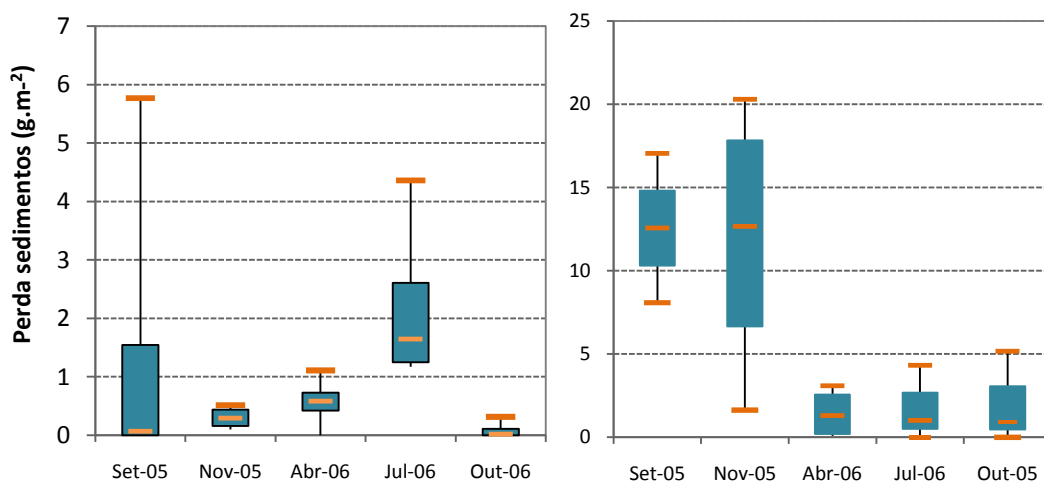


Figura 33- Evolução temporal da produção global de sedimentos (g.m^{-2}) nas micro-parcelas sob chuva natural (esquerda) e nas parcelas de simulação (direita); representação estatística ($n=2-4$).

Comparando as taxas globais de erosão devida a chuva natural e simulada (Tabela 10), a chuva natural leva a aproximadamente 3 vezes mais perdas relativamente às simulações de extrema intensidade e cerca de 3 vezes menor que as de alta intensidade, ou seja apresentam uma resposta intermédia entre as duas intensidades de simulação. Quando se tem em conta a erosão produzida por unidade de precipitação, as simulações

de alta intensidade levam a perto de 5 vezes mais perdas relativamente à chuva natural, enquanto as simulações de extrema intensidade são responsáveis pelas menores perdas registadas, que são aproximadamente metade das que se devem à chuva natural.

Tabela 10 – Taxa de erosão média global ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{mm}$) produzida nas 4 simulações de chuva efectuadas nas parcelas fixas de simulação e escorrência devida à chuva natural (mm; %).

Resposta	Taxa de erosão ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)			Taxa de erosão ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{mm}$ precipitação)		
	Parcelas sob chuva natural	Simulações de chuva		Parcelas sob chuva natural	Simulações de chuva	
		Alta	Extrema		Alta	Extrema
Global	14.6	27.1	5.1	30.1	135.8	15.2

Importa referir que a chuva simulada (com 2 m de altura) apresenta baixa energia cinética em relação à chuva natural da mesma intensidade, o que condiciona a capacidade de arraste e denudação do solo pela chuva. Devido a esta limitação, o método de simulações de chuva pode representar incorrectamente a taxa de perda de sedimentos, em relação às condições de precipitação natural. Além da diferente energia das gotas de chuva natural e simulada, também a sua distribuição pode ser bastante diferente. Por outro lado, importa lembrar que a intensidade da precipitação simulada é, frequentemente, bastante superior à da precipitação natural.

As maiores divergências entre ambos os métodos são respeitantes às taxas de erosão na base da encosta. Foi nesta secção da encosta onde foram observadas maiores evidências de erosão como pequenos canais, pedestais, entre outros aspectos relativos à micro-topografia das parcelas, as quais se evidenciam apenas a partir de Abril quer nas parcelas de simulação, quer de chuva natural. Estas alterações no solo terão sido devidas à chuva natural, uma vez que as parcelas de simulação estão igualmente sujeitas às intempéries naturais.

As diferenças entre as taxas de erosão obtidas nos dois métodos devem-se, certamente, às características distintas entre as parcelas que, dada a reduzida escala não

representam toda a encosta e que, em muito devido à variabilidade provocada pelo incêndio, tem características espaciais bastante variáveis. A incontornável variabilidade relativa aos fenómenos de erosão torna difícil controlar todas as condicionantes dos mesmos e, conseqüentemente a interpretação dos resultados torna-se restrita.

Uma vez que os dados apresentados se baseiam em aproximações anuais determinadas, é importante verificar a frequência de registo associada às taxas de erosão encontradas em todas as parcelas de estudo (Figura 34). Pode verificar-se que em todas as parcelas de ambas as metodologias, as perdas de sedimentos encontram-se predominantemente entre 0 a 0.1 g/m².mm de precipitação. Verifica-se, igualmente, que a resposta hidrológica superior nas simulações de alta intensidade deve-se a acontecimentos pontuais ocorridos em Setembro e Novembro – 2005, ou seja, muito pouco frequentes, pelo que não se consideram significativos em termos estatísticos. Assim, considera-se que existe alguma probabilidade das taxas de erosão devida a chuva simulada serem representativas das perdas devidas a eventos naturais, a micro-escala.

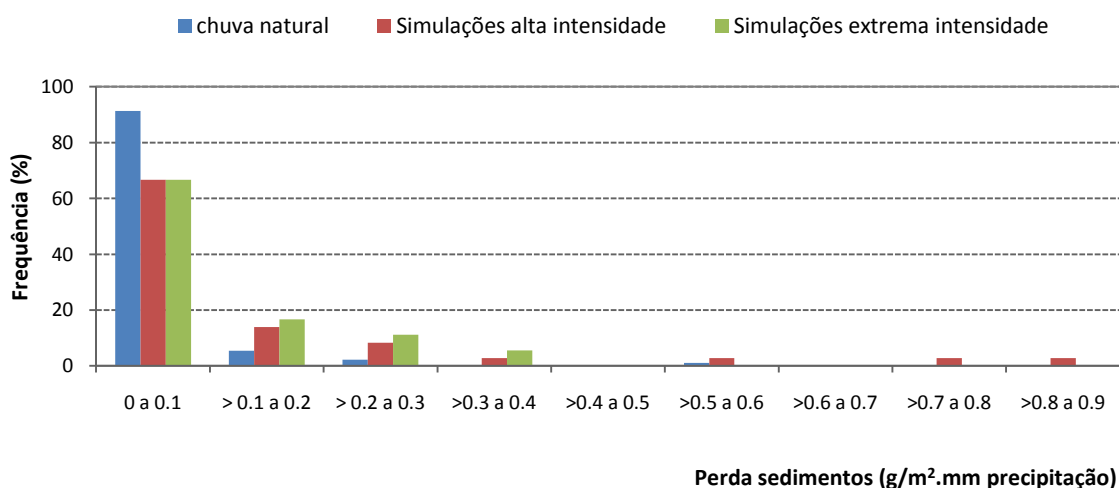


Figura 34 – Frequência (%) associada a intervalos de taxas de erosão encontrados nas parcelas de simulação e sob chuva natural.



Com o intuito de avaliar a resposta hidrológica e erosiva nas micro-parcelas sob chuva natural na área de estudo, refere-se o estudo de Malvar (2007) sobre esta metodologia de determinação da erosão hídrica, na área de Açores, a mesma área de estudo de Prats (2007) e durante o mesmo período, ou seja com início 2 meses após o incêndio (Setembro-2005). Malvar (2007) obteve coeficientes globais entre 23 a 25 %, o mais elevado no local sujeito a lavragem vertical. Estes valores são elevados face à taxa de escorrência global determinada em Jafafe de 7.5 %. No que diz respeito à perda de sedimentos, Malvar (2007) refere perdas globais entre 49 g.m^{-2} a 55 g.m^{-2} , notavelmente o valor mais elevado para a área com lavragem, que se revela notavelmente elevado quando se compara com a perda global de 14.6 g.m^{-2} obtida em Jafafe. No entanto, Malvar (2007) considera ter obtido valores baixos quando comparado com outros estudos em que, por exemplo, na área de Caramulo há registo de perdas entre 50 – 220 g.m^{-2} .

