

Simulações de chuva para a medição e modelação da erosão do solo em áreas florestais recentemente ardidas.



Sérgio Prats Alegre

Julho 2007

Tese de Mestrado para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente pela Universidade de Coimbra.

Simulações de chuva para a medição e modelação da erosão do solo em áreas florestais recentemente ardidadas.

Tese de Mestrado de

Sérgio Prats Alegre

Apresentada na

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Para a obtenção do Grau de Mestre no

Curso de Mestrado em Engenharia do Ambiente

Promoção 2005-2007

Contacto: sergio.alegre@ua.pt

Orientação:

Dr. Jan Jacob Keizer

Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Domingos Xavier Viegas

Universidade de Coimbra

Resumo

Os incêndios florestais podem provocar um notável aumento das taxas de erosão. Os solos de áreas ardidas são mais susceptíveis a erosão devido a redução substancial do coberto do solo, por um lado, e, por outro, a alterações nas características físicas e químicas do próprio solo, como por exemplo a sua porosidade e repelência à água. O projecto EROSFIRE (POCTI/AGR/60354/2004), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e co-financiado pelo FEDER, tem como principal objectivo o desenvolvimento de uma ferramenta que permite avaliar o risco de erosão do solo após um incêndio e poderá contribuir para uma gestão sustentável de áreas recentemente ardidas. Enquanto o modelo USLE é considerado o “model-to-beat”, por ter sido utilizado pelo INAG para o mapa de perdas de solos de 2003, o projecto aposta sobretudo em modelos mais modernos, baseados em processos físicos. Em particular o modelo MEFIDIS será aplicado para os três conjuntos de dados que estão a ser recolhidos no âmbito do EROSFIRE. Estes três conjuntos envolvem simulações de chuva à escala de micro-parcela (0,28m²), parcelas de erosão com a mesma dimensão que as das simulações de chuva e parcelas de erosão a escala de encosta. É de realçar que simulações de chuva constituem a principal técnica utilizada pelo EROSFIRE para a medição da escorrência e erosão, nomeadamente porque evita a grande incerteza que as condições meteorológicas impõem às parcelas de erosão. O presente trabalho tem como objectivo principal analisar e modelar, para dois eucaliptais, a produção de escorrência superficial e as perdas de sedimentos em várias campanhas de simulações de chuva durante o primeiro ano após um incêndio.

A área de estudo está no concelho de Albergaria-a-Velha e foi atingida por um incêndio florestal no início de Julho de 2005. Seleccionaram-se como locais de estudo duas encostas; ambas plantadas com *Eucalyptus globulus* mas distintas no que diz respeito às práticas florestais anteriores ao incêndio. Uma encosta não foi lavrada e na outra foi seguindo as linhas de máxima pendente. Entre Setembro de 2005 e Julho de 2006, quatro campanhas de simulações de chuva foram efectuadas nas duas encostas, resultando em um conjunto de 34 simulações. A primeira campanha, em Setembro 2005, envolveu parcelas que foram amostradas e portanto perturbados após as respectivas experiências, enquanto as outras três campanhas envolveram sempre as mesmas parcelas (referidas a seguir como “parcelas fixas”). Excepto em alguns casos de avarias, cada campanha compreendeu quatro simulações de chuva em cada encosta, efectuadas em dois pares de parcelas localizados na parte superior e inferior da encosta. Cada par de simulações foi efectuado em simultâneo, uma das quais com uma intensidade elevada e a outra com uma intensidade extrema durante uma hora. Durante cada simulação mediu-se a quantidade de escorrência cada minuto, e recolheu-se, sempre que possível, cinco amostras de escorrência para determinar, no laboratório, as concentrações de sedimentos e matéria orgânica. Os simuladores de chuva são réplicas do desenhado por Cerdà *et al.* (1997) e foram calibrados no laboratório em várias ocasiões, assim que as intensidades elevadas e extremas variavam a volta de 40-45 e 80-85 mm/h, respectivamente. Cada par de simulações envolveu ainda a amostragem, numa terceira parcela, das condições iniciais no que diz respeito às variáveis consideradas mais relevantes para a modelação da resposta hidrológica e de erosão como, por exemplo, a profundidade do solo, a sua humidade (sensor “Theta”) e repelência à água (teste de etanol).

A produção de escorrência é sobretudo muito significativa durante as duas primeiras campanhas de simulações de chuva, em Setembro (77% de média) e Novembro de 2005. Há uma clara sugestão da importância da intensidade de chuva artificial nas taxas de erosão, mas os valores médios (14.4 g/m²) são baixos em comparação com estudos anteriores em Portugal.

Sobretudo no que diz respeito à escorrência, conseguem-se bons resultados com MEFIDIS. No entanto, as simulações realizadas sob condições hidrófobas requerem que o efeito da repelência do solo à água seja “emulado”, tendo sido preciso calibrar o modelo para dois parâmetros de carácter hidráulico (conductividade hidráulica e potencial de sucção do solo) e mais um de carácter erosivo (resistência do solo ou “soil shear strenght”).

Abstract

The forest fires can provoke a notable increase of the erosion taxes. The soils of burning areas are prone to erosion due to a substantial reduction of the covered of the soil, on one side, and, for other, to alterations in the physical and chemical characteristics of the soil, for example the porosity and repellence. The EROSFIRE project (POCTI/AGR/60354/2004), financed by the Foundation for the Science and the Technology (FCT) and co-financed by FEDER, has as main objective the development of a tool that allows to evaluate the risk of erosion of the soil after a fire and it can contribute to a maintainable administration of areas recently burning. While the USLE model is considered like the "model-to-beat", for it being used by INAG for the map soil "Losses after forest fires of the Summer of 2003", the project it bets in more modern models, based on physical processes. MEFIDIS will be applied for the three groups of data that are to be collected in EROSFIRE. These three groups involve rainfall simulations at the micro-plot scale (0,28m²), erosion plots with the same dimension that rse's and open plots at slope scale. Rainfall simulations experiences constitute the main technique used by EROSFIRE for runoff and erosion measurements, namely because it avoids the great uncertainty that the meteorological conditions impose to the erosion portions. The present work has as main objective to analyze and model, for two eucalypts sites, the runoff and sediment production in several campaigns of rainfall simulations during the first year after the fire.

The study area is in the Albergaria-a-Velha municipality and it was reached by a forest fire in the beginning of July of 2005. Two slopes planted with Eucalyptus globulus were selected like study area, one slope was not ploughed and the other one has vertical ploughing. Between September of 2005 and July of 2006, four rainfall simulations campaigns were carried out in the two places, resulting in a group of 34 simulations. The first campaign, in September 2005, involved plot sampling, while the other three campaigns always involved the same plots, without sampling (referred as "fixed plots"). Except mechanical problems, eight rse's were carried out (four by site); in each slope in two pairs of plots located in the superior and inferior part of each site. Each pair of simulations was effectuated in simultaneous, one with high rainfall intensity and the other with an extreme intensity during one hour. During each simulation the amount of runoff every minute was measured, and whenever possible, five runoff samples were taken to determine in the laboratory, the sediments yield and organic matter. The rainfall simulators are similar to the drawn by Cerdà et al. (1997) and were calibrated at the laboratory in several occasions. The high and extreme intensities varied between 40-45 and 80-85 mm/h, respectively. Each pair of rainfall simulations still involved the sampling, in a third plot (control), of the initial conditions such soil depth, moisture (sensor "Theta") and repellence (Ethanol test), considered more relevant variables in what concerns to hydrologic and erosion answer of the model.

The runoff production is above all very significant during the first two campaigns of rse's, in September (77% mean) and November of 2005. There is a clear suggestion of the importance of the intensity of artificial rain in the erosion taxes, but the mean values (14.4 g/m²) are low in comparison with previous studies in Portugal.

Runoff modelling was reasonably good with MEFIDIS. However, the simulation campaigns carried out under soil water repellent conditions request that the effect of repellence must be "emulated", having been needed to calibrate the model for two hydraulic parameters (hydraulic conductivity and capillarity pressure) and one more with erosive character (soil shear strenght).

Agradecimentos

Esta tese contribui para o estudo da hidrologia e erosão do solo após os incêndios florestais mediante simulações de chuva na região Centro de Portugal. Para conhecer e modelar a erosão do solo à escala das pequenas parcelas dois projectos foram levados a cabo: enquanto que eu aprofundi na caracterização hidrológica e erosiva com chuva artificial, Maruxa Malvar estudou e modelou o efeito da chuva natural à mesma escala.

Houve muitas pessoas a quem quero agradecer a ajuda prestada para a realização de este trabalho. Aleatoriamente agradeço profundamente a:

Dr. Jan Jakob Keizer, pelas conversas, as revisões, e orientação do trabalho, sem ele este trabalho teria sido incomedurável...

Prof. Dr. Xavier Domingos Viegas, pelo seu inestimável apoio e supervisão do processo,

Dr. João Nunes, criador de “o bicho” MEFIDIS, por aqueles complicados work shops iniciais, e toda a bibliografia e ajuda prestada com a parametrização,

Prof. Dr. Virgínia Pereira pelo trabalho com os perfis do solo,

Prof. Celeste O.A. Coelho e Anne Karine Boulet, por me saber compreender e apoiar na realização de este trabalho com sábios conselhos,

Mart Houmann e Mart. Lagewaard, desde o primeiro dia em que chagaram, pelo seu grande esforço e boa disposição nas primeiras e mais complicadas simulações de chuva,

Ángela Garcia-Monje e David Herrera (*Erdeivi*) pelo seu inestimável trabalho no laboratório de Aveiro,

Jorge Lucena, por me ter aceitado no seu lar e por todos os pôr-do-sol que partilhamos na Casa do Bisbo,

Marta Oñate, compatriota vinda desde lá fora para ajudar e pensar sempre de forma inteligente,

Aos meus colegas do DAO: Raquel Ferreira por ser uma grande colega de campo, laboratório, oficina e escritório, Pedro Cascão por ter paciência e ajudar-me a resolver montes de problemas, tanto electrónicos como alimentários, ao Flávio Silva pelas suas correções linguísticas e disposição, Elena Palacios pelo entusiasmo e bom humor.

A uma grande turma na qual sempre alguém me falta, a equipa EROSFIRE: Estefânia e Isabel, pelo trabalho de campo e o ânimo, o Leonardo e a Paula por mostrar as plantas dos incêndios, ao David, Amadou, Pieter e Sara, por esse verão de simulações, Cristina, Ana, Josh, Josh, Wouter, Mika, Ilse, Maria,...

Aos presentes Prats Alegre Pili, Sérgio, Javier e Carlos, assim como todos aqueles que ainda estão por chegar.

RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	7
AGRADECIMENTOS.....	9
INDICE.....	11
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE FIGURA S.....	14
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objectivos.....	21
2 ÁREA DE ESTUDO.....	23
2.1 Localização.....	23
2.2 Clima.....	24
2.3 Geologia e solos.....	25
2.4 Vegetação e uso do solo.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 Simulações de chuva.....	29
3.1.1 O simulador.....	29
3.1.2 Calibrações.....	30
3.1.3 Localização e instalação das parcelas.....	30
3.1.4 Descrição dos transeptos e das parcelas.....	32
3.2 Análise laboratorial.....	34
3.2.1 Amostras de Solo.....	34
3.2.2 Amostras de Escorrência.....	35
3.3 Os modelos de Erosão.....	35
3.3.1 O modelo MEFIDIS.....	36
3.3.2 Dados de entrada.....	39
3.3.3 Estratégia de calibração -validação.....	41
4 RESULTADOS.....	43
4.1 Descrição dos locais e parcelas de estudo.....	43
4.1.1 Características dos povoamentos ardidos e intensidade do incêndio.....	43
4.1.2 Perfis e Textura do solo.....	43
4.1.3 Erodibilidade do solo.....	45
4.1.4 Microtopografia.....	46
4.1.5 Repelência e humidade inicial.....	47
4.1.6 Coberto do solo.....	49
4.1.7 Condições climatéricas antecedentes.....	50
4.2 Precipitação e Escorrência.....	51
4.2.1 Precipitação simulada.....	51
4.2.2 Variação com a Intensidade da chuva.....	54
4.2.3 Variação espacial.....	55
4.2.4 Variação temporal.....	57
4.2.5 Análise de Hidrogramas.....	62
4.2.6 Infiltração e índice de repelência à água.....	66
4.3 Erosão.....	68
4.3.1 Variação segundo a intensidade da chuva.....	68
4.3.2 Variação segundo a localização.....	68
4.3.3 Evolução temporal.....	70
4.3.4 Concentração de sedimentos.....	72
4.4 Aplicação do modelo MEFIDIS.....	74
4.4.1 Parametização inicial.....	74
4.4.2 Calibração da escorrência.....	77
4.4.3 Validação da escorrência.....	78
4.4.4 Calibração da erosão.....	79
4.4.5 Validação da erosão.....	81