No que diz respeito à perda comparativa de sedimentos devida a chuva natural e simulada, a micro - escala, Malvar (2007) e Prats (2007) encontraram, na área de Açores, concelho de Albergaria-a-Velha, taxas de erosão 3 vezes superiores nas parcelas de chuva natural (50 g.m^{-2} para chuva natural contrapondo com perdas entre 13 g.m^{-2} a 16 g.m^{-2} devidas a chuva simulada). Assim, as simulações de chuva parecem ter tendência a estimar taxas globais menores relativamente às micro-parcelas sob chuva natural. No entanto, embora não esteja no âmbito deste trabalho, é de referir que quando se estuda a erosão a escalas superiores relativamente às simulações de chuva, os registos são ainda menores, tal como constatou Vieira (2008), que obteve entre 0.2 g.m^{-2} a 0.4 g.m^{-2} em parcelas sob chuva natural (área de 16 m^2) na mesma área de Açores.

5.3. Modelação da erosão

5.3.1. Modelação das simulações de chuva

Os parâmetros de entrada no modelo correspondem aos obtidos através dos procedimentos de cálculo expostos no capítulo ‘Análise de dados’, em ‘Modelo MEFIDIS’, utilizados no procedimento de parametrização inicial. No que diz respeito à capacidade de armazenamento superficial, esta foi determinada segundo Kamphorst et al. (2000), em função do declive da rugosidade medida (‘random roughness’). A rugosidade foi medida em todas as parcelas, mas não em todos os períodos. Para as falhas, foi assumido o valor medido na mesma parcela, na data mais próxima.

Posteriormente, é avaliada a necessidade e possibilidade de ajustar os parâmetros de entrada, a denominada calibração. Optou-se por seleccionar para a calibração os 5 eventos simulados das duas parcelas do topo da encosta, mas de diferentes intensidades ($F.RSE_1$ e $F.RSE_2$).

Para a parametrização inicial, definiram-se três conjuntos de valores de parâmetros de entrada, que levam a três situações diferentes:

- Cenário mediano (Cal. med.) – situação mediana de escorrência e erosão,
- Cenário máximo (Cal. max.) – selecção do mínimo ou máximo de cada um dos parâmetros de entrada, de modo a que o modelo maximize a escorrência e erosão;
- Cenário mínimo (Cal. min.) – selecção do mínimo ou máximo de cada um dos parâmetros de entrada, de modo que o modelo minimize a escorrência e erosão.
-

A estratégia de selecção dos cenários permite ter em conta a variabilidade espacial relacionada com os parâmetros de uso e características do solo observados na

área de estudo, tendo em conta que estes variam entre mínimos e máximos. Assim, é possível avaliar o modelo MEFIDIS em toda a gama de valores (de parâmetros) medidos.

A) Sensibilidade do modelo à alteração dos parâmetros de entrada

Face à situação mediana, foi determinada a sensibilidade do modelo face à alteração de cada parâmetro entre mínimo e máximo. Os resultados desta análise, cujo procedimento é explicado no capítulo Análise de dados – Modelo MEFIDIS, apresentam-se na Tabela 11 e Tabela 12, respectivamente, para a escorrência e erosão, onde se mostra a ordem de influência de cada parâmetro face ao resultado do Mefidis.

Os parâmetros listados são todos aqueles que oscilam entre mínimo e máximo e que influenciam em maior ou menor medida cada uma das taxas. Em todos os parâmetros, à excepção da porosidade efectiva, se verifica que a sensibilidade, em módulo, é menor na escorrência que na erosão, ou seja, possíveis alterações nos parâmetros de entrada influenciam em maior proporção a taxa de perda de sedimentos que a de escorrência superficial. Esta constatação faz sentido, já que a erosão é também afectada pela própria escorrência, e assim por todos os factores que afectam esta última.

Tabela 11- Sensibilidade da escorrência aos parâmetros de entrada (n=10/parâmetro).

Ordem de influência	Parâmetros	Abreviatura / unidades	Gama		Sensibilidade
			Mínimo	Máximo	
1	Taxa de infiltração	Ksat (cm.h ⁻¹)	1,950	3,100	-2,79
2	Capacidade de armazenamento superficial	s.ret. (mm)	6,578	19,282	-5,40E-01
3	Humidade inicial	Moist. (%)	1,523	15	3,31E-02
4	Pressão capilar	psi (cm)	8,900	9,838	-8,19E-03
5	Porosidade efectiva	o.e. (%)	40,658	42,541	-4,09E-04

Tabela 12 – Sensibilidade da Erosão aos parâmetros de entrada (n=10/parâmetro).

Ordem de influência	Parâmetros	Abreviatura / unidades	Gama		Sensibilidade
			Mínimo	Máximo	
1	Taxa de infiltração	Ksat (cm.h ⁻¹)	1.950	3.100	-3,10
2	Capacidade de armazenamento superficial	s.ret. (mm)	6.578	19.282	-2,18
6	Diâmetro das partículas	d50 (mm)	0.124	0.149	-1,11
3	Força crítica de desagregação do solo	toc. (kPa)	9.800	49.000	-9,34E-01
4	Fracção de argila	Clay (%)	7.420	11.760	-4,04E-01
5	Humidade inicial	Moist. (%)	1.523	15	2,96E-02
7	Pressão capilar	psi (cm)	8.900	9.838	-7,64E-03
8	Porosidade efectiva	o.e. (%)	40.658	42.541	-3,78E-04

B) Parametrização inicial - Escorrência

Em termos globais, a Figura 35 mostra a relação entre os resultados da escorrência fornecida pelo modelo e os valores observados no campo. Em geral, o modelo estima valores bastante superiores aos medidos nas simulações de extrema intensidade, enquanto tende a responder de forma inversa para as simulações de intensidade menor. Não é de estranhar, já que se havia verificado que as simulações de extrema intensidade têm uma resposta contrária ao esperado quando se tem em conta as variáveis monitorizadas e que entram no modelo, tais como a humidade inicial do solo, entre outras.

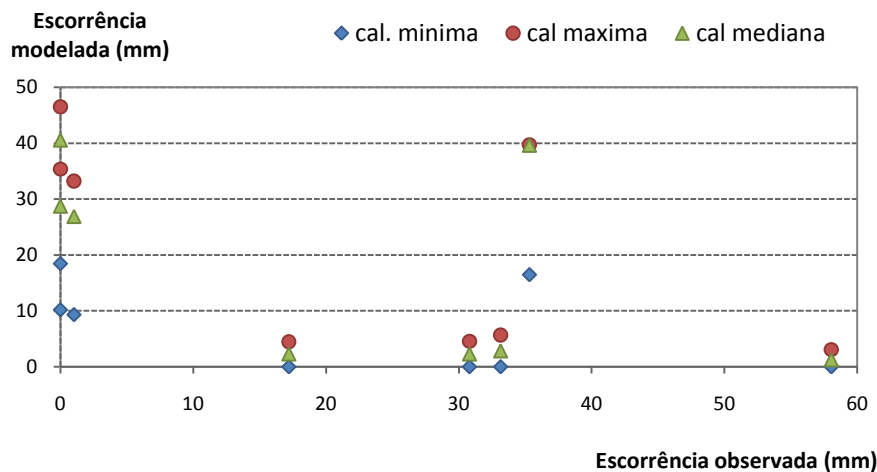


Figura 35 - Relação entre a escorrência estimada pelo modelo e a escorrência observada, para três conjuntos de parâmetros, na calibração nº1 (n = 8 / calibração).

Os coeficientes que indicam o desempenho do modelo (coeficiente de correlação e Índice de Nash- Sutcliffe), bem como o erro (bias) entre os resultados do modelo e os valores observados de escorrência, constam na Tabela 13. Globalmente, os resultados iniciais são fracos em termos de desempenho do modelo. A correlação entre os resultados do modelo e resultados observados é bastante baixa (entre -0.56 a -0.49). No entanto, para a parcela de simulações extremas F.RSE₂ o modelo parece ter uma resposta mais concordante com a que se observa no campo verificando-se, para as calibrações mediana e mínima, índices de eficiência e coeficientes de correlação positivos. O modelo fornece melhores estimativas para a situação de calibração mediana, com uma melhor relação entre os resultados observados e do modelo (Correlação de 0.39) e um índice Nash-Sutcliffe de 0.25, o que sugere alguma utilidade do modelo. Os valores do erro (bias) mostram que o modelo estima valores demasiado baixos para a parcela F.RSE₁ e demasiado elevados para a parcela F.RSE₂.

Tabela 13 – Diferença numérica e coeficientes de correlação e de Nash – Sutcliffe entre resultados de ocorrência do modelo e observados, para as três situações de parametrização.