5	CONCLUSÕES.....	83
	REFERÊNCIAS	85
	Anexo 1: Dados climáticos.....	90
	Anexo 2: Fotografias das parcelas e encostas.	92
	Anexo 3: Gráficos.	98
	Anexo 5: Hidrogramas.	100
	Anexo 4: Correlações.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1. Efeito do fogo segundo a temperatura. De Dmitrakopulos modificada por Úbeda; tirada de Velez (2005).....	19
Tabela 2-1. Coordenadas UTM, elevação e exposição das encostas estudadas.....	23
Tabela 2-2. Características gerais das parcelas monitorizadas.....	24
Tabela 3-1. Diâmetro e classes granulométricas mais importantes.	34
Tabela-3-2. Parâmetros de entrada no modelo, dados originais medidos e cálculos de conversão (PTF's em cinzento).	40
Tabela 3-3. Variáveis de saída do modelo.	42
Tabela 4-1. Características dos povoamentos e indicadores da intensidade do incêndio. DBH valor mediano duma amostra de 10 arvores por secção; $n=90$	43
Tabela 4-2. Textura e matéria orgânica do solo (Lucena J., 2006), segundo Attenberg e ISSS ($n=17$).	44
Tabela 4-3. Data, local e humidade inicial (% volume) das simulações que aconteceram antes do evento chuvoso, data e pluviometria do evento que podiam comprometer a comparabilidade entre simulações e data, local e humidade inicial das simulações que aconteceram depois do evento.....	51
Tabela 4-4. Dados de escorrência por períodos.	61
Tabela 4-5. Valores de saturação do solo em volume para as áreas de estudo (Lucena J. 2006).	65
Tabela 4-6. Resposta hidrológica e de erosão média para cada período estudado.....	72
Tabela 4-7. Resultados dos diferentes critérios de avaliação para a parametrização inicial.....	75
Tabela 4-8. Sensibilidade da escorrência a diferentes parâmetros de entrada ($n= 32$).	76
Tabela 4-9. Sensibilidade da erosão a diferentes parâmetros de entrada ($n= 32$).	76
Tabela 4-10. Caracterização das calibrações utilizadas.....	77
Tabela 4-11. Resultados da calibração da escorrência.....	78
Tabela 4-12. Validação da Escorrência.	79
Tabela 4-13. Resultados da calibração da erosão.....	80
Tabela 4-14. Resultados da validação da erosão.	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquerda: localização da área de estudo na bacia hidrográfica do rio Vouga (Fonte: <http://snirh.inag.pt/>). Direita: localização dos transeptos estudados. A1: Açores 1; A2: Açores 2; TM: Transeptos com parcelas Móveis ou amostradas; TF: Transeptos com parcelas Fixas. 23

Figura 2-2. Pluviograma do ano hidrológico 2005/2006 registada em Castelo Burgões. Fonte: SNIRH. 24

Figura 2-3. Principais complexos geológicos no centro de Portugal (Marques Gonçalves S. et al., 1974). 25

Figura 3-4. Representação esquemática da grelha (esquerda) e da posição das sondas de medição da humidade Theta-ML2 (círculo vermelho) e Trime (rectângulo com tres círculos). Representação da parcela (direita), pontos e profundidade de medição e amostragem. 32

Figura 4-1. D50 segundo Skaggs et al, 2001 (n=17). 45

Figura 4-2. Resistência do solo à torção e penetração (mediana, 1º e 3º quartil, max e min. n=180). 45

Figura 4-3. Valores do Torvane obtidos para cada secção do declive. 46

Figura 4-4. Rugosidade das 10 parcelas móveis e das 8 parcelas fixas estudadas (n=54). 47

Figura 4-5. a) Mediana da repelência e b) desvio padrão por posição no declive (t=topo; b=base) e desvio padrão da repelência para Açores 1 e 2. 48

Figura 4-6 a) Mediana da Humidade do solo e b) desvio padrão por posição no declive (t=topo; b=base) e desvio padrão da repelência para Açores 1 e 2. 49

Figura 4-7 Evolução do coberto do solo nas diferentes parcelas. 50

Figura 4-8: Pluviometria diária registada durante o período de estudo e momentos nos quais as simulações foram efectuadas. 51

Figura 4-9. Calibrações e simulações com os nozzles de Baixa intensidade de chuva. 52

Figura 4-10. Calibrações e simulações com os nozzles de Alta intensidade de chuva. 53

Figura 4-11: Distribuição espacial da intensidade produzida pelos nozzles empregados. 53

Figura 4-12. Escorrência relativa (% da precipitação) e absoluta (mm) para as simulações de alta e extrema 54

Figura 4-13. Relação entre os pares de simulações simultâneas em termos de escorrência produzida. 54

Figura 4-14. Escorrência relativa (% de precipitação) e absoluta nos dois locais de estudo ao longo do período de estudo. n_{Açores 1}= 16, n_{Açores 2}= 18. 55

Figura 4-15. Escorrência relativa (% de precipitação) e absoluta (mm) no topo e na base dos dois sites. n_{topo}=18; n_{base}=16 56

Figura 4-16. Relação entre a escorrência das simulações da mesma intensidade na base e no topo das encostas. 56

Figura 4-17. Escorrência relativa (% de precipitação) e absoluta (mm) nas parcelas estudadas. n_{topo}=18; n_{base}=16. 57

Figura 4-18. Variação temporal da escorrência em termos relativos (% da precipitação). Para Set-05, n =10; para Nov-05, Abr-06 e Jul-06 n=8. 58

Figura 4-19. Variação temporal da mediana dos coeficientes de escorrência em Açores 1 e Açores 2 (n=34). 58

Figura 4-20. Coeficientes de escorrência obtidos para cada uma das parcelas de baixa intensidade (cor azul) e alta (cor vermelha) para os quatro períodos de estudo (t=topo; b=base). 59

Figura 4-21. Coeficiente de escorrência médio por par de simulações, mediana da classe de repelência MED na parcela controlo por profundidades (acima) e média da humidade inicial (abaixo). 60

Figura 4-22. Correlações entre repelência (esquerda), humidade inicial (direita) e escorrência para as baixas intensidades. 61

Figura 4-23. Correlações entre o coeficiente de escorrência vs. m tempo inicio de escorrência, tempo fim escorrência e tempo desde que o incêndio aconteceu. 62

Figura 4-24. Hidrograma da parcela tb1; típico do 1º Período. 63

Figura 4-25. Hidrograma da parcela tb2; típico do 2º Período. 63

Figura 4-26. Hidrograma da parcela tb3; típico do 3º Período. 63

Figura 4-27. Hidrograma da parcela tb4; típico do 4º Período. 63

Figura 4-28. Monitorização da humidade nas simulações de chuva. Mostra-se a humidade máxima registada durante a simulação, a humidade no minuto 60' (a ultima medição antes de acabar a chuva; topo da caixa) a mediana de todos os valores (base da caixa) e a humidade inicial no minuto 0' 66

Figura 4-29. Infiltração durante as quatro simulações consecutivas na parcela tb de Açores 1. 67

Figura 4-32. Comparação entre a erosão produzida nas simulações de baixa intensidade (Max, min, quartis 3º e 1º, mediana, n=17) e de alta intensidade (Max, min, quartis 3º e 1º, mediana, n=17). 68

Figura 4-33. Precipitação, escorrência, fracção mineral e orgânica acumulada nos dois locais de estudo. 69

Figura 4-34. Valores da escorrência e sedimentos produzidos na base (n=16) e topo (n=18) das duas encostas. 69

Figura 4-35. Escorrência (mm) e perdas acumuladas (g/m²) produzida em cada parcela durante as quatro simulações (n=4 em todas as parcelas. As barras de erro em A2tb e A2ta mostram n=5). 70

Figura 4-36. Evolução temporal das perdas de sedimentos medidas por períodos (Set-05 n=10; Nov-05 n= 8; Abr-06 n=8; Jul-06 n=8).....	71
Figura 4-37. Escorrência e sedimentos totais produzidos em cada parcela e em cada período.	71
Figura 4-38. Concentrações de sedimentos tiradas nas amostras das simulações de chuva.....	73
Figura 4-39. Percentagem de matéria orgânica medido sobre o total de sedimentos medido em cada simulação de chuva.....	74
Figura 4-40. Relação entre a escorrência observada e a modelada na calibração nº1 (n=48).....	75
Figura 4-41. Calibração nº1 nas 4 parcelas de calibração.	75
Figura 4-42. Erro médio na erosão em cada um dos cenários analisados em cada calibração.	80
Figura 4-43. Erro médio, máximo e mínimo na modelação da escorrência e da erosão obtida nos quatro períodos em cada parcela.....	82
Figura A1-1: Mapa de precipitações médias no distrito de Aveiro. Fonte: http://snirh.inag.pt/	90
Figura A1-2. Temperaturas médias no distrito de Aveiro. Fonte: http://snirh.inag.pt/	90
Figura A1-3.Evapotranspiração real no distrito de Aveiro. Fonte: http://snirh.inag.pt/	91

1 INTRODUÇÃO.

a) Enquadramento.

O desenvolvimento de estratégias para avaliar o risco de erosão e determinar quais as áreas prioritárias onde intervir pode significar a diferença entre a conservação do recurso solo (o qual sustenta os recursos naturais) e a perda deste suporte, que demora, na melhor das situações, vários milhares de anos para se regenerar.

O projecto EROSFIRE visa a criação de uma ferramenta informática que pretende identificar as áreas de maior risco de erosão após o incêndio. O desenho experimental foi concebido para estudar a erosão desde a unidade mínima de estudo (micro-parcelas) e sobre-escalar até a escala das encostas. As simulações de chuva nas micro-parcelas constituem a aproximação de base para o projecto EROSFIRE. A resposta hidrológica das micro-parcelas perante uma chuva simulada mostrará as directrizes gerais do processo hidrológico do solo (escorrência-infiltração). No “percurso de sobreescalado” do projecto outras duas etapas devem ser cobertas: o estudo da resposta hidrológica e de erosão nas micro-parcelas com chuva natural e o estudo da resposta hidrológica e de erosão nas encostas com chuva natural¹. Esta Tese de Mestrado preocupa-se com as simulações de chuva, enquanto que é a unidade básica de estudo.

b) Simulações de chuva.

A simulação de chuva constitui uma ferramenta básica para obter os parâmetros hidráulicos do solo e saber a erosão e degradação física desse solo (Agassi and Bradford, 1999). A utilização de simuladores pode resolver o problema da medição da chuva e comparar áreas que têm regimes de chuva diferentes. Mediante simulações de chuva podem ser comparadas a escorrência e a erosão de parcelas de diferentes locais sem ter que esperar à ocorrência da precipitação natural para obter dados (Meyer *et al.*, 1994).

Numerosos grupos de investigação em todo o mundo têm-se esforçado em desenvolver simuladores de chuva que reproduzam a chuva natural. Os maiores problemas nas simulações de chuva derivam da energia cinética da chuva artificial e do pequeno tamanho da parcela. Alguns cientistas optaram por realizar poucas simulações de chuva tentando representar fielmente as condições da precipitação natural, reproduzindo a chuva desde alturas de 13 metros com velocidades terminais em torno a 7 m s^{-1} (Laws, 1941). Utilizar parcelas maiores de 30 m^2 (Rulli *et al.*, 2006) permite estudar os fenómenos de erosão em canais e deposição (Lane *et al.*, 2004).

Outros optaram por realizar muitas simulações com aparelhos portáteis que reproduzem a chuva desde 2-2,5 m de altura sobre parcelas de 4 a $0,24 \text{ m}^2$ (Meyer & Harmon 1979, Meyer *et al.*, 1994, Benito *et al.*, 2003, Cerdà *et al.*, 1997). Este último autor mediu velocidades de $3,4 \text{ m s}^{-1}$ com o simulador que foi utilizado em este trabalho e na maioria de estudos em Portugal (Walsh *et al.*, 1995; Coelho *et al.*, 2002a, 2004, Ferreira *et al.*, 1999, 2005a,b, 2007).

c) Modelação das rse's.

Ainda com as melhorias em **modelação** as simulações são altamente variáveis e muito sensitivas aos parâmetros de entrada (Wu *et al.*, 1993; Jetten *et al.*, 1999, 2003). Esta incerteza está relacionada com a variabilidade nos dados de entrada e com a natureza não-linear dos processos de erosão e escorrência (Morgan *et al.*, 2001; Jetten *et al.*, 2003). Estes problemas podem ser melhorados com calibrações, mas calibrar para condições futuras não é possível; o que questiona a robustez dos modelos. (Beven *et al.*, 2000; Morgan *et al.*, 2001). Um modelo robusto deve ser capaz de ser executado razoavelmente com valores de parâmetros similares (incluindo os mais dinâmicos) para a maior gama possível de condições (Toy *et al.*, 2002).

A prática habitual nos estudos de erosão do solo consiste em efectuar medições repetidas durante períodos prolongados num número reduzido de locais, mas em ambientes que mudam rapidamente, como é o caso de áreas recentemente ardidas, esta metodologia de amostragem

¹ O projecto EROSFIRE II, recentemente aprovado, visará ainda o sobreescalado para pequenas bacias.

apresenta certas restrições (Walsh *et al.*, 1995). As alterações na cobertura do solo e nas suas características intrínsecas, como por exemplo a repelência à água, comprometem a comparabilidade entre eventos chuvosos consecutivos, e dificultam a aplicação e desenvolvimento dos modelos que pretendem analisar as consequências dum incêndio florestal (Keizer *et al.*, 2005). Para resolver este problema esta Tese de Mestrado contempla a realização de simulações de chuva ao longo do tempo abrangendo 4 períodos ao longo de um ano com condições cambiantes. O projecto EROSFIRE pretende utilizar diferentes modelos, tanto de base empírica: USLE *Universal Soil Losses Equation* (Wischmeier & Smith, 1978), PESERA *Pan-European Soil Erosion Risk Assessment model*, como de base física: MEFIDIS *Modelo de Erosão Físico e Distribuído* (Nunes *et al.* 2005), LISEM *Limburg Soil Erosion Model* (de Roo *et al.*, 1996a,b). De todos eles é o MEFIDIS com o que se tem feito os maiores progressos para modelar as simulações de chuva.