	Erro (bias)			Coeficiente de correlação – r			Coeficiente de Nash – Sutcliffe		
	Cal. orig.	Cal. max	Cal. min	Cal. orig.	Cal. max	Cal. min	Cal. orig.	Cal. max	Cal. min
Global	-0.18	-0.017	-0.66	-0.49	-0.56	-0.49	-1.65	-1.92	-0.53
F.RSE1	-0.94	-0.87	-0.97	-0.55	-0.49	-0.05	-0.059	-0.085	-0.20
F.RSE2	2.74	3.26	0.50	0.39	0.07	0.31	0.25	-0.046	0.14

Na Figura 36 pode constatar-se a sobre-estima dos resultados de ocorrência do modelo para as simulações de extrema intensidade e a estimativa muito baixa que o MEFIDIS fornece para as simulações de intensidade menor, independentemente do cenário considerado. Na simulação de Novembro, na parcela F.RSE₂, o modelo fornece um valor de ocorrência bastante próximo da que se observou no campo, nas situações de calibração mediana e máxima (Figura 36). Além disso, as curvas de evolução temporal dos dados do modelo e dos dados observados não se assemelham.

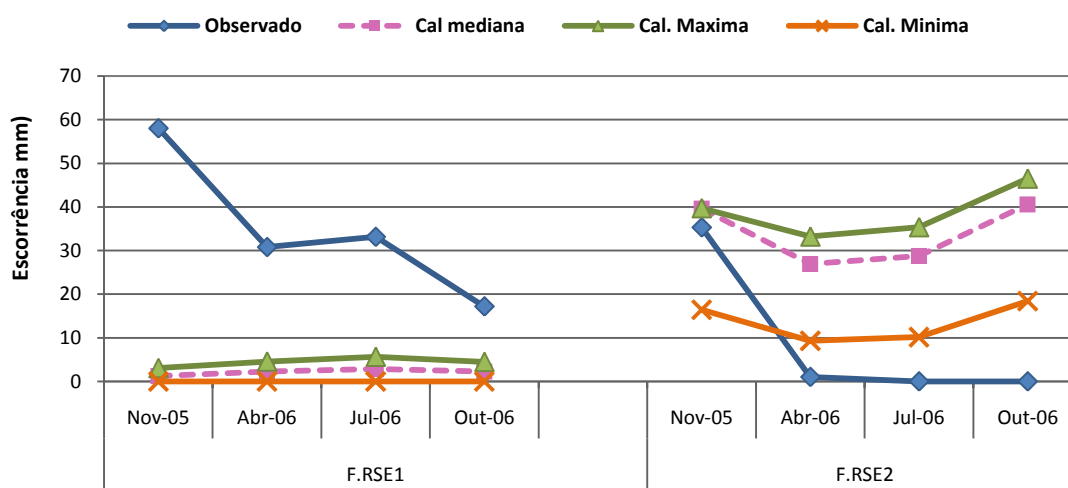


Figura 36 – Curvas de evolução temporal dos resultados de ocorrência observada e fornecida pelo modelo, para os três cenários da calibração 1.

C) Parametrização inicial - Erosão

Em termos globais, a Figura 37 mostra a relação entre os resultados da erosão fornecida pelo modelo e os valores observados no campo. Os indicadores de desempenho mostram-se na Tabela 14, onde se pode observar valores bastante fracos. Em geral, o modelo fornece resultados superiores aos observados, principalmente para a parcela F.RSE₂, como se pode ver através do erro (bias) na Tabela 14. O índice Nash-Sutcliffe é bastante baixo, o que indica que o modelo fornece informação inferior à média do modelo. No entanto, na parcela F.RSE₂ para a calibração mínima, o modelo fornece uma estimativa aceitável, que apresenta boa correlação com os valores observados (Correlação de 0.73) e um índice de eficiência considerado bom (Nash- Sutcliffe de 0.75). No entanto, tal como para a resposta hidrológica, o modelo fornece uma melhor estimativa para as simulações efectuadas na parcela F.RSE₂, neste caso especialmente na calibração que minimiza os resultados de erosão, mostrando um índice Nash- Sutcliffe e uma correlação entre os dados modelados e observados superiores a 0.7. Salvo esta excepção, os resultados são bastante fracos, sendo o cenário máximo o mais desfavorável.

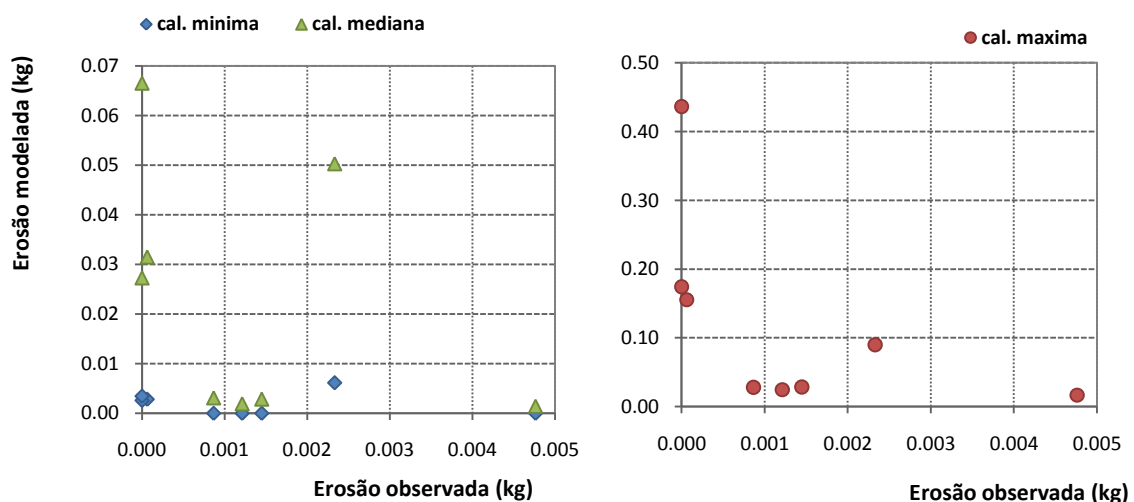


Figura 37 – Relação entre a escorrência estimada pelo modelo e a escorrência observada, para três conjuntos de parâmetros, na calibração nº1 (n = 8 / calibração).

Tabela 14 – Diferença numérica e coeficientes de correlação e de Nash – Sutcliffe entre resultados de erosão do modelo e observados, para as três situações de parametrização.

	Erro (bias)			Coeficiente de correlação – r			Coeficiente de Nash – Sutcliffe		
	Cal. Mediana	Cal. Máxima	Cal. Mínima	Cal. Mediana	Cal. Máxima	Cal. Mínima	Cal. Mediana	Cal. Máxima	Cal. Mínima
Global	16.31	88.23	3.07	-0.34	-0.48	-0.19	-256.98	-7898.26	-35.35
F.RSE1	0.12	10.77	2.43	-0.59	-0.71	*	-0.88	-14.76	-65.43
F.RSE2	72.37	356.48	5.29	0.17	-0.41	0.73	-238.47	-17576	0.75

- Não existe desvio padrão da erosão no modelo: valor sempre nulo.

As curvas de evolução da erosão dada pelo modelo, nomeadamente a calibração mínima e mediana, e a erosão observada revelam alguma semelhança (Figura 38). O entanto, como se verificou, a correlação global entre os dados do modelo e os dados observados é bastante baixa (Correlação ≤ -0.19). Verifica-se que o cenário de calibração máxima do modelo fornece estimativas de erosão muito elevadas face às perdas de sedimentos medidas.

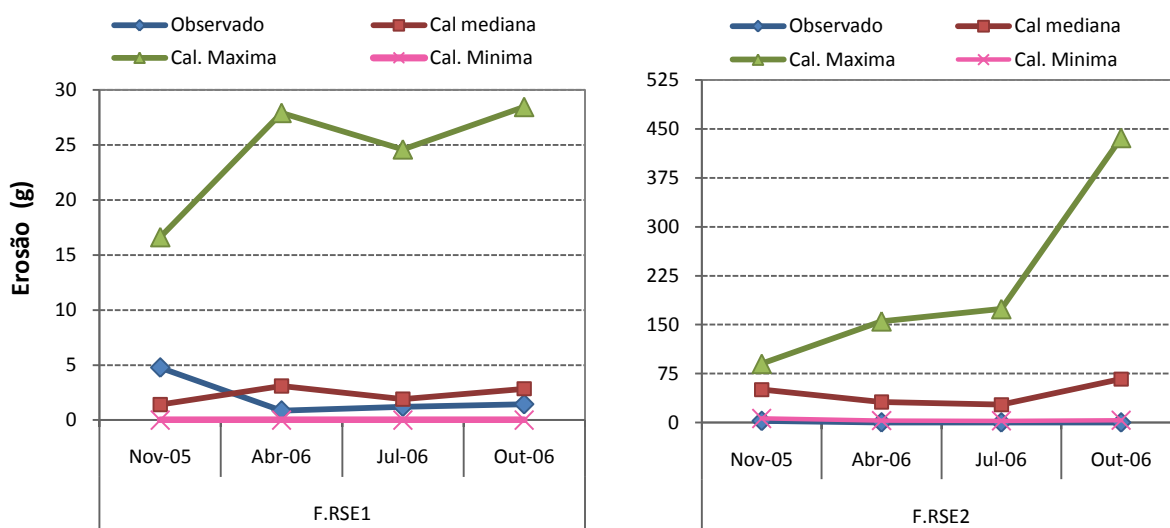


Figura 38 - Curvas de evolução temporal dos resultados de erosão observada e fornecida pelo modelo, para os três cenários da calibração 1.