Utilizar as simulações de chuva para modelar a erosão pode ser uma ferramenta de grande valia porque é possível predizer resultados a partir de um número reduzido de simulações. Simulações de chuva e modelação da erosão podem ir da mão para produzir predições fiáveis do risco de erosão.

Calibrar o MEFIDIS para as simulações de chuva segundo os diferentes parâmetros de entrada medidos irá permitir testar a sua robustez, isto é, saber se pode ser empregado como ferramenta de medição do risco de erosão uma vez que terá de responder as variações dos parâmetros no tempo (primeiro ano após o incêndio) e no espaço (escala das micro-parcelas).

d) Considerações sócio-económicas

O chamado “Eixo Atlântico” abastece de matérias primas a uma plataforma importante de indústrias do ramo da celulosa que está a produzir efeitos negativos derivados das explorações florestais intensivas. As alterações que se produziram na sociedade portuguesa a partir dos anos 60 na estrutura socio-económico, muito em especial nas populações rurais produziu um movimento da população para o litoral ou o estrangeiro. Este facto diminuiu a população residente nas áreas florestais, juntamente com a progressiva menor utilização da lenha e do carvão como combustíveis e dos estrumes animais como fertilizante e teve como consequência o deixar nas matas muito material combustível que até então era retirado, o que aumentou o perigo de incêndio (Carvalho *et al.* 2002). Nas últimas décadas os incêndios têm aumentado em frequência e extensão em Portugal e em toda a bacia mediterrânea principalmente devido às seguintes razões (Shakesby *et al.* 1996):

- plantado de espécies florestais altamente inflamáveis (principalmente eucaliptos e pinheiro)
- abandono de práticas tradicionais tais como pastagens e corte da vegetação que anteriormente reduzia a acumulação de material inflamável (manta morta, mato),
- incremento do uso recreativo das florestas,
- uma sucessão de anos excepcionalmente secos (World Meteorological Org. 1995).

c) Os efeitos do fogo no solo.

O incêndio de Julho de 2005 consumiu 16 Km² nas freguesias de Albergaria-a-Velha, a maior parte da superfície devastada consistia em plantações de *Eucalyptus globulus*. Os ciclos de cultura e extracção costumam ser muito curtos (5-7 anos). Os incêndios danificam as árvores e acabam com o sob-coberto vegetal e levam a umas mudanças prejudiciais para o solo, incluindo reduções na matéria orgânica e uma diminuição na estabilidade dos agregados (Giovannini *et al.*, 1988), incremento da erodibilidade do solo (Imeson *et al.*, 1984), aumento da repelência à água do solo (DeBano, 2000) e um decréscimo na capacidade de infiltração. Estas mudanças resultam num incremento da escorrência superficial e perdas de solo, máximo justo após o incêndio e decrescente rapidamente depois disto (Swanson 1981; Diaz-Fierros *et al.*, 1987; Morris *et al.*, 1987; Sevink *et al.*, 1989; Imeson *et al.*, 1992, Inbar *et al.*, 1998). A erosão, a perda de produtividade agrícola e a desertificação são fenómenos encadeados que ameaçam aos sistemas naturais de influência mediterrânea, especialmente em zonas incendiadas.

No entanto, a relação entre incêndio e erosão não é sempre directa. Alguns autores sugerem que o conjunto de perdas é muito pequeno em comparação com as geradas por outros por outras perturbações, e por tanto a influência do fogo pode ser considerada insignificante (Kutiel & Inbar, 1993; Kutiel et al., 1995; Lane et al., 2004) o somente é importante justo após o incêndio (Diaz-Fierros et al., 1990). Estas diferenças estarão relacionadas quer com a ocorrência de eventos de precipitação intensa durante o período de monitorização dos estudos quer com a severidade do fogo nas áreas queimadas (De Luís et al., 2003).

Na Tabela 1-1 são hierarquizados os efeitos do fogo considerando só a temperatura atingida. A mesma intensidade de fogo afectará de forma diferente aos primeiros centímetros do solo, sendo os efeitos diferentes a mais profundidade.

Tabela 1-1. Efeito do fogo segundo a temperatura. De Dmitrakopuolos modificada por Úbeda; tirada de Velez (2005)).

Temperatura °C	Efeito no solo
50-60	Temperatura letal para o protoplasma das plantas
100	Decomposição de alguns compostos de azoto do solo
100-200	Temperatura letal para fungos e bactérias; evaporação da água
200-300	Perda do 50% do azoto. Começa a descer o valor do pH. Desaparição de alguns dos componentes da matéria orgânica. Aumento do amónio, fósforo, calcio, magnesio e sódio. Descida da capacidade de absorção de água do solo e da sua plasticidade. Incremento da fracção de areia. Incremento/diminuição da estabilidade estrutural (segundo autores) e da porosidade (segundo textura).
300	Desaparição da matéria orgânica por calcinação. Formação de uma superfície hidrófoba.
315	Incremento do pH do solo. Diminuição da capacidade de intercambio catiónico.
315-400	Perda do 75% do azoto.
400-550	Descida do calcio, magnesio e sódio, desaparição do amónio, incremento progressivo do potásio. Forte descida da absorção de água e da plasticidade. Desaparição total dos resíduos orgânicos.
550-700	Desaparição total da matéria orgânica. Perda dos OH das argilas, incremento do pH. Incremento do fósforo e potasio. Descida da estabilidade estrutural.
700-900	Oxidação do solo, mudanças irreversíveis nas argilas, decomposição dos carbonatos, incremento do cálcio, magnésio e descida do potásio. Incremento da absorção de água mas não da plasticidade.

A eliminação do **coberto** vegetal, a combustão da matéria orgânica e a alta temperatura produzem mudanças nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, cuja magnitude depende, de um lado da intensidade e duração do incêndio, e de outro da disposição, estrutura e grau de humidade do próprio solo. O calor consome parte da matéria orgânica e destrói os agregados, que acabam por se dispersar pelo impacto das gotas de chuva; ainda que se o incêndio é de moderada intensidade, não se modifica a textura.

No solo descoberto após do incêndio, frequentemente enegrecido pelas partículas de carvão o **albedo** ou poder de reflexão é geralmente muito inferior ao de uma superfície coberta de vegetação, a temperatura e a evaporação aumentam e diminui a absorção e retenção de água, a porosidade, o arejamento e a capacidade de infiltração superficial. El balance suele ser una reducción de las disponibilidades de agua e un aumento de la escorrentía e do peligro de erosión.

O fogo pode por vezes contribuir à formação do solo por desintegração das **rocas**, que se fragmentam e descascam facilitando assim a posterior erosão por outros agentes e favorecendo a incorporação das suas partículas e elementos ao solo. Certas formas arredondadas das rocas azotadas por fogos reiterados e algumas acumulações de blocos e fragmentos têm esta origem.

A alteração mais importante é se calhar a formação de camadas impermeáveis á água. As substâncias **hidrófobas** presentes no tecido esponjoso da manta morta são liberadas e se condensam sob a zona aquecida do solo, a vários centímetros da superfície, formando uma capa que pode impedir o passo da água. A repelência à água é um fenómeno que pode acontecer de forma natural em alguns solos, mas se pode ver intensificado como resultado do aquecimento durante o incêndio. Depois do fogo a repelência manifesta-se como uma capa de espessura e continuidade variável paralela à superfície do solo, quer na superfície do solo quer a alguns centímetros de profundidade (Varela *et al.*, 2005). No chaparral californiano foi descrita uma ligeira repelência superficial que é destruída pelo incêndio mas que reaparece intensamente a alguns centímetros de profundidade, impedindo a infiltração da escorrência. Nas florestas de eucaliptos de Portugal descreveu-se uma camada intensamente repelente durante os períodos secos. Com posterioridade ao incêndio a repelência continua a ser muito alta, mas o efeito protector e absorvente da manta morta desaparece e a erosão acontece (Doerr *et al.*, 2000).

O grau e distribuição da repelência à água no perfil do solo dependerá de factores como a vegetação, a actividade biótica e a textura do solo, mas fundamentalmente é a temperatura atingida no solo durante o incêndio o factor mais importante nas áreas queimadas. A temperatura incrementa-se com a carga combustível e se reduz ao aumentar o conteúdo em humidade do solo (Letey, 2001, cit. por Morgan, 1998). A repelência pode ser medida a través do tempo de penetração das gotas de água no solo (WDPT, MED) ou por medio de simulações de chuva, segundo as diferenças na infiltração observáveis nos hidrogramas (WRI). Nas florestas das Rocky Mountains foi determinada que a diminuição na infiltração produzida pela repelência num incêndio de alta intensidade estava entre um 10 e um 40 % (Robichaud, 2000b).

Este fenómeno pode-se prolongar durante alguns anos, contribuindo ao aumento da escorrência, com o perigo de erosão subsequente. O grau de erosão prévio pode fazer que o processo se auto-acelere.

As **alterações químicas** mais perceptíveis variam muito segundo a natureza dos solos, a vegetação e condições climáticas. A combustão da vegetação liberta os nutrientes imobilizados. A volatilização do azoto relaciona-se directamente com a temperatura do solo e com a matéria orgânica consumida. As condições da nitrificação melhoram após o incêndio, sobre tudo em solos ácidos devido a uma descida da acidez, a uma maior actividade biológica, ao rebentamento de sementes de espécies fixadoras de azoto (leguminosas) e aos aportes da precipitação, pelo que num intervalo curto de tempo a quantidade perdida após o incêndio pode ser restabelecida (Mataix-Solera *et al.*, 2004).

Em médios bem adaptados aos incêndios a recuperação do estado anterior, em quanto a conteúdos de nutrientes, pode ser restabelecida em poucos anos, uma vez que o mato recupera

sua densidade e altura, protegendo eficazmente a regeneração das árvores incipientes (Iglesias, Fernández, González, 2002; Vallejo R, 2005).

São frequentes as **formações vegetais** que renovam o seu próprio ciclo depois do fogo. Isto acontece em muitas espécies presentes em estepes, pradarias, em formações lenhosas como as das urzes, florestas e matos esclerófilos. Se o grau de resiliência das espécies vegetais é alto o efeito pode ser menos agressivo. Espécies com alta resiliência são o sobreiro, com uma grossa cortiça que isola a árvore do efeito do fogo ou o Eucalipto, o tojo e a giesta, que rebentam muito bem após do incêndio. Apesar do vazio biológico aparentemente total que parece existir nas superfícies do solo após um incêndio intenso, os microrganismos do solo em conjunto não parecem ser drasticamente afectados sob a capa superior carbonizada, a população de fungos e bactérias pode ser em poucos dias maior que antes do incêndio.

1.1 Objectivos.

Objectivo geral:

“Medir o risco de erosão em diferentes alturas durante o primeiro ano após do incêndio de um eucaliptal da região centro de Portugal a través da realização de repetidas simulações de chuva que reproduzam eventos chuvosos intensos e extremos (intensidade 40 e 80mm/h) sobre parcelas fixas e móveis; conseguindo recolher um volume suficiente de dados sobre a escorrência superficial e a erosão do solo suficiente para testar e aplicar o modelo de erosão MEFIDIS”.

Objectivos específicos:

1.- Conhecer a produção de sedimentos, escorrência superficial e características do solo a través da realização de simulações de chuva e amostragem em distintas alturas durante o primeiro ano após o incêndio.

2.- Contribuir para um melhor conhecimento do comportamento do solo face aos principais factores influentes na erosão de áreas ardidadas:

2.a) Intensidade da chuva

2.b) Cobertura

2.c) Repelência à água e humidade inicial

3.- Aplicar e avaliar o modelo MEFIDIS para a erosão produzida por simulações de chuva.

2 ÁREA DE ESTUDO.

2.1 Localização.

A área de estudo se encontra no distrito de Aveiro (Portugal), no Concelho de Albergaria-a-Velha, a apenas 37 km da cidade de Aveiro. Na Tabela 2-1 distinguem-se duas subáreas muito próximas mas com diferentes orientações e localizações.

Tabela 2-1. Coordenadas UTM, elevação e exposição das encostas estudadas.