D) Calibração da escorrência

A calibração dos eventos é efectuada com vista a obter o melhor conjunto de parâmetros, usados subsequentemente na validação do modelo. O ajuste dos parâmetros de entrada do modelo consoante determinados factores condicionantes dos processos hidrológicos poderá fornecer uma melhor compreensão acerca dos mesmos. A metodologia de calibração efectuada resume-se na Tabela 15 e Tabela 16, onde se apresenta a parametrização base escolhida e o factor de multiplicação do parâmetro de entrada a alterar.

Calibração 2 e 3:

Embora se tenha verificado uma fraca correlação entre a escorrência observada e a repelência à água (Correlação < 0.1), a segunda calibração efectuada (calibração 2) tem por base a alteração de k_{sat} em função da repelência à superfície, isto porque será este parâmetro o mais afectado pela presença de condições hidrofóbicas. Além disso, Nunes et al. (2005) mostram que os valores de k_{sat} calibrados são significativamente menores que os valores médios medidos. A calibração 2 consiste na alteração de k_{sat} em função da repelência à superfície, por ser a única profundidade em que se regista alguma variação temporal e espacial desta propriedade, não sendo possível tecer relações entre certas classes de hidrofobia e a resposta hidrológica a partir das restantes medições. A calibração 3, por seu lado, baseia-se na alteração de k_{sat} em função não só da repelência como também da fracção de cinzas no solo (Tabela 16). Estas são responsáveis pela obstrução dos poros, reduzindo o arejamento e a capacidade de infiltração do solo (Varela, 2007).

Calibração 4, 5 e 6:

A calibração 4 tem em conta a capacidade do coberto (pedras, litter e vegetação) para proteger o solo, contabilizando a sua capacidade de retenção de água. Assim, a capacidade de armazenamento é alterada em função da fracção desse coberto protector. O coeficiente de rugosidade (k_s), inverso do coeficiente de Manning (n) e parâmetro de

entrada no modelo, foi considerado à partida igual a 20, correspondente a solo nú e irregular (USDA, 1986). Por representar uma assumpção que pode não ser a mais correcta, optou-se por calcular ks tendo em conta a sua relação inversa com o coberto. Quando o solo se apresenta sem coberto, o valor de ks é igual a 20 (solo nú e irregular: USDA, 1986); para solo totalmente coberto, o coeficiente de rugosidade fica igual a 1 (solo florestal com coberto vegetal denso: USDA, 1986). As calibrações seguintes (calibração 5 e calibração 6) consistem na união das calibrações anteriores (Tabela 15).

Seleccionou-se, para calibração o cenário de mediana por ser o que fornece melhores resultados iniciais e também porque deve ser mais realista quando comparado com as condições extremas.

Tabela 15- Caracterização das calibrações efectuadas.

Calibração 2 – base cal med		Calibração 4 – base cal med		Calibração 5	Calibração 6
Dado de base	Factor de multiplicação – parâmetro a alterar	Dado de base	Factor de multiplicação do parâmetro a alterar	calib. 2 + calib.4	calib. 3 + calib.4
Repelência	K_{sat}	Coberto protector total (%)	Capacidade de armazenamento		
0	2	10 - 20	1		
1	*	> 20 - 30	1.5		
2	*	> 30 - 40	1.5		
3	*	> 40 - 50	2.5		
4	*	> 50 - 60	2.5		
5	1/3	> 60 - 70	3		
6	1/4	> 70 - 80	*		
7	1/5	> 80 - 90	*		
8	1/6	> 90 - 100	*		

Tabela 16 – Caracterização da terceira calibração efectuada.

% Cinzas	Factor de multiplicação de K_{sat}				
	Classes de repelência = 0	Classes de repelência = 5	Classes de repelência = 6	Classes de repelência = 7	Classes de repelência = 8
25 – 35	3	2	1	1/2	1/3
35 – 45	3	2	1	1/2	1/3
45 – 55	3	2	1	1/2	1/3
55 – 65	3	2	1/2	1/2	1/3
65 – 75	2	1	1/2	1/3	¼
75 – 85	2	1	1/2	1/3	1/5
85 – 95	2	1	1/2	1/3	1/5

Os resultados das calibrações, ou seja, os respectivos índices de eficiência Nash-Sutcliffe, coeficientes de correlação bem como o erro (BIAS) apresentam-se na Tabela 17. Através da calibração, pode notar-se uma melhoria nos resultados do modelo ao nível das parcelas. Enquanto nas três situações de parametrização inicial o modelo estima a escorrência abaixo do valor observado, nas calibrações posteriores, à excepção da calibração 4, o modelo sobrestima a resposta hidrológica global. Todas as calibrações, excepto a calibração 4, conseguem representar bem a variação temporal ao nível da parcela. Através da calibração 4, é possível verificar que o modelo funciona melhor para a parcela F.RSE₂ que para a F.RSE₁ quando se tem por base apenas o coberto protector. Para a parcela RSE₁, todas as calibrações com excepção da 4 mostram bons resultados. Quando se tem em conta a calibração que tem por base o coberto (calibração 4) juntamente com aquelas que se baseiam na alteração de k_{sat} em função quer da repelência, quer da fracção de cinzas (Calibração 2 e 3), os resultados do modelo ao nível de ambas as parcelas revelam melhorias.

Tabela 17 – Resultados da calibração da escorrência.

		Calibração 1			Calibração 2	Calibração 3	Calibração 4	Calibração 5	Calibração 6
		Cal. Mediana	Cal. Máxima	Cal. Mínima	Cal. Mediana	Cal. Mediana	Cal. Mediana	Cal. Mediana	Cal. Mediana
Global	Erro (bias)	-0.18	-0.017	-0.66	0.20	0.18	-0.35	0.22	0.18
	Correlação – r	-0.49	-0.56	-0.49	0.17	-0.05	-0.42	-7.38E-03	0.069
	Nash–Sutcliffe	-1.65	-1.92	-0.53	-0.83	-1.57	-1.19	-0.99	-0.92
F.RSE1	Erro (bias)	-0.94	-0.87	-0.97	-0.48	-0.68	-0.96	-0.60	-0.67
	Correlação – r	-0.55	-0.49	-0.05	0.53	0.62	-0.27	0.68	0.67
	Nash–Sutcliffe	-0.059	-0.085	-0.20	0.50	0.66	-0.020	0.74	0.74
F.RSE2	Erro (bias)	2.74	3.26	0.50	2.79	3.47	1.95	3.30	3.47
	Correlação – r	0.39	0.07	0.31	0.50	0.41	0.36	0.50	0.53
	Nash–Sutcliffe	0.25	-0.046	0.14	-0.86	-0.76	0.22	0.12	-0.064

Tanto através do BIAS (Tabela 17) como da Figura 39, pode ver-se que o modelo continua a subestimar a resposta hidrológica na parcela F.RSE₁ e a sobrestimar na F.RSE₂, ou seja estima valores abaixo dos observados nas simulações de alta intensidade e acima dos observados nas simulações de extrema intensidade. No entanto, em termos globais o modelo passou a sobrestimar a escorrência, o que é preferível dado que se estuda o risco de erosão, devendo-se implementar medidas de controlo e mitigação para os piores cenários de modo a assegurar uma correcta e suficiente intervenção.