Área de Estudo	X (UTM)	Y (UTM)	Altitude	Declive	Exposição
Açores 1	29546596E	4503341N	70m	20°	N190E
Açores 2	29546600E	4503233N	70m	15°	N50E

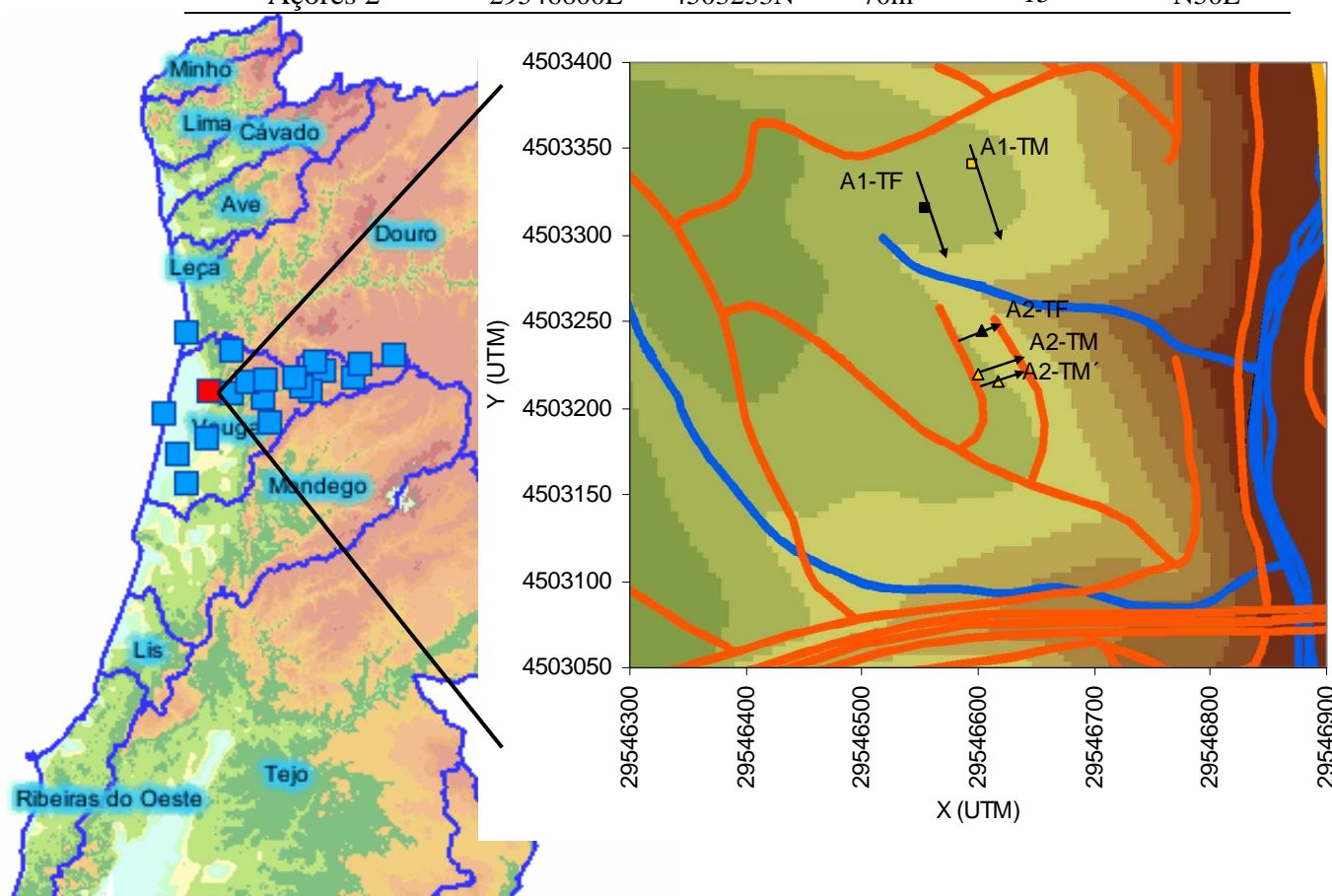


Figura 2-1. Esquerda: localização da área de estudo na bacia hidrográfica do rio Vouga (Fonte: <http://snirh.inag.pt>). Direita: localização dos transeptos estudados. A1: Açores 1; A2: Açores2; TM: Transeptos com parcelas Móveis ou amostradas; TF: Transeptos com parcelas Fixas.

A área de estudo está dentro da Bacia Hidrográfica do rio Vouga, a 2 km ao sudeste da localidade de Açores. Na Figura 2-1 direita em cor laranja reconhece-se a estrada IP-5 que no canto direito da Figura cruza o rio Vouga. Na margem esquerda da pequena linha de água encontra-se Açores 1. É uma encosta soleada e de declive pronunciado. À direita, Açores 2 tem um declive mais suave e apresenta uma lavragem vertical que faz com que algumas parcelas apresentem comôros e vales. As características gerais das oito parcelas fixas instaladas em Açores 1 (A1-TF) e Açores 2 (A2-TF) são mostradas na Tabela 2-2. A primeira letra do código

da parcela refere-se à sua posição no declive (t: topo; b: base) e a segunda à intensidade de chuva reproduzida (b:baixa; t:alta).

Tabela 2-2. Características gerais das parcelas monitorizadas.

Local	Código da parcela	Exposição	Declive	Morfologia ²	Evolução da cobertura	Número de sim. de chuva	Intensid. do fogo
A1	tb	N160E	22	plana	cinzas-pedras	4	media-baixa
	ta	N160E	21	muito irregular	muitas pedras- veg. alta	4	media-baixa
	bb	N160E	20	plana	litter- vegetação	4	media
	ba	N200E	23	irregular	cinzas-pedras	4	media
A2	tb	N70E	15	plana-irregular	litter-vegetação	5	media
	ta	N70E	15	ligeiramente concava	litter-pedras	5	media
	bb	N40E	15	convexa	cinzas-pedras	4	media
	ba	N40E	12	cóncava	muito litter	4	media

2.2 Clima.

O clima da área de estudo pode ser caracterizado como Húmido meso-térmico, com verões cálidos e secos (Csb na classificação de Köppen). A temperatura média na estação meteorológica de Estarreja para o período 1956-1977 foi de 13.9°C, e a média mensal varia de 8.8 °C para Dezembro até 19.1°C para Julho.

A precipitação média da estação mais perto foi de 1229mm (Albergaria-A-Velha) para o período de 1941-1991, com variações dentre 750mm e 2022mm³. Como se pode ver na Figura 2-1, a precipitação registada em Castelo Burgães apenas atinge os 1100mm para o ano hidrológico 2005-2006, o qual mostra que o ano de estudo foi menos chuvoso do que a média dos últimos 65 anos. A evapotranspiração real e a pluviometria são mostrados no anexo I.

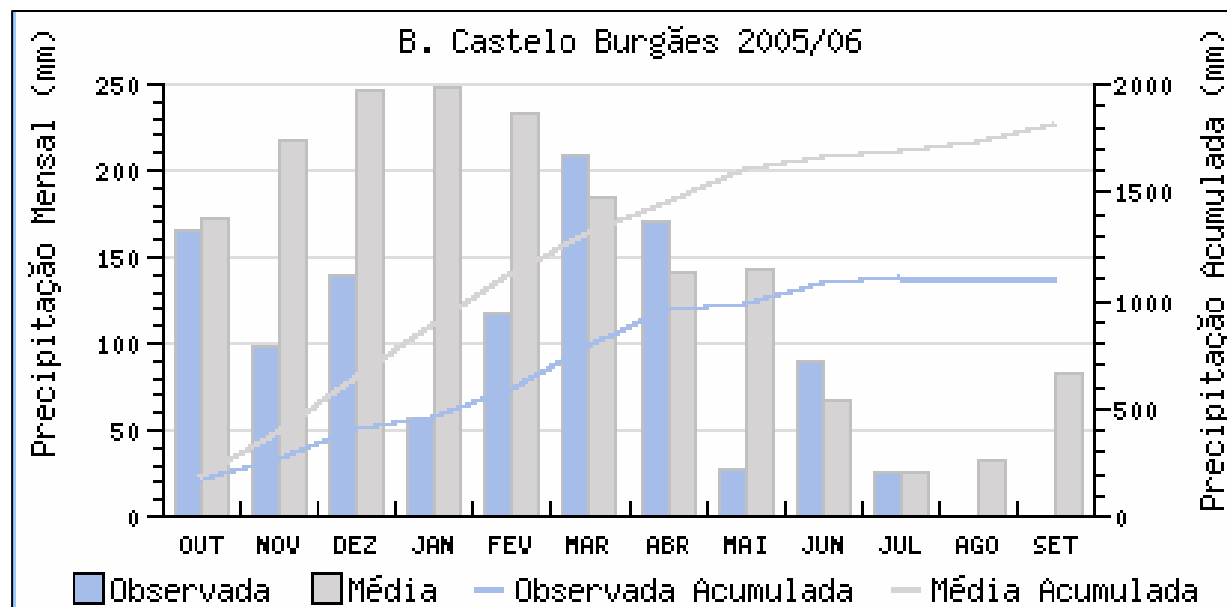


Figura 2-2. Pluviograma do ano hidrológico 2005/06 registada em Castelo Burgães. Fonte: SNIRH.

² Só para as parcelas fixas.

³ DRA-Centro, 1998.

2.3 Geologia e solos.

Um dos critérios mais importantes para a selecção da área de estudo foi a **geologia**. Teve de ser seleccionado um lugar com os materiais abundantes em Portugal (Figura 2-3). Na área atingida pelo incêndio de Albergaria-a-Velha existem distintos complexos geológicos. A área de estudo está situada na transição entre duas unidades fisiográficas: a plataforma litoral dominada por depósitos do Cenozóico e mesozóico e o maciço Hispérico composto por xistos e grauvacas do Pré-câmbrico e granitos do Hercínico.

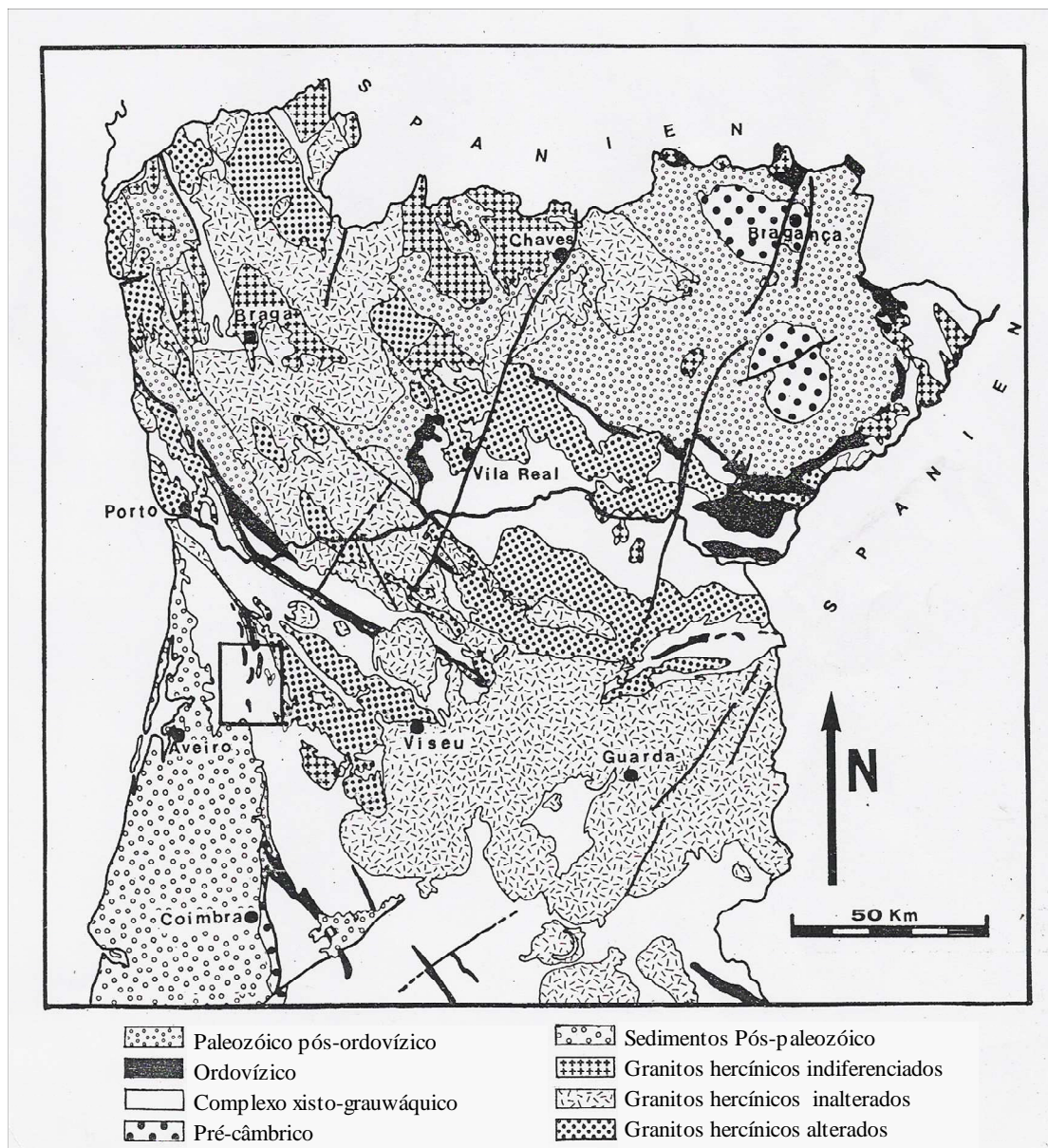


Figura 2-3. Principais complexos geológicos no centro de Portugal (Marques Gonçalves S. et al., 1974).

A **geomorfologia** vai definir uma diferenciação entre os dois lugares, sendo os solos em Açores 2 um pouco mais desenvolvidos do que em Açores 1. As áreas de estudo encontram-se num pequeno vale, nas encostas direita e esquerda duma linha de água intermitente.

Entre as três unidades fundamentais em que a geomorfologia pode descrever o relevo (interflúvios, encostas e fundos), os dois locais se encontram nas encostas.

O perfil da ladeira pode dividir-se em três partes bem diferenciadas:

- Parte convexa somital
- Segmento rectilíneo central (onde as simulações foram realizadas)
- Parte côncava basal.

O desenvolvimento de cada um destes elementos depende de diversos factores. Em climas áridos alcança maior desenvolvimento a parte basal, e em climas temperados-húmidos predominam as vertentes convexas. As ladeiras são superfícies de erosão que se modelam directamente sobre um substrato rochoso, onde a inclinação depende da geologia. Por tanto, os solos vão estar menos desenvolvidos do que na outras unidades.

Por outro lado, há-que ter em conta que a acção humana pode modificar as ladeiras para tentar conservar o solo e a água, mas no nosso caso, a actuação humana nas encostas de Açores não é dirigida a tal efeito. Toda a cobertura vegetal foi eliminada; em Açores 2 a lavragem é perpendicular à pendente e em Açores 1 o solo é muito fraco, a rocha aflora à superfície e não permite a lavragem.

O facto do epipedion apresentar uma camada de pedras (principalmente xistos, de difícil meteorização) mostra o resultado de um processo erosivo que provocou um enriquecimento relativo em pedras por perda de elementos finos. Provavelmente este processo é resultado do tipo do uso do solo pelo homem. Mas com certeza podemos dizer que nestas encostas a erosão foi um processo formador muito importante.

Os solos xistosos vão imprimir uma direcção determinada para um tipo de solo. Em princípio esperam-se solos de tendência argilosa, com argilas micáceas (ílitas) e vermiculitas. Se existisse estação seca podem existir também esmectitas. (Porta et al., 1994).

Caracterização Edafológica

Atendendo à classificação da FAO, esperam-se solos típicos de climas temperados e húmidos, característicos por terem um horizonte cámbico (Bw, de meteorização). Num clima temperado e húmido a meteorização é intermédia, não chega a ser forte, por causa do período seco estival. O horizonte B não chega a ser potente, ficando como Bw, de meteorização. Não se produz eluviação de argilas. Segundo **Dorronsoro** (www.edafologia.ugr.es), o horizonte cámbico tem as seguintes características: um horizonte de alteração com elevada percentagem de argila, uma cor vermelha e pode mostrar lavagem de carbamatos, não tendo textura muito arenosa.

2.4 Vegetação e uso do solo.

A vegetação natural pode proporcionar informação acerca das condições do médio (solo e clima). Mas actualmente temos poucos exemplos desta vegetação, tendo desaparecido quase totalmente a vegetação original, que foi substituída pelo *Eucalyptus globulus*, espécie de baixos requerimentos edafológicos e climáticos.

De qualquer modo, ainda encontramos indivíduos isolados que podem dar uma ideia da vegetação que aqui vivia em estreita relação com o solo. Num inventário qualitativo podem-se encontrar as seguintes espécies, que se podem considerar vestígios da coberta vegetal original:

Quercus robur

Quercus suber

Arbutus unedo

Calluna vulgaris

Erica ciliaris

Erica arborea

Erica umbellata

Chaemaspartium tridentatum

Pteridium aquilinum

Scilla monophylos

Rubus sp.

Funaria sp.

Estas espécies dão uma ideia da vegetação clímax, que de uma forma grosseira podia ser definida fitossociologicamente como da Classe *Querc-Fagetea*. Ordem *Quercetalia Roboripetraceae*, enquadrada na região biogeográfica Mediterrânea, Subregião Mediterrânea Ocidental, Província Luso-Extremadurensis, Sector Beira Litoral. (Rivas-Martinez, em Prats S., 2001⁴).

Associadas ao actual uso do solo apareceram varias espécies, que acompanham ao eucalipto de forma mais ou menos estreita:

Eucaliptus globulus

Acacia melanoxylon

Acacia sp.

Pinus pinaster

Fungos micorrízicos do eucalipto: Pisolitos

...

Tanto o eucalipto como a acácia destacam-se pelo seu carácter infestante, conseguindo colonizar áreas adjacentes às explorações florestais, deslocando às espécies autóctones e diminuindo a biodiversidade, constituindo sérios problemas para os ecossistemas, entre outros os ecossistemas ripícolas assim como mudando as propriedades do solo (FIRE project, Doerr et al 2006). A produção de madeira imprime uma alta pressão na actualidade tanto no solo como na vegetação e na sociedade rural. O manejo da floresta começa pela roturação total da vegetação, seguida duma lavragem com maquinaria pesada, na maioria das vezes não são tidos em conta quaisquer práticas para minimização da erosão. Após da lavragem os eucaliptos são plantados, ficando o solo sem protecção perante a erosão. Os ciclos de crescimento são no máximo 10 anos, após dos quais é realizado o corte e extracção da madeira, na maioria das vezes com maquinaria pesada que compacta o solo. Os ciclos podem repetir-se 3 ou 4 vezes, após dos quais os tocos são novamente arrancados com máquinas e o ciclo começa de novo (Thomas et al., 2000).

Nas condições em que a exploração florestal se produz há que considerar que a perda de solo produzida não só é devida a introdução, cultura e extracção dos eucaliptos, mas também é devida aos incêndios que se produzem a consequência deste manejo.

⁴ Relatório final do curso: “Efeitos da eucaliptização nas comunidades vegetais da Serra do Caramulo”, 2001.

3 MATERIAIS E MÉTODOS.

3.1 Simulações de chuva.

3.1.1 O simulador.

O protocolo seguido para a realização das simulações foi o definido pelo projecto europeu MEDAFOR (ENV4-CT98-0686), cujas principais características são a utilização de parcelas quadradas de 0,28m², 60 minutos de duração das experiências e recolha de 5 amostras de escorrência.

Foram empregues dois simuladores calibrados para chuvas de duas intensidades, 45 e 85 mm/h, segundo o desenho de Cerdá et al. 1995.

A escolha das duas intensidades se deve a duas razões:

1ª: Reproduzir os eventos extremos que acontecem na natureza e que têm um alto poder erosivo:

45 mm/h: P-1h máxima para T=100 anos (Est.Caramulo).

80 mm/h: P-1h máximo histórico em Portugal (Brandão et al. 2001). Durante todo o trabalho fala-se em *baixa* e *alta* intensidade, só para facilitar a comparação das duas intensidades empregadas.

2ª: Comparabilidade dos dados. O simulador de chuva desenhado por Cerdá tem sido utilizado por toda Europa, e existem muitos trabalhos que o utilizaram, face à sua simplicidade e facilidade de emprego.



Figura 3-1. Simulador de chuva segundo (Cerdá et al., 1995)

O simulador (Figura 3-1) conta com uma cabeça onde é assegurado o rociador, quatro pernas telescópicas, uma bomba de 12V com um balão de ar que puxa a água a uma pressão constante pré-calibrada no laboratório, uma bateria e uns quantos tanques de água que precisam ser encheidos durante a simulação. O simulador é nivelado para produzir uma chuva a uma altura de 2 m e o nozzle é centrado e nivelado com uma prumada sobre a parcela. Esta operação é muito delicada e lenta, e forçou a desenvolver um novo desenho na cabeça do simulador para facilitar a perfeita nivelção do rociador. Uma tenda à volta evita que o vento produza variações na distribuição da chuva dentro da parcela. Três copos-testigo são colocados nos três cantos da parcela e servirão para controlar possíveis anomalias na intensidade da chuva. A bateria é conectada e quando a pressão é igual à requerida é activado o cronómetro e começa a experiência. Durante uma hora, será medida a escorrência minuto a minuto, e os copos-testigo serão trocados cada dez minutos.

O simulador gera um cone de chuva de aproximadamente um metro quadrado sobre o solo. Na periferia do cone a intensidade é menor do que no centro, e os copos exteriores registam intensidades menores do que no centro da parcela. Optou-se pela parcela quadrada assim perdendo algo de homogeneidade na intensidade. Se acontecem variações na pressão ou na orientação do nozzle, a intensidade nos copos exteriores mudará. Cada nozzle tem uma distribuição de chuva particular, com vales e lombos na intensidade.

Enquanto à energia cinética, Cerdá et al (1997⁵) determinou, em condições semelhantes às que se desenvolvem nas nossas simulações, um valor de 18 J/ m². Palácios (2007) calculou valores médios da Energia cinética da chuva natural em Açores em torno à 190 J/ m² (max 1440, mediana 71J/ m²), o que indica que as experiências têm em torno a 10 vezes menos energia do que a chuva natural.

3.1.2 Calibrações

Na calibração da intensidade da chuva tem de ser controlada a altura do simulador, a pressão de saída da bomba, o tipo de nozzle empregado e dos componentes internos do mesmo (real nozzle, e peças internas), etc., mas o que mais nos interessa é a distribuição da intensidade dentro da parcela.

A pressão de saída da bomba é muito importante porque define o caudal e com ele a intensidade de chuva. Para pressões altas a intensidade da chuva é menor e a distribuição das gotas mais homogénea; para pressões baixas a intensidade é maior e a distribuição das gotas é mais heterogénea. Por isso, existem dois manómetros; um à saída da bomba e outro que está situado na cabeça do simulador, a dois metros de altura. A diferença de pressão entre eles é considerável, e sempre se toma a leitura da pressão no manómetro da cabeça.

A calibração no laboratório foi realizada com 42 copos situados no interior da parcela e 7 no exterior. Mediu-se a intensidade em cada um dos copos depois de uma chuva de 15 minutos. Para validar o nozzle (modelo HARDI-1553-10) tem de se repetir a prova três vezes consecutivas até obter valores de intensidade (± 45 e ± 80 mm/h). Para medir a variação da intensidade dentro da parcela, á partires dos valores tirados dos 42 copos, utilizou-se o Coeficiente de Christiansen (Christ.= (1-(Desv. Padrão/Media))x100) sendo rejeitadas as calibrações com coeficientes inferiores ao 70%.

Quando três calibrações consecutivas cumprem com os requerimentos o nozzle fica calibrado e toma-se como intensidade da chuva o valor médio ponderado dos 42 copos de dentro da parcela (Figura 3-2). As calibrações representam uma das tarefas mais delicadas, foi preciso realizar uma grande quantidade de calibrações (perto de 100) até os nozzles ficarem prontos. Depois de um certo número de experiências é preciso voltar a recalibrá-los para evitar possíveis variações devidas a golpes, obturações, e outros imprevistos.



Figura 3-2. Copos utilizados na calibração da intensidade da chuva.

3.1.3 Localização e instalação das parcelas.

A instalação das parcelas foi feita da forma mais aleatória possível, tentou-se não dar preferência a locais homogéneos e de fácil emprazamento, mas pormenores no microrrelevo forçaram algumas vezes a eleição do local, a orientação com respeito do transepto pode mudar em alguns graus. Por vezes uma pedra, uma raiz, um macroporo, forçam-nos a escolher um lugar

⁵ D50 das gotas 2,53mm, velocidade 3.4m/s, intensidade 54mm/h, Coef. de Christiansen 93%, pressão 1.55Kg/cm2, altura do simulador 2 metros, nozzles HARDI 1553-10.

diferente. A parcela controlo, ainda que não instalada no solo, foi colocada no médio das outras duas parcelas, e serviu para monitorizar as condições iniciais mediante amostragem destrutiva. Contudo, as parcelas sempre são representativas do topo e da base da encosta.

As parcelas consistem em três lâminas de aço zincado de 15 cm de altura que são entaladas no solo até 5 cm de profundidade. Na parte baixa é entalada no solo uma lâmina em forma de U aberta com um bico grande (peça de PVC de diâmetro 2,5cm) através da qual passará a água de escorrência. As lâminas ficam sobrepostas uns 10 cm para evitar fugas, e as uniões entre elas são seladas com silicone. A instalação das parcelas é uma tarefa muito delicada devido a grande quantidade de pedras, e requer muita paciência e cuidado. Por vezes são precisas várias tentativas até a parcela ficar aceitavelmente bem emprazada.

Devido em parte aos problemas com o emprazamento das parcelas decidiu-se fazer as primeiras simulações com amostragem destrutiva, e. d.; tirando amostras para caracterizar as condições “pré” e “post”, conhecer a textura e propriedades hidrológicas do solo dos dois locais de estudo. O resto de simulações aconteceu em 8 parcelas fixas que foram deixadas intactas para futuras provas. Com isto conseguiu-se eliminar variações que apareceriam ao utilizar novos emprazamentos. A perturbação do solo produz-se só uma vez e o solo pode re-estruturar-se após a primeira perturbação. A mudança na resposta hidrológica e na erosão medida dependerá então das mesmas peculiaridades da parcela e não tanto da instalação ou das características de cada nova parcela.

O desenho experimental foi o seguinte:

1º: Efectuaram-se 10 simulações (4 em Açores 1 e 6 em Açores 2⁶), entre o 20 e o 27 de Setembro de 2005; **1º período**) em 10 parcelas que foram amostradas e removidas após das provas.