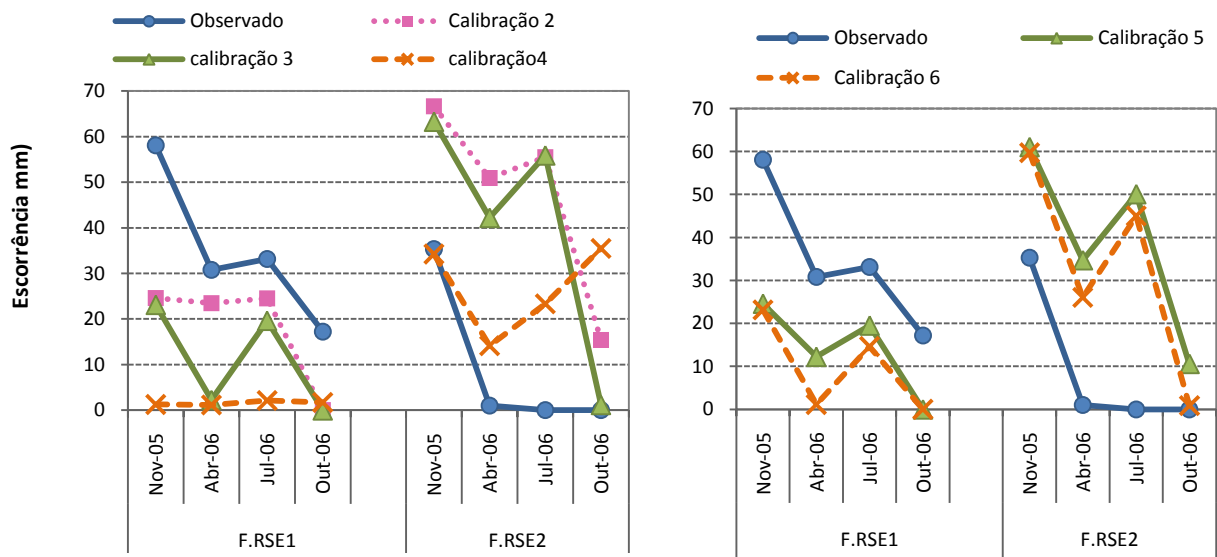


Figura 39 – Evolução temporal da escorrência (mm) observada e dos resultados do modelo nas várias calibrações.

Para a validação seleccionam-se a calibração 4, calibração 5 e calibração 6. Estas últimas são escolhidas por mostrarem melhores correlações globais e, principalmente em ambas as parcelas. A calibração 4, embora seja a que tem o pior resultado, é escolhida para se mostrar a resposta das parcelas de validação face à alteração da rugosidade em função do coberto do solo, já que este é referido como um dos parâmetros mais influentes nos processos de erosão.

E) Validação da escorrência

Na validação da escorrência, foram utilizados os quatros períodos de simulação para as parcelas que não se utilizaram na calibração (F.RSE3 e F.RSE4), localizadas na base da encosta. O modelo, em geral, fornece estimativas de escorrência superiores às observadas.

A calibração 4 mostra um erro (bias ou viés) menor e um Índice Nash-Sutcliffe superior relativamente à calibração 5 e 6, embora leve a uma pior correlação tanto global como ao nível das parcelas de validação. A calibração 4 mostra resultados melhores para

a parcela F.RSE₄, simulações de extrema intensidade. Para as parcelas de calibração, foi igualmente verificado que esta calibração é melhor par as simulações de extrema intensidade. Em termos globais, as calibrações 5 e 6 funcionam melhor para a parcela F.RSE₃, o que é possível verificar tanto pelo menor erro (bias), pela correlação e Índice de Nash-Sutcliffe superiores, como através da Figura 40, que mostra para esta parcela uma curva de evolução temporal dos resultados do modelo mais aproximada à evolução observada.

Tabela 18 - Resultados da validação da escorrência.

		Calibração 4	Calibração 5 = cal. 2 + cal.4	Calibração 6 = Cal. 3+ cal.4
		Cal. Mediana	Cal. Mediana	Cal. Mediana
Global	Erro (bias)	0.79	3.45	2.61
	Correlação – r	-0.53	-0.38	-0.23
	Nash–Sutcliffe	-1.75	-3.21	-2.58
F.RSE3	Erro (bias)	-0.69	0.33	0.083
	Correlação – r	-0.30	0.67	0.75
	Nash–Sutcliffe	-0.074	0.47	0.65
F.RSE4	Erro (bias)	25.27	55.25	44.58
	Correlação – r	0.33	0.53	0.47
	Nash–Sutcliffe	-2.26	-10.89	-61.82

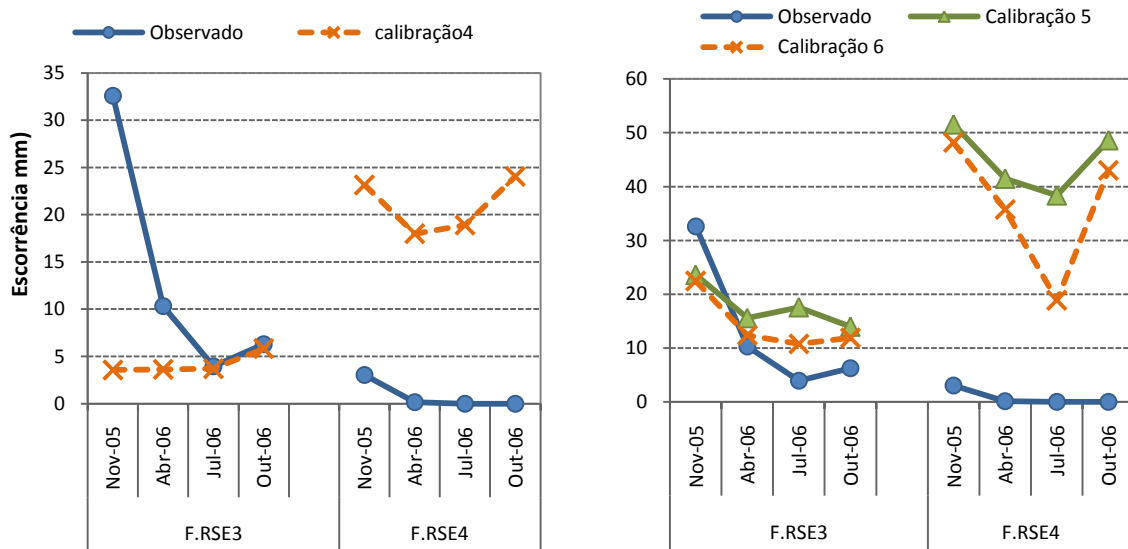


Figura 40 - Evolução temporal da escorrência (mm) observada e dos resultados da validação.

Verifica-se que tanto nas parcelas de calibração como de validação, o índice de Nash-Sutcliffe revela bons resultados para as parcelas F.RSE₁ e F.RSE₃ (simulações de alta intensidade) para as duas melhores calibrações (calibrações 5 e 6), enquanto nas parcelas F.RSE₂ e F.RSE₄ (simulações de extrema intensidade), o Nash-Sutcliffe mostra fracos resultados. Em geral, o modelo MEFIDIS subestima ou quase iguala o escoamento nas parcelas F.RSE₁ e F.RSE₃, enquanto o sobrestima nas parcelas F.RSE₂ e F.RSE₄. Importa referir o facto da análise textural efectuada não ter em conta a fracção e diâmetro de pedras existentes ao longo do perfil do solo, o que constitui uma limitação no procedimento tomado. A existência de uma possível heterogeneidade do solo, com elevada fracção de pedras no seu perfil textural nas parcelas de simulações de extrema intensidade pode induzir uma maior conservação da humidade em períodos de crescimento da vegetação (Poesen et al., 1999) e, conseqüentemente o solo restabelece mais lentamente a hidrofobia. Também a ocorrência de uma eventual ‘quebra’ da repelência do solo à água durante as simulações de extrema intensidade que não aconteça nas de intensidade menor, levando a maiores infiltrações, deve ser tida em conta.

As estimativas bastante elevadas do MEFIDIS para as simulações de extrema intensidade sugerem a provável existência de diferenças nas propriedades do solo entre os locais de

realização de simulações de chuva, em especial a presença de macroporos, nomeadamente por baixo da parcela. O modelo MEFIDIS tem problemas na metodologia de simulação da infiltração, nomeadamente a ausência de infiltração lateral, que poderá ter mais influência na precipitação de intensidade extrema, levando a maiores discrepâncias nos resultados do modelo face à escorrência observada nestas simulações. É importante uma investigação detalhada acerca das diferenças encontradas entre a escorrência observada e modelada nas simulações de extrema intensidade.