2º: As seguintes 24 simulações (12 em Açores 1 e 12 em Açores 2) foram realizadas em Novembro 2005 (**2º período**) Março-Abril de 2006 (**3º período**) e Julho de 2006 (**4º período**). As oito novas parcelas instaladas em Novembro continuam ainda a ser monitorizadas pela equipa do projecto EROSFIRE.

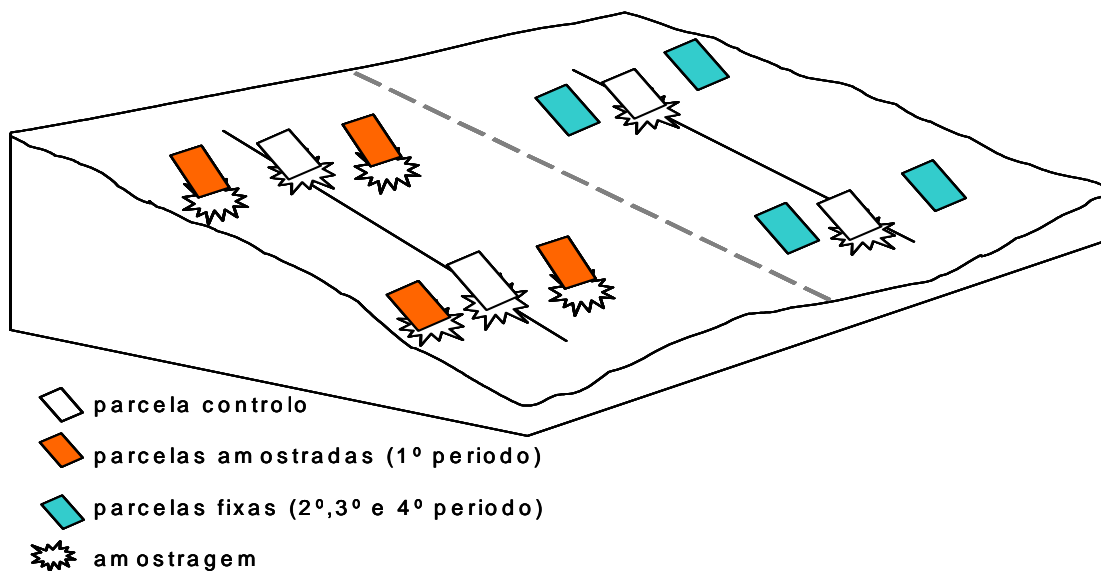


Figura 3-3. Desenho experimental de uma sub-área.

⁶ Há duas simulações “extra” no topo de Açores 2 que serão codificadas como ta1 e tb1.

Por tanto, em vez de instalar e amostrar todas as parcelas, só se escavaram as parcelas do 1º Período (Setembro 2005), e depois foram instaladas 8 parcelas para realizar as experiências do 2º, 3º, e 4º períodos (Figura 3-3) sendo então realizadas em cada parcela três repetições. Em princípio em cada par de parcelas vão ser reproduzidos dois eventos simultâneos de alta e baixa intensidade (45 e 80 mm/h). Uma parcela é seleccionada para realizar sempre simulações de alta intensidade e a outra para realizar as de baixa intensidade. Só na data de 10 de Novembro, devido a um engano, as simulações do par de parcelas do topo de Açores 1 correram com as intensidades trocadas⁷.

A comparabilidade é boa na escala temporal, mas não tanto na escala espacial. Assim que a parcela apresente uma resposta, estaremos a medi-la no tempo, e perdemos a variação espacial.

Optou-se por fazer um seguimento temporal a um espacial.

3.1.4 Descrição dos transeptos e das parcelas.

No formulário de campo existe um item dedicado à descrição geral da encosta na qual se irão desenvolver as simulações, enquanto as características morfológicas da encosta: exposição, declive, concavidade-convexidade, localização (GPS), tipo de uso do solo, litologia, tipo de solo, espécie florestal, idade e rotação da exploração florestal, tamanho das árvores (diâmetro do tronco à altura do peito, DBH). Também será tirada uma descrição qualitativa da tipologia do incêndio: camada de cinzas no solo, queima do sob-coberto total ou parcial, altura dos ramos queimados, etc.

Para a descrição da **cobertura das parcelas**, antes e após da simulação foi utilizada uma grelha com quadros de 5x5cm (Figura 3-4 esquerda). Em cada quadro foi anotada a cobertura existente. As categorias descritas foram: *Rocha mãe, pedras, solo nu, cinzas, litter, Arbustos, ervas e fetos, vegetação basal, musgos e fungos* foram também descritos, mas agruparam-se sob a categoria de *vegetação total*.

A grelha serviu ainda para fazer a descrição dos sinais de erosão (*pedestais e rills*), quer para notar as diferenças antes e depois da simulação, quer para analisar a evolução temporal destes fenómenos.

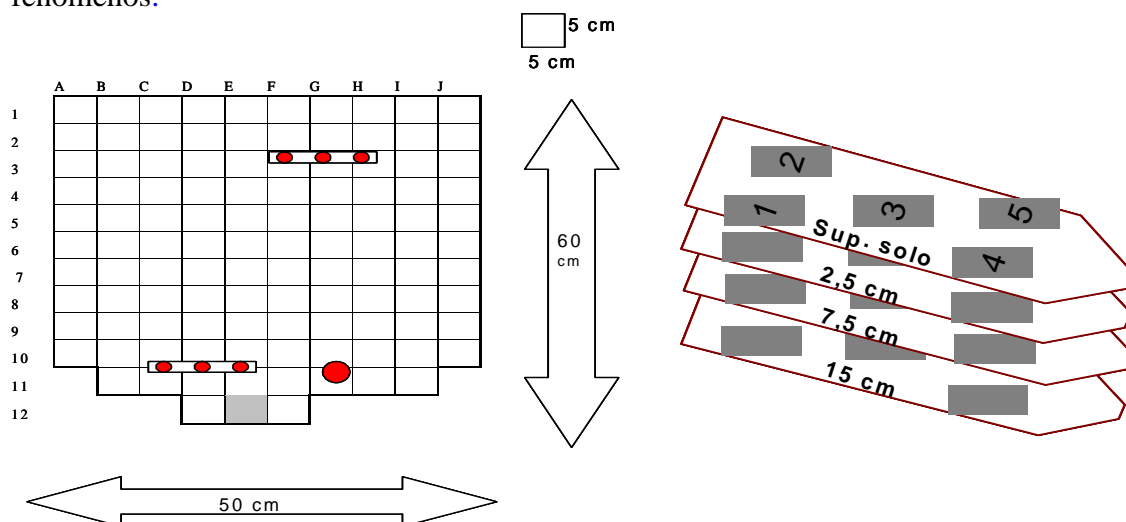


Figura 3-4. Representação esquemática da grelha (esquerda) e da posição das sondas de medição da humidade Theta-ML2 (círculo vermelho) e Trime (rectângulo com tres círculos). Representação da parcela (direita), pontos e profundidade de medição e amostragem.

⁷ Em vez de fazer chover sempre 45mm/h nos quatro períodos estudados, em A1-ta correram 1º:45; 2º:80; 3º:45; 4º:45mm/h; em A1-tb temos feito: 1º:80; 2º:45; 3º:80; 4º:80mm/h.

A **amostragem antes, durante e após da simulação** correu como se descreve a continuação. Por cada simulação atiram-se amostras de cinzas, litter, e solo para 0-5, 5-10 e 10-20 cm em 5 pontos dentro de cada parcela. A amostragem pre-simulação acontece na parcela controlo, e a amostragem posterior, é realizada na própria parcela (parcelas móveis) por escavação do solo. No caso das parcelas fixas só foram tiradas amostras nas parcelas controlo. Durante o 2º período (Novembro 2005) os controlos não foram realizados, e os dados de repelência e física do solo foram extraídos então dos transectos “Ems”. Estes transectos são realizados semanalmente pela equipa do projecto EROSFIRE para monitorizar as mudanças dos solos depois do incêndio.

A humidade foi medida antes da simulação no topo e na base da parcela. Empregaram-se duas sondas inseridas na base da parcela (Theta Probe ML2 e Trime), para tomar valores cada minuto. Os dois aparelhos são espetados antes das provas e tomam-se três medidas: duas com o Trime (na base e no topo) e uma com o Theta (sempre na base da parcela). Durante as provas cada sonda permanece na parcela, e ainda ao finalizar a escorrência os aparelhos são trocados e as medições realizadas novamente no topo e na base das duas parcelas. Devido às avarias, por vezes não se pudo efectuar a medição. Esta é a razão pela qual no anexo 5 só algumas simulações apresentam a curva de humidade completa.

A escorrência também foi medida a cada minuto, e o tempo de início da escorrência foi anotado. Depois de uma hora de chuva, continua a ser medida a escorrência até esta acabar (considerou-se “sem escorrência” quando caem menos de três pingas por segundo), e o tempo final de escorrência é anotado. Os tempos de escorrência resultam em grande ajuda na análise dos hidrogramas, e definem muito bem o comportamento do solo face á retenção de água.

As **medições efectuadas** a distintas profundidades são as seguintes:

- Superfície do solo: Em cada um dos cinco pontos representados na Figura 3-4 direita se mediu a resistência à torsão e a penetração do solo (Torvane e Penetrómetro), a repelência à água pelo método MED e a espesura das cinzas.
- 2,5 cm: Em cada um dos cinco pontos mediu-se a repelência à água e a humidade (quer tirando amostras, quer espetando a sonda desde a superfície do solo)
- 7,5cm: Em cada um dos cinco pontos mediu-se a repelência à água e a humidade.
- 15 cm: Em cada um dos cinco pontos mediu-se a repelência à água e a humidade.

Para avaliar o **microrrelevo** foi utilizado um aparelho fabricado no próprio departamento. Consiste em 26 varas de alumínio com rebites na ponta que deslizam verticalmente sobre dois furos realizados num rectângulo de metal. Quando colocado a nível sobre uma micro-parcela cada vara sobe ou desce em função dos obstáculos que encontra na superfície do solo. As varas metálicas projectam-se contra um fundo preto e são fotografadas (Figura 3-5). Tiram-se 3 fotografias antes de escavar cada micro-parcela. Mediante um programa de tratamento de imagens (PMPProj⁸) as variações entre varas são medidas e escaladas. O desvio padrão das distâncias medidas para todo o conjunto de varas é utilizado como rugosidade (*ramdom roughness*). A partir dela será calculada a retenção superficial.

⁸ PMP new. Version 0.00 beta. Juha Kilpelainen, Agricultural Research Centre, Finland.



Figura 3-5. Medidor da rugosidade e entorno do programa de tratamento de imagens PMProj.

3.2 Análise laboratorial

3.2.1 Amostras de Solo.

Análise textural. A granulometria é uma das características mais estáveis do solo e uma vez que se dispõe desta informação não será preciso repetir a análise no tempo. Para separar as fracções granulométricas, argila, limo e areia é preciso delimitar previamente os limites entre cada uma delas. Os critérios para isto são arbitrários, e dependem dos objectivos propostos. Os critérios mais comuns são os propostos por Attenberg, adoptados pela ISSS⁹ ou os da USDA¹⁰ (Tabela 3-1). O segundo critério é o que vai ser escolhido para calcular o D50 e para utilizar na execução no modelo.

Tabela 3-1. Diâmetro e classes granulométricas mais importantes.

Classe	Attenberg classes				USDA classes			
	Argila	Limo	Areia fina	Areia grossa	Clay	Silt	Fine sand	Coarse sand
Diâmetro (um)	$\emptyset < 2$	$2 < \emptyset < 20$	$20 < \emptyset < 200$	$200 < \emptyset < 2000$	$\emptyset < 2$	$2 < \emptyset < 50$	$50 < \emptyset < 250$	$250 < \emptyset < 2000$
Radius (um)	1	10	100	1000	1	25	125	1000

A justificação dos valores adoptados para estabelecer os limites é assequinte (Porta et al., 1994):
<2 um. Argilas: partículas com importante carga eléctrica e alta superfície específica
20 um. Limite superior arbitrário do limo para a ISSS.
50 um. Limite superior do limo para a USDA. O predomínio de partículas de tamanho limo ($2 < \emptyset < 50 \mu\text{m}$) num solo confere-lhe características físicas desfavoráveis, instabilidade estrutural, apelmamento, susceptibilidade ao encrustamento superficial, deficiente movimento de água, etc. O predomínio da fracção ($50 < \emptyset < 100 \mu\text{m}$) favorece a formação de pequenos poros (microporosidade, 20-30 um) que tem pouca eficácia na transferência de água.

⁹ International Society of Soil Science em 1927.

¹⁰ United States Department of Agriculture.

200 um. Limite superior da areia fina para a ISSS. Abaixo deste valor os grãos dos minerais das rochas apresentam-se separados e podem-se realizar estudos mineralógicos às areias. Por cima dele entramos nas areias grosseiras, que conferem permeabilidade e macroporosidade altas.

2000um (<2mm). Elementos grosseiros. As forças de união são fracas, as partículas estão separadas e sem coesão ainda húmidas, permeabilidade muito alta e baixa retenção de água. O solo actua como um tamiz frente á água e não é capaz de fornecer nutrientes.

Depois desta descrição fica claro que o D50 vai ser um valor muito útil para conhecer o comportamento do solo, e será também calculado segundo Skaggs et al.2001.