F) Calibração da erosão

Embora não tenha sido efectuada uma calibração directa da erosão pelo ajuste de parâmetros que influenciam directamente a resposta erosiva, como o diâmetro das partículas ou a força de desagregação ou mesmo a fracção de argila, a calibração da escorrência efectuada levou a alterações na resposta erosiva fornecida pelo modelo, apresentando até melhores correlações globais que as obtidas na modelação da escorrência (calibração 5 e 6); ver Tabela 19. O erro do modelo, o índice de Nash-Sutcliffe e o coeficiente de correlação como indicadores da execução do modelo apresentam-se na Tabela 19.

Em geral, o modelo sobrestima as perdas de sedimentos observadas, existindo apenas uma situação em que o modelo fornece uma estimativa inferior àquela que foi medida (calibração 4, na parcela F.RSE₁ a partir de Abril, ver Figura 41). No entanto, é a calibração 4 na parcela F.RSE₁ que apresenta os melhores resultados por parcela. A calibração 6 é a que mostra melhores resultados globais (Correlação global de 0.55), uma vez que mostra a melhor correlação global e o maior valor de Índice Nash-Sutcliffe, embora este último seja ainda negativo e o erro (bias) seja superior em relação à calibração 4 e 5.

Tabela 19 – Resultados da calibração da erosão.

		Calibração 1			Calibração 2	Calibração 3	Calibração 4	Calibração 5	Calibração 6
		Cal. Mediana	Cal. Máxima	Cal. Mínima	Cal. Mediana	Cal. Mediana	Cal. Mediana	Cal. Mediana	Cal. Mediana
Global	Erro (bias)	16.31	88.23	3.07	17.34	12.60	1.90	2.27	12.60
	Correlação – r	-0.34	-0.48	-0.19	-0.27	-0.05	-4.55E-09	0.36	0.55
	Nash–Sutcliffe	-256.98	-7898.26	-35.35	-171.37	-153.67	-12.27	-5.56	-3.69
F.RSE1	Erro (bias)	0.12	10.77	2.43	2.18	1.09	-0.76	0.18	1.09
	Correlação – r	-0.59	-0.71	*	0.13	0.56	0.75	0.74	0.74
	Nash–Sutcliffe	-0.88	-14.76	-65.43	-6.58	-1.13	0.54	-0.95	-0.87
F.RSE2	Erro (bias)	72.37	356.48	5.29	69.85	52.42	11.14	9.50	52.42
	Correlação – r	0.17	-0.41	0.73	0.61	0.58	0.19	0.46	0.64
	Nash–Sutcliffe	-238.47	-17576	0.75	-68.34	-272.49	-24.06	-9.85	-9.52

*Não existe desvio padrão da erosão no modelo: valor sempre nulo.

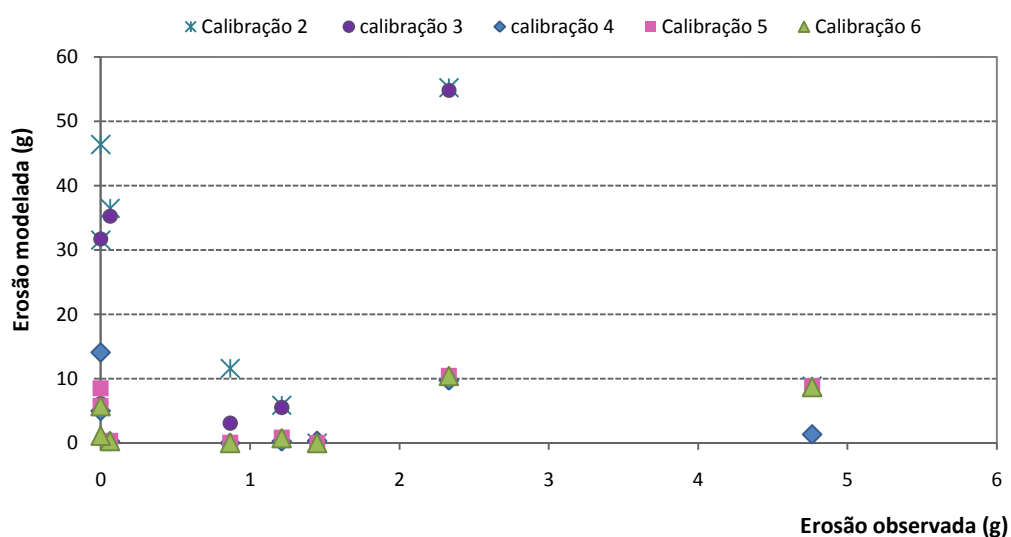


Figura 41 – Relação entre a erosão modelada e observada (g) para as parcelas seleccionadas para calibração (F.RSE₁ e F.RSE₂).

A Figura 41 mostra a evolução temporal da resposta erosiva observada e modelada nas três melhores calibrações. As curvas de evolução do modelo aproximam-se da que foi observada na F.RSE₁. Já para a parcela F.RSE₂ o modelo não representa a variação temporal ocorrida.

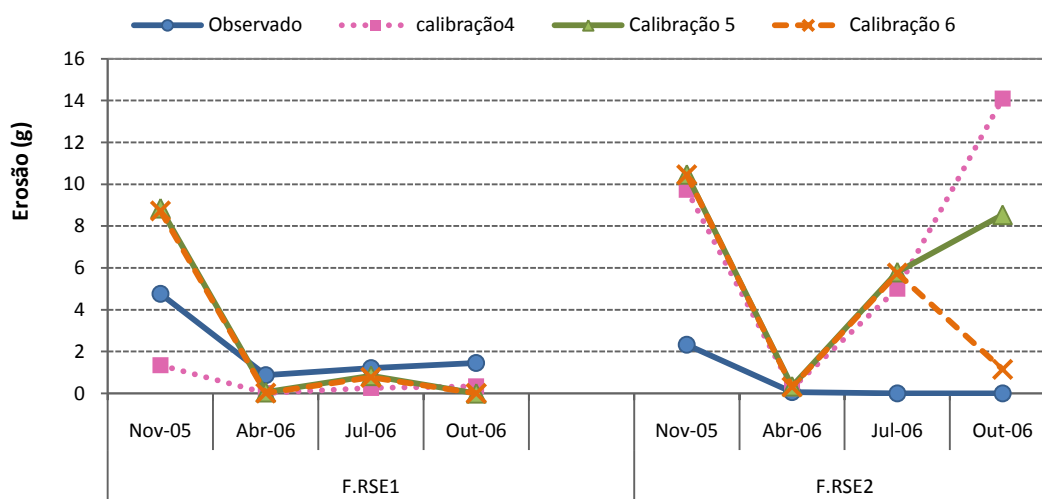


Figura 42 - Evolução temporal da erosão (g) observada e dos resultados do modelo em várias calibrações.

G) Validação da erosão

Os resultados da validação da erosão, para as parcelas F.RSE₃ e F.RSE₄ revelam muito bons resultados para as simulações de alta intensidade (parcela F.RSE₃), principalmente nas simulações que têm em conta o coberto do solo juntamente com a fracção de cinzas e/ou repelência, com índice Nash-Sutcliffe muito próximos da unidade. Já nas simulações de precipitação extrema, a correlação dos dados simulados com os dados medidos é boa (Correlação de 0.75), no entanto o índice de eficiência é negativo, indicando uma fraca execução do modelo para esta parcela.

A Figura 43 mostra a evolução temporal dos resultados de erosão observados e modelados, verificando-se que o modelo se ajusta bastante bem aos dados observados na parcela F.RSE₃. Para a parcela F.RSE₄, o modelo representa bem a perda de sedimentos observada a partir do mês de Abril, inclusive. No entanto, na parcela F.RSE₄, o modelo

sobrestima bastante a erosão observada em Novembro, o que leva a um Índice Nash-Sutcliffe bastante baixo para esta parcela e fraco em termos globais.

Tabela 20 - Resultados da validação da erosão.

		Calibração 4	Calibração 5	Calibração 6
		Cal. Mediana	Cal. Mediana	Cal. Mediana
Global	Erro (bias)	0.040	0.65	0.59
	Correlação – r	0.28	0.57	0.57
	Nash–Sutcliffe	-0.50	-0.15	-0.15
F.RSE3	Erro (bias)	-0.74	-0.22	-0.25
	Correlação – r	0.74	0.74	0.74
	Nash–Sutcliffe	0.47	0.97	0.97
F.RSE4	Erro (bias)	3.19	4.16	3.92
	Correlação – r	0.75	0.75	0.75
	Nash–Sutcliffe	-6.50	-9.46	-9.80

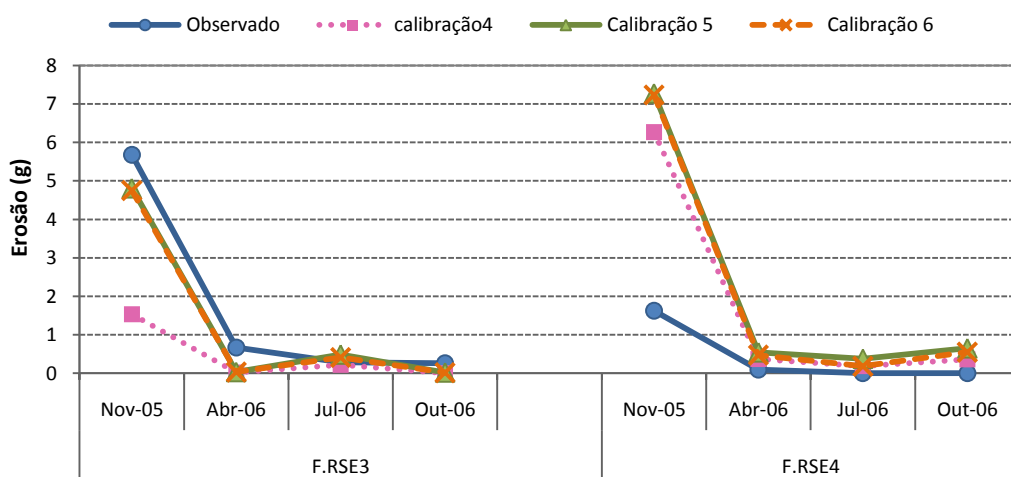


Figura 43 - Evolução temporal da erosão (g) observada e dos resultados da validação.

Tal como acontece na resposta hidrológica, a execução do modelo na determinação da erosão revela-se boa ou bastante boa nas simulações de alta intensidade e fraca nas simulações de intensidade superior. A discussão face à execução do modelo quanto à erosão assenta nos mesmos fundamentos que os descritos em relação à hidrologia (ponto E).

Ao longo do presente trabalho, constatou-se que a variabilidade entre as parcelas de simulação é evidente, pelo que se torna difícil estimar um conjunto de parâmetros em comum de modo a ser possível calibrar o modelo. É certo que inúmeros factores têm bastante impacto nas respostas hidrológicas e de erosão encontradas, onde se inclui como principais a repelência e o coberto do solo. No entanto, verificou-se que mais que qualquer condicionante dos processos hidrológicos e de erosão isolada, será a interacção de todas que determina os resultados observados. A calibração do modelo efectuada revela isso mesmo, uma vez que quer considerando o conjunto de parcelas de calibração (topo da encosta), que de validação (base da encosta), são as calibrações em que se tem em conta a fracção de coberto protector juntamente com a repelência ou repelência/cinzas que mostram melhores resultados (melhor correlação e melhor Nash-Sutcliffe), tanto em termos de escorrência como de perda de sedimentos. Deste modo, o coberto protector do solo, bem como a fracção de cinzas a par com a repelência do solo à água têm um efeito preponderante nos processos hidrológicos e de erosão.

De modo a complementar os resultados obtidos com outros estudos efectuados no mesmo âmbito, refere-se que Nunes et al. (2005) encontraram dificuldades semelhantes na avaliação do modelo em bacias hidrográficas na Bélgica, onde referem que um dos principais obstáculos em estimar um conjunto de parâmetros comuns foi a significativa variação sazonal na vegetação, que tem consequências na rugosidade superficial. Prats (2007), ao aplicar o modelo MEFIDIS para modelar a erosão na área de Açores, demonstrou que calibrar o modelo com base nos dados de repelência melhorava a execução do modelo para essa área.

6. Conclusões

Este estudo aborda a problemática de erosão a micro-escala, fenómeno que pode ser acelerado após incêndios florestais. Em Portugal, este problema ganhou impacto desde os extensos incêndios ocorridos em 2003, pelo que desde aí o projecto EROSFIRE tem prestado um importante contributo a este nível. A partir deste estudo foi possível chegar a algumas conclusões:

- Simulações de chuva

As Simulações de Chuva são um método de medição de erosão que representa a elevada variabilidade espacial e temporal associada às áreas florestais ardidadas e aos fenómenos hidrológicos e de erosão, respectivamente. Evitam a grande incerteza que as condições meteorológicas impõem às parcelas de erosão.

Verifica-se a ocorrência de perdas de sedimentos notavelmente inferiores nas simulações de extrema intensidade relativamente às de intensidade inferior, muito provavelmente devido a características distintas entre as parcelas que, dada a reduzida escala não representam toda a encosta, onde a variabilidade espacial é notória; observa-se, em experiências pontuais ocorridos em Setembro e Novembro – 2005 nas parcelas de simulações de extrema intensidade, perdas de sedimentos bastante elevadas face aos restantes períodos, não se considerando significativo em termos estatísticos.

Em termos de variabilidade temporal, nitidamente verificada, pensa-se que a realização de um maior número de simulações, dando uma maior indicação da variação temporal poderá ser uma mais - valia ao nível do estudo do risco de erosão.

- Micro-parcelas sob Chuva Natural

O método de Micro-parcelas sob Chuva natural apresenta respostas menos variáveis que as Simulações de Chuva, no entanto também é nítido o efeito da

variabilidade temporal associada ao efeito da precipitação e, conseqüentemente da repelência à água. Verifica-se que a quantidade total de precipitação natural aparece como o factor mais determinante nos resultados obtidos através do efeito da chuva natural. Observa-se o efeito da repelência do solo à água, que tem efeitos na diminuição da infiltração da água, principalmente no primeiro período após o incêndio voltando a surgir após o Verão de 2006 devido às condições secas. A repelência tem influência no aumento das taxas de escorrência após períodos secos e um decréscimo em condições de humidade. Em ambos os métodos este efeito foi revelado, de forma mais ou menos nítida

- Representatividade das simulações de chuva a fenómenos de erosão devido a eventos naturais, a micro-escala

A escorrência devida a eventos naturais mostra uma resposta hidrológica aproximada à ocorrida nas simulações de extrema intensidade, no entanto as simulações de intensidade menor, efectuadas na área de estudo, revelam uma resposta hidrológica cerca de 7 vezes superior, devendo-se, provavelmente às intensidades elevadas nas simulações de chuva comparativamente à de eventos naturais. A chuva natural leva a aproximadamente 3 vezes mais perdas relativamente às simulações de extrema intensidade e cerca de 3 vezes menor que as de alta intensidade, ou seja apresentam uma resposta intermédia entre as duas intensidades de simulação. A chuva simulada (com 2 m de altura) apresenta baixa energia cinética em relação à chuva natural da mesma intensidade, o que condiciona a capacidade de arraste e denudação do solo pela chuva. A medição da energia cinética associada à precipitação simulada revela-se como um conhecimento importante a adquirir no controlo destes processos.

Existe a probabilidade das taxas de erosão devida a chuva simulada serem representativas das perdas devidas a eventos naturais, a micro-escala, dado que os registos superiores ocorridos nas simulações de alta intensidade são pontuais, ocorrendo com uma frequência de 66.7 % a 91.3% dados de erosão entre 0 a 100 mg/m².mm de

precipitação, ou seja quer nas simulações de chuva quer nas parcelas de chuva natural, são mais frequentes registos de erosão semelhantes.

- Modelação com MEFIDIS

Tem havido grandes esforços no estudo da modelação da erosão. O MEFIDIS é um modelo de base física que determina as respostas em termos de escoência e erosão. O MEFIDIS mostra-se bastante sensível a parâmetros como a taxa de infiltração e a capacidade de retenção superficial, bem como à humidade do solo e pressão capilar. Estes são factores determinantes nos processos hidrológicos e erosivos. Quanto à erosão, além da própria escoência, a força de desagregação e a fracção de argila são parâmetros bastante influentes.

O modelo subestima a escoência medida nas simulações de alta intensidade e fornece uma estimativa superior à escoência observada em simulações de intensidade extrema, apresentando resultados iniciais fracos (Índices de eficiência negativos), apenas mostrando bons resultados iniciais no cenário que minimiza a escoência e a erosão produzidas face aos três cenários considerados na parametrização inicial. Tornou-se necessário um ajuste dos parâmetros de entrada mais influentes nos processos hidrológicos.