Os nomes das classes tentam deixar evidente que certas fracções, ainda em igualdade de percentagens, estão mais acentuadas do que as outras para determinar as propriedades do solo e o comportamento da água e as plantas. As classes texturais foram obtidas para três amostras tiradas para três espessuras do perfil (0-5cm; 5-10cm;10-20cm) e não mostram grandes diferenças entre locais, se bem a tendência geral é para solos francos/ franco-alemãs.

O tratamento laboratorial da amostra começa pela separação dos elementos grosseiros (maiores de 2mm), o resto da amostra será tratado segundo o procedimento descrito segundo Botelho da Costa (1999). Para todas as amostras de solo foi calculada a **densidade aparente** (amostragem com anéis de metal de 5cm de comprimento e 68.67cm³), o conteúdo de **humidade**, (secagem em estufa durante 1 hora a 105 °C), e **matéria orgânica** (incineração na mufla durante 2 horas a 550°C). Na Escola Superior Agrária de Coimbra, dois sets de amostras¹¹ de cada área de estudo foram tratadas em base à obtenção da **textura** (decantação), e o **pf** (panela de pressão) segundo os dados texturais do solo de Attenberg e transformados depois para classes USDA segundo Skaggs et al., 2001.

3.2.2 Amostras de Escorrência.

Das amostras de escorrência foram calculadas as taxas de sedimentos por evaporação da água no banho de areia, secagem do sedimento em estufa durante 1 hora a 105 °C e pesagem. O teor de matéria orgânica foi calculado por incineração dos sedimentos na mufla durante 2 horas a 550°C.

3.3 Os modelos de Erosão.

O estudo da erosão hídrica superficial dos solos constitui um âmbito onde as tentativas de modelação tem sido abundantes desde há varias décadas. Os estudos iniciais foram validados à escala das parcelas agrícolas e com modelos puramente empíricos (Universal Soil Losses Equation, “USLE”; Wichmeier and Smith, 1978). Este modelo fornece um valor aproximado de remoção do solo, mas não é recomendável para quantificar as perdas de solo em eventos isolados nem para estudos ao nível de bacia.

A predição potencial das taxas de perdas de solos tem melhorado constantemente, desde as estimativas anuais médias fornecidas por modelos de base empírica -USLE e a sua versão revisada, RUSLE (Renard et al., 1997) – até as actuais estimativas de escorrência e erosão definidas para eventos chuvosos isolados obtidos com modelos de erosão cada vez mais complexos (Favis-Mortlock 1998; Morgan & Quinton, 2001; Toy et al., 2002).

De entre os modelos de aparição recente que simulam eventos chuvosos isolados encontramos:

¹¹ N=17, para cada um dos locais: 3 amostras de 0-5cm, 3 amostras de 5-10cm, 3 amostras de 10-15cm. Em Açores 1 só se tiraram 2 amostras de 10-15cm (ver também Tabela 4-2).

EROSION2D (Schmidh, 1991), EUROSEM (Morgan et al., 1998); KINEROS (Smith *et al.*, 1995), LISEM (de Roo et al., 1996a, b), WEPP (Flanagan & Nearing, 1995) e MEFIDIS (Nunes et al., 2005). As diferenças entre eles residem tanto na formulação empregada como nos objectivos para os quais foram desenhados.

Cada modelo tem as suas limitações para representar os processos erosivos (Jetten e tal., 1999, 2003), e isto conduz a um certo nível de incerteza na interpretação dos resultados. Ainda com as melhorias em modelação (discretização das escalas temporal e espacial, melhorias nas descrições dos processos) as simulações apresentam-se altamente variáveis e muito sensíveis aos parâmetros de entrada (Wu 1993, Jetten 1999 e 2003). Esta incerteza está relacionada com:

_Variabilidade nos dados de entrada

_Natureza não-linear dos processos de erosão e escorrência (Morgan, 2001; Jetten, 2003).

Isto pode melhorar-se com calibrações, mas calibrar para condições futuras não é possível, o que questiona a robustez dos modelos para a análise da mudança climática (Beven, 2000; Morgan, 2001). Um modelo **robusto** deve ser capaz de ser executado razoavelmente com valores similares de parâmetros (incluindo os mais dinâmicos), para a maior gama possível de condições. (Toy, 2002).

Modelar não é só introduzir uma série de dados e fazer correr o modelo. Um grande esforço é realizado para a construção de “sets” de dados de entrada, que normalmente derivam de umas poucas variáveis básicas, disponíveis como “dados originais”. O modelador tem de tomar uma série de decisões:

- a forma na qual as variáveis requeridas pelo modelo vão derivar desde os dados originais;

- a discretização espacial da área de estudo, e.d; o número, forma e tamanho das unidades espaciais seleccionadas;

- a direcção do escoamento dentro dos elementos espaciais e entre estes elementos.

As eleições vão depender muito da experiência do modelador e do grau de conhecimento que tenha acerca do modelo. Na Tabela 3-2 abordaram-se estas questões.

Também há que salientar que um bom conhecimento do local de estudo e da sensibilidade do modelo serão importantes para conseguir uma boa calibração. Por exemplo, um conhecimento qualitativo das actividades agrícolas, do grau de variação da estrutura do solo num determinado contexto climático, pode ser muito vantajoso para conseguir bons resultados (Jetten et al. 1999).

3.3.1 O modelo MEFIDIS.

MEFIDIS (Nunes et al., 2005) é o acrónimo português para “**M**odelo de **E**rosão **F**ísico e **D**istribuído”. O modelo foi desenvolvido no Departamento de Ciências do Ambiente da Universidade Nova de Lisboa, para o Ministério de Agricultura Português; pretende calcular o risco de inundação e degradação do solo associado a tormentas extremas em bacias de tamanho médio, em particular devido às mudanças climáticas e de usos do solo. Neste contexto, apresenta-se como um modelo válido para a avaliação da erosão em áreas queimadas e já está a ser utilizado para tal efeito no projecto EROSFIRE.

O modelo foi desenhado para ter em conta a distribuição espacial dos dados: a área de simulação foi dividida até à unidade homogénea mais pequena possível, e foram utilizadas equações simples de base física para simular a escorrência e a erosão em cada uma destas unidades. Combina uma distribuição espacial tipo raster e uma distribuição temporal completamente dinâmica para a predição de hidrógrafos de tempo variável. As equações foram escolhidas segundo a disponibilidade dos parâmetros, directamente das bases de dados existentes ou indirectamente via estimação à partir dos dados disponíveis (PTF, s). O modelo corre para eventos isolados (testado entre 20 min e 72 h) e a área de aplicação é uma bacia de tamanho pequeno-mediano (testada entre 0.05 e 120km²).

MEFIDIS simula padrões de erosão dentro de sub-bacias causados por eventos singulares de chuva (por tanto, tem de ser simulada tormenta a tormenta).

A modelação é:

- Determinística.
- Fisicamente baseada: a geração de escorrência e a denudação-deposição de sedimentos é simulada para cada célula com equações de base física.
- Espacialmente distribuída: a área é dividida numa grelha ortogonal, assumindo dentro dela condições homogéneas. As dimensões 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. Este estudo fará correr o modelo à escala de micro parcelas de 0.28 m².
- Dinâmica no tempo: 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 pode ser dividida em duas fases paralelas: geração de escorrência (são considerados como processos de geração de escorrência tanto o excesso de saturação como o processo Hortoniano) e denudação do solo (por salpicadura e erosão de fluxo) (Wu e tal., 1993).

1. Geração de escorrência. A equação de St. Venant é utilizada para simular à geração e direcção da escorrência a través da bacia. (Chow et al., 1988). A Equação de Continuidade tem em conta a intercepção e a infiltração:

$$\partial Q / \partial x + A / \partial t = R - I - F \quad (1)$$

Q= fluxo superficial (m³/s)

A= secção do fluxo (m²)

R= precipitação (m/s)

I= intercepção (m/s)

F= taxa de infiltração (m/s)

x,t = dimensões espacial (m) e temporal (s)

A evapotranspiração e o fluxo lateral sub-superficial não são simulados, pois na maioria dos casos acontecem numa escala de tempo maior à de um evento singular (Chow et al 1998). A equação é resolvida com uma aproximação de diferencial finito, usando um esquema de FTBS¹² (Huggins and Burney, 1982; Chapra, 1997)). Este método requer o uso de intervalos pequenos de tempo para assegurar a estabilidade dos resultados.

A taxa de intercepção é calculada segundo Linsley et al 1975, sendo função da máxima capacidade de retenção de água pela intercepção e a fracção de cobertura vegetal.

O modelo tem em conta a chuva, a infiltração e a retenção superficial da escorrência produzida. A infiltração é calculada segundo a equação de Green-Ampt (Chow et al., 1988):

$$F = K_{sat} [(\psi(1 - S_i)\Theta / F_c) + 1] \quad (2)$$

K_{sat}= Condutividade Hidráulica saturada do solo (mm/h)

Ψ = Potencial mátrico do solo (m)

S_i = Saturação em humidade no solo no início do evento (humidade inicial)

Θ = Porosidade do solo

F_c = Infiltração acumulada (mm).

¹² Forward-Time-Backwards-Space explicit scheme.

Simula também o excesso de saturação tendo em conta a água do solo dentro de cada célula. A retenção superficial de água é dependente da rugosidade superficial. A direcção da escorrência em cada célula é a que apresenta o máximo declive. A fracção de escorrência superficial é calculada por armazenamento nas depressões, sendo estimada pela máxima capacidade de armazenamento superficial e pela taxa de fluxos laterais (R-I-F na eq. (1)) segundo Linsley et al., 1975. O fluxo de saída de escorrência é calculado com a onda cinemática (Chow et al 1988):

$$Q=(A^{5/3}S^{1/2})/nP^{2/3} \quad (3)$$

S = declive (m/m)

n = Coeficiente de Rugosidade de Manning

P = Perímetro da superfície do fluxo ou perímetro molhado (m)

Q, A = definido em equação (1).

A largura do fluxo para deduzir o perímetro molhado é calculada pela fracção da célula coberta por água, o qual é uma aproximação da relação entre a altura da escorrência superficial e a capacidade máxima de armazenamento nas depressões. O fluxo de saída duma célula será o fluxo de entrada da célula adjacente situada imediatamente em baixo (Chow et al 1988).

2. Denudação do solo. A denudação do solo é considerada nos pequenos canais (**rills**), devida ao processo de erosão que produz o fluxo de escorrência (“flow erosion”) e nos pequenos interfluvios (interrills), devida à salpicadura das pingas da chuva (“rain splash”). É calculada com a equação de continuidade (Foster, 1992, Chapra, 1997). A equação é:

$$\partial(AC_{sed})/\partial t + \partial(QC_{sed})/\partial x = D_s + D_r \quad (4)$$

C_{sed} = Concentração de sedimentos no fluxo (Kg/m³)

D_s e D_r = taxas de produção de sedimentos nos interfluvios e canais respectivamente (Kg/m.s)

Q,A,t,x = definido na eq. (1).

A erosão em grandes canais (“gully erosion”) não é avaliada devido às incertezas associadas aos modelos actuais (Jetten et al., 2003). Esta equação é resolvida com uma aproximação de diferencial finito, usando o esquema FTBS (Huggins and Burney, 1982; Chapra, 1997).

A denudação do solo nos pequenos interfluvios (**interrills**) resulta apenas da salpicadura da chuva (splash erosion). A vegetação e a cobertura do solo tomam-se como protectoras face à denudação do solo; a taxa de denudação do solo em áreas sem cobertura protectora é calculada a partir da coesão do solo e da percentagem de argila, segundo Sharma et al., 1993. É assumido que todos os sedimentos produzidos nos pequenos interfluvios vão chegar ao fluxo de escorrência.

$$D_s = K_p E(i - i_c) R_h R_c A_s \quad (5)$$

K_p = denudação do solo por uma pinga de água (Kg/J)

E = energia cinética efectiva da chuva (J/m³)

i = taxa de precipitação (m²/s)

i_c = limiar da taxa de precipitação para o inicio da denudação do solo (m²/s)

R_h = taxa de superfície molhada (%)

R_c = taxa de superfície coberta por pedras ou vegetação (%)

K_p , E , i , i_c são função da *critical shear stress* e da fracção mássica de argila do solo (neste trabalho deduzimos estes valores a partir do torvane).

R_h está relacionado com o diâmetro das gotas de chuva (Ferreira and Singer 1985).

A denudação do solo nos pequenos canais (**rills**) é simulada com uma aproximação da capacidade de transporte de sedimentos (Foster 1982; Govers 1990). A capacidade de transporte do fluxo é calculada a partir da velocidade do fluxo e do tamanho das partículas do solo. Se esta capacidade de transporte numa célula excede os sedimentos em suspensão, mais partículas do solo serão denudadas e arrastadas. A taxa de denudação do solo é função do excesso da capacidade de transporte e da denudação do solo (calculada a partir da coesão do solo) (Rawls and Govers, 1988). Quando os sedimentos em suspensão excedem a capacidade de transporte do fluxo, o excesso de sedimentos é depositado.

$$D_r = Y(T_c - C_{sed})u_{sed}w dx \quad (6)$$

Y = factor de eficiência na deposição/denudação.

T_c = Capacidade de transporte de sedimentos do fluxo superficial (Kg/m^3)

C_{sed} = Concentração de sedimentos no fluxo (Kg/m^3)

u_{sed} = velocidade de sedimentação das partículas (m/s)

w = largura do fluxo (m)

dx = comprimento do fluxo (m).

Implementação

O MEFIDIS implementa-se como um programa baseado num ambiente Windows™ utilizando o pacote inovaGIS para interagir directamente com Sistemas de informação Geográfica (inovaGIS, 2001). O modelo é forçado pelo ponto de ruptura da chuva, e utiliza parâmetros derivados do valor médio da humidade inicial do solo. A altimetria e os mapas de direcção de fluxo têm de ser carregados no modelo, assim como localização dos canais, larguras, factor de rugosidade de Manning, etc.

3.3.2 Dados de entrada.

Os dados de entrada no modelo virão não só desde as simulações de chuva e da análise laboratorial mas também recorrendo a outros estudos na bibliografia e transformações para conseguir uma execução adequada do modelo. João Nunes facilitou as fontes e autores segundo os quais certos parâmetros de entrada serão calculados com funções de transformação (model input data):

Tabela-3-2. Parâmetros de entrada no modelo, dados originais medidos e cálculos de conversão (PTF’s em cinzento).

DADOS DE ENTRADA NO MEFIDIS	ABREV.	FONTE DADOS	DADOS ORIGINAIS	CALCULOS E F(X) DE TRANSFORMAÇÃO
Run Parameters				
Total time (min)	t(min)	Standard	Definidos pelo modelador	Tempo de execução= 90 minutos
Time step (s)	dt(s)	Standard	Definidos pelo modelador	Tempo de resolução= 1 segundo
Plot parameters				
Width (m)	wid(m)	Standard	Superfície da parcela (m ²)	Correção com o declive
Efective Saturation (%)	sat(%)	0-5 cm	Humidade inicial (%vol)	E.S.= % hum. inic/ oe% (saturação inicial da humidade do solo) (USDA classes)
Slope (m/m)	slope	Parcela	Declive da parcela (º)	(m)= tan(º)
Rain fall Parameters				
rainfall intensity (mm/h)	int(mm/h)	Calib. Lab.	Intensidade da chuva (mm/h)	Entrada directa
rainfall duration (min)	t(min)	Standard	Duração da simulação (min)	Entrada directa
Land Use parameters				
Roughness coef. (ks)	ks	Bibliog.	Manning's n	Ks = 1 / Manning's n (WSDTEES 1995)
Vegetation cover (%)	cover%	Grelha	Cobertura de vegetação (%)	Entrada directa
Pavement cover (%)	paved%	Grelha	Cobertura em pedras (%)	Entrada directa
Surface storage (mm)	s.ret.(mm)	Sup. solo	Medidor microrrelevo (cm), 3 perfis por parcela.	Programa pmproj + correção com o declive
Interception (mm)	intercept.(mm)	Bibliog.	Intercepção (mm)	Interception capacity (mm) a partir de Leaf Area Index
Soil type parameters				
Depth (m)	depth_m	Parcelas móveis, ctr	Perfil da parcela ou do controlo.	Entrada directa
Effective soil moisture capacity (%)	oe%	0-10 cm	Análise textural	Porosidade efectiva do solo (USDA classes, Saxton et al 1986)
capilarity presure (cm)	psi_cm	0-10 cm	Análise textural	soil water potential wetting front (USDA classes, Rawls et al 1983)
Ksat (cm/h)	k_cm/h	0-10 cm	Análise textural	Saturated hydraulic conductivity, Ksat (USDA classes, Saxton et al 1986)
Particle diameter (mm)	de_mm	0-5 cm	Análise textural	D50 (mm) (USDA classes, Skaggs et al 2001)
Critical shear stress (kPa)	toc_kPa	Sup. solo	Valores do Torvane	(kPa)= 0.1 * torvane value * 98)
clay fraction (%)	clay%	0-5 cm	Análise textural	(USDA classes, Skaggs et al 2001)

Os parâmetros introduzidos que provêm das características da superfície do solo são aqueles relacionados principalmente com a erosão (ks, cover%, paved%, s.ret. (mm), intercept. (mm), toc_kPa); os parâmetros introduzidos que vêm das características do solo no horizonte superficial (mediana 0-5 cm) influem em erosão e hidrologia (sat (%), de_mm, clay%); os que provêm das características do solo nos horizontes 0-5, e 5-10 cm (mediana) são os parâmetros relacionados com a hidrologia (psi, K_cm/h, oe %).

A **parametrização** é baseada nas medições de campo e laboratório, frequentemente transformadas a través de funções de pedotransferência. Definiram-se três conjuntos de valores que criam três cenários diferentes:

-as medianas dos valores, agrupados sob o termo “Cal ORIG”

-os máximos ou mínimos dos valores, dependente do parâmetro que maximizem a escorrência e erosão modelada, agrupados sob o termo “Cal max”

-os máximos ou mínimos dos valores, dependente do parâmetro que minimizem a escorrência e erosão modelada, agrupados sob o termo “Cal min”.

Agrupados na Calibração 1, esta parametrização constitui o ponto de partida sobre o qual será feita a calibração.

Para conhecer a **sensibilidade** dos parâmetros antes de calibrar o modelo calculara-se o factor adimensional S (Nearing et al., 1998) para as modelações acontecidas nas três parametrizações da Cal 1. Ainda que recomendável, não deu tempo à realização de uma análise da sensibilidade da calibração que deu melhores resultados.

$$S = \left(\frac{x_2 - x_1}{x_{12}} \right) / \left(\frac{I_2 - I_1}{I_{12}} \right) \quad (9)$$

Onde:

S = Medida adimensional da sensibilidade

I_1 = Valor inferior do parâmetro de entrada

I_2 = Valor superior do parâmetro de entrada

I_{12} = Média de I_1 e I_2

x_1 = Resultado da aplicação do modelo com I_1

x_2 = Resultado da aplicação do modelo com I_2

x_{12} = Media de x_1 e x_2

3.3.3 Estratégia de calibração -validação.

Para a calibração seleccionaram-se aleatoriamente 4 parcelas e os seus quatro respectivos eventos: A1-tb, A1-ta, A2-tb, A2-ta (16 simulações de chuva). As restantes parcelas serão utilizadas para a validação (18 simulações de chuva). Para cada uma das calibrações foram corridos também os três cenários. As sucessivas calibrações envolveram a melhora dos resultados de escorrência até obter resultados aceitáveis. Só depois procedeu-se a calibrar a erosão.

A execução do modelo será avaliada segundo o erro (bias), o coeficiente de correlação (equação 7) e o coeficiente de Nash-Sutcliffe da ASECE¹³ (equação 8). A priori, os erros positivos vão ser considerados mais adequados do que os erros negativos, isto é, preferira-se que o modelo sobrestime as perdas de erosão antes que a infra estime. Os dois coeficientes serão melhores ao aproximar-se do 1; o primeiro oscila entre 0 e 1 e o segundo entre $-\infty$ e +1. Enquanto que o coeficiente de correlação só mede a associação entre resultados modelados e observados, o coeficiente de Nash-Sutcliffe diz respeito ao erro e a variância entre resultados e tem de ser maior a 0.5 para dar resultados satisfatórios.

$$Coef. Correl = \left(\frac{Cov(X_m, X_r)}{\sigma_{X_m} \sigma_{X_r}} \right)^2 \quad (7)$$

Onde:

X_m = Amostra de resultados modelados

¹³ American Society of Civil Engineer, em Barry et al., 1993.

X_r = Amostra de resultados reais.

$$Coef.N - S = 1 - \left(\frac{\sum (x_m - x_r)^2}{n-1} \right) / \frac{\sum (x_r - \bar{x})^2}{(n-1)} \quad (8)$$

Onde:

x_r = Resultado real

x_m = Resultado da aplicação do modelo

$$\left(\frac{\sum (x_m - x_r)^2}{n-1} \right) = \text{Soma quadrada dos resultados modelados menos os resultados reais,}$$

$$\frac{\sum (x_r - \bar{x})^2}{(n-1)} = \text{Variância dos valores reais.}$$

Das nove variáveis de saída que gera o MEFIDIS (Tabela 3-3) escolheram-se a escorrência e a erosão acumulada para cada evento. O modelo permitiria ainda realizar uma análise do processo hidrológico e erosivo durante o evento, com intervalos de tempo até de um segundo, mas só será abordada a análise dos valores acumulados durante uma hora destes dois parâmetros.

Tabela 3-3. Variáveis de saída do modelo.

Interception (mm)	Infiltration (mm)	Surface_Detention (mm)	Runoff (mm)	Shear_Erosion (Kg)	Splash_Erosion (Kg)	Soil_Detachment (Kg)	Deposition (Kg)	Erosion (Kg)
----------------------	----------------------	---------------------------	------------------------------	-----------------------	------------------------	-------------------------	--------------------	-------------------------------

4 RESULTADOS

4.1 Descrição dos locais e parcelas de estudo.

4.1.1 Características dos povoamentos ardidos e intensidade do incêndio.

Estima-se que os dois povoamentos ardidos tinham uns 6-7 anos, mas se trata da segunda ou até terceira rotação. A maior diferença entre os dois povoamentos é que Açores 2 foi lavrado provavelmente uns 6-7 anos antes na direcção do maior declive, enquanto que Açores 1 não apresenta nenhuma evidência de lavragem (ver anexo fotográfico).

Com base nos indicadores seleccionados estima-se que a intensidade do incêndio foi média (Tabela 4-1). A altura que as chamas atingiram sugere que pode ter havido uma maior intensidade nas partes inferiores do que nas partes superiores das duas encostas.

A selecção de indicadores da intensidade do fogo deriva dos estudos vários autores. Tem-se verificado que a relação da intensidade do fogo com a intensidade da repelência é directa (Doerr et al. 2000) mas resulta complicado discernir se esta foi produzida pelo incêndio ou existia como consequência do povoamento de eucaliptos. A cor das cinzas pretas denota combustão incompleta porque existe matéria orgânica residual. Quando a combustão é completa as cinzas são brancas ou cinzentas, e tem composição mineral (Giovanini 1990). A altura dos ramos queimados e a combustão incompleta das copas tem a ver com a carga combustível disponível. Se o fogo não é de copas (todas as folhas e ramos são consumidos) a intensidade do incêndio não se pode considerar alta (De la Vega¹⁴).

Tabela 4-1. Características dos povoamentos e indicadores da intensidade do incêndio. DBH valor mediano numa amostra de 10 arvores por secção; n=90.

		<u>Características da floresta</u>				<u>Indicadores da intensidade do incêndio</u>				
		Ciclo de rotação	Lavragem	DBH (topo/base)	Idade arvores	Hidrofob.	Cor cinzas	Sup. solo queimada (topo/base) ¹⁵	Altura dos ramos queimados (topo/base)	Copa queimada (topo/base)
Açores 1	Parcelas móveis	3°	não	24/26	6-7	muito forte	preta	parcial/total	4/6	não/parcial
	Parcelas fixas	3°	não	9,5/24	6-7	extrema	preta	total	8/9	parcial
Açores 2	Parcelas móveis	2°-3°	vertical	19/23,3	7	muito forte	preta	total	4/5	parcial
	Parcelas fixas	2°-3°	vertical	14,5/15	7	extrema	preta	total	10/12	parcial

4.1.2 Perfis e Textura do solo.

Foram escavados quatro perfis em cada encosta em Novembro do 2005 e classificados como litosóis¹⁶ (FAO 74). Segundo a FAO 88 encontram-se algumas variações entre os topos

¹⁴ Comunicação pessoal: fogo de copas é sinal de alta intensidade do fogo.

¹⁵ topo da encosta/ base da encosta.

das duas encostas (Ranker e Litosol-Ranker) e as bases (Cambisol húmico). A carta de solos de Portugal 1:1.000.000 descreve para a região solos tipo Cambisol húmico e em senso mais amplo Litosóis dístricos (Cardoso et al., 1971, 1973). A profundidade esteve entre 10 e 40cm em Açores 1, e de 5 até 35 em Açores 2. Existe um horizonte O convertido parcialmente em cinzas (0.5-2 cm), e um Ah (30-40 cm em Açores 1 vs. 5-35cm em Açores 2) sobre um horizonte R de xistos. Açor 1 tem uma exposição sul, com um declive de 20° e com afloramentos ocasionais da rocha mãe à superfície. Em oposição Açores 2 tem exposição norte e declives de 15° lavrados verticalmente.

Durante as simulações de chuva dos transeptos móveis foram recolhidas 17 amostras de solo até uma profundidade de 20 cm, e posteriormente analisadas no laboratório de solo da ESAC (Lucena, 2006). A classificação textural é arenosa a franco – arenosa, com uma tendência para franca e m Açores 1 e um pouco mais grossa em Açores 2 (Tabela 4-2). A percentagem de argila e de matéria orgânica é maior em Açores 1. Estes valores estão em concordância com os resultados de outros autores para os solos da cara oeste da vizinha Serra do Caramulo (Terry, 1992; Ferreira et al., 2000; Shakesby et al., 2000).

A percentagem de elementos grosseiros (maiores de 2000um) é muito alta¹⁷, o qual pode ser devido a dois motivos: ou bem é uma característica natural associada aos solos xistosos e à evolução dos processos geomorfológicos ou bem é um sinal da erosão