Os resultados do MEFIDIS, ao nível da escoência e principalmente da erosão, melhoram substancialmente quando se ajusta k_{sat} em função da repelência do solo à água e em função da fracção de cinzas e quando se ajusta a capacidade de armazenamento em função do coberto protector, ao nível de parcela. No entanto, os resultados revelam-se melhores quando se tem em conta a repelência ou cinzas e repelência juntamente com o coberto protector, revelando que a interacção conjunta destes factores tem um importante papel na escoência e erosão observadas nas simulações de chuva em estudo. Ao nível global, não se verificou uma boa execução do modelo, o que denota uma representação espacial limitada do modelo. No entanto, os resultados relativos às parcelas de simulação de alta intensidade revelam bons resultados, o que revela uma boa execução temporal do modelo nestas simulações. Para as de extrema intensidade, o

modelo sobrestima bastante os dados observados. As condicionantes consideradas como possíveis justificações para a ocorrência desta discrepância:

- A possível ‘quebra’ da repelência nas simulações de extrema intensidade que não aconteça nas de menor intensidade, limitando a infiltração;
- Provável existência de diferenças nas propriedades do solo entre locais de realização de simulações de chuva, em especial a presença de macroporos, nomeadamente por baixo da parcela;
- Problemas do MEFIDIS na metodologia de simulação da infiltração, nomeadamente a ausência de infiltração lateral, que pode ter mais influência na precipitação de intensidade extrema.

Torna-se importante uma investigação detalhada acerca das diferenças encontradas entre a escorrência observada e estimada pelo modelo nas simulações de extrema intensidade.

Referências

Angima, S.D., Scott, D.E., O'Neill, M.K., Ong, C.K., Weesies, G.A. (2003). Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 97: 295–308.

Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente. <http://www.iambiente.pt> (Consultado em Dezembro-2009)

Beldring, S., Engeland, K., Roald, L.A., Saelthun, N.R., Voksø, A. (2003). *Estimation of parameters in a distributed precipitation-runoff model for Norway*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7 (3), 304-316.

Cerdá, A., Doerr, S.H. (2008). *The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period*. *Catena* 74. 256–263.

Cerdá, A., Ibañes, S., Calvo, A. (1997). *Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain*. *Soil Technology* 11. 163-170. Elsevier Science.

Cremers, N.H.D.T., Dijk, P.M.V., De Roo, A.P.J., Verzandvoort, M.A. (1996). *Spatial and temporal variability of soil surface roughness and the application in hydrological and soil erosion modeling*. *Hydrological Processes*, VOL. 10, 1035-1047.

Doerr, S.H., Shakesby, R.A, Walsh, R.P.D (2000). *Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance*. *Earth-science Reviews* 51, 33-65

Guerra, A. J. T., Botelho, R.G.M. (1996). *Características e propriedades dos solos relevantes para os estudos pedológicos e análise dos processos erosivos*. *Anuário do Instituto de Geociências – V.19*

Harmon, R. S., Doe III, W. W. (2001). *Landscape erosion and evolution modeling*. Kluwer Academic/ Plenum Publishers. Colorado State University, U.S. Army Research Laboratory, New York.

Hernandez, M., Miller, S.N., Goodrich, D.C., Goff, B.F., Kepner, W.G., Edmonds, C.M., Jones, K.B. (2000). *Modelling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds*. Environmental Monitoring and Assessment 64: 285–298. Kluwer Academic Publishers.

Hoyningen-Huene, J.v. (1983). *Die Interzeption des Niederschlages in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen*. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin. DVWK-Schrift, Nr. 57

Kamphorst, EC., Jetten, V., Guérif, J., Pitkanen, J., Iversen, BV., Douglas, JT., Paz, A. (2000). *Predicting depression storage from soil surface roughness*. Soil Sci. Soc. Am. J. 64 (5): 1749-1758.

Keizer, J.J., Coelho, C.O.A., Shakesby, R.A., Domingues, C.S.P., Malvar, M.C., Perez, I.M.B., Matias, M.J.S., Ferreira, A.J.D. (2005). The role of soil water repellency in overland flow generation in pine and eucalypt forest stands in coastal Portugal. Australian Journal of Soil Research, 43, 337-349. Csiro Publishing.

Keizer, J.J., Doerr, S.H., Malvar, M.C., Prats, S.A., Ferreira, R.S.V., Oñate, M.G., Coelho, C.O.A., Ferreira, A.J.D. (2008). Temporal variation in topsoil water repellency in two recently burnt eucalypt stands in north-central Portugal. Catena 74: 192-204.

Malvar, M.C. (2007). Resposta hidrológica e de erosão do solo em eucaliptais recentemente ardidos, e a sua modelação com MEFIDIS. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra.



Mendes, C.A.R. (2006). Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no Município do Bom Jardim – RJ. Tese de Doutoramento, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

Morgan, R.P.C., Quinton, J.N. (2001). Erosion Modeling. In: Harmon RS, Doe WW (Eds.), Landscape Erosion and Evolution Modeling. Kluwer Academic/Plenum Publishers. New York: 117-144.

Motovilov, Y.G., Gottschalk L., Engeland, K., Rodhe, A. (1999). *Validation of a distributed hydrological model against spatial observations*. Agricultural and Forest Meteorology 98-99: 257-277.

Nearing, M.A., Ascough, L.D., Laflen, J.M. (1990). Sensitivity analysis of of the WEPP Hillslope Profile Erosion model. American Society of Agricultural Engineers. Vol. 33, nº 3, pp. 839-849, 1990.

Nunes, J.P. (2007). *Vulnerability of Mediterranean Watersheds to climate change: the desertification context*. Dissertação de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Ministério Português da Agricultura.

Nunes, J.P., Benali, A.A. (2009). MEFIDIS Single Cell Version – User’s Manual. Versão 1.0.

Nunes, J.P., Vieira, G.N., Gonçalo Nuno, Seixas, J., Gonçalves, P., Carvalhais, N. (2005). *Evaluating the MEFIDIS model for runoff and soil erosion prediction during rainfall events*. Catena-00920;19.

Nunes, J.P., Lima, J.L.M.P. de, Singh, V.P., Lima, M.I.P. de., Vieira, G.N. (2006). Numerical modeling of surface runoff and erosion due to moving rainstorms at the drainage basin scale. Journal of Hydrology, VOL. 330, 709-720.

Pereira J., Carreira J., Silva J. & Vasconcelos M., 2005. Alguns conceitos básicos sobre os fogos rurais em Portugal. In: Pereira J.S., Pereira J.M.C. et al. (eds.), *Incêndios florestais em Portugal – caracterização, impactes e prevenção*, pg 133-16, ISAPress, Lisbon.

Pierson, F.B., Robichaud, P.R., Spaeth, K.E. (2001). Spatial and temporal effects of wildfire on the hydrology of a steep rangeland watershed. *Hydrological Processes*. 15, 2905-2916.

Poesen, J., De Luna, E., Franca, A., Nachtergaele, J., Govers, G. (1999). Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. *Catena* 36. 315–329.

Prats, S. A. (2007). Simulações de chuva para a medição e modelação da erosão do solo em áreas florestais recentemente ardidas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra.

Rawls Wj, Brakensiek DI, Miller N, 1983. Green-Ampt Infiltration Parameters From Soils Data. *Journal Of Hydraulic Engineering-Asce* 109 (1): 62-70 1983

Saxton KE, Rawls WJ, Romberger JS, Papendick RL, 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci Soc Am J* 50 (4): 1031-1036.

Schwarz, R. A., Cogo, N.P., Levien., R. (2003). Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:743-753.

Shakesby, R.A., Doerr, S.H. (2006). *Wildfire as a hydrological and geomorphological agent*. *Earth-Science Reviews* 74: 269-307.



Skaggs, T.H., Arya, L.M., Shouse, P.J., and Mohanty, B.P. (2001). '*Estimating Particle-Size Distribution from Limited Soil Texture Data*'. Soil Sci. Soc. Am. J. 65: 1038-1044.

Spruill, C. A., Workman, S.R., Taraba, J.L. (2000). Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. American Society of Agricultural Engineers . VOL. 43(6): 1431-1439.

USDA – United States Department of Agriculture. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds. Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division, Technical Release 55

Varela, M. E., Benito, E., Blas, E. (2005). *Impact of wildfires on surface water repellency in soils of northwest Spain*. Hydrological Processes. 19, 3649 – 3657.

Varela, M. E.(2007). *Efectos de los incendios forestales en la degradacion física de los suelos de Galicia*. Tese de Doutoramento. Universidad de Vigo. Departamento de Biología Vegetal y Ciencia del Suelo Facultad de Biología. <http://www.cesam.ua.pt/>

Vieira, Diana C. (2008). Cartografia de risco de erosão, à escala de encosta, numa área recentemente ardida na região Centro. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro. <http://biblioteca.sinbad.ua.pt/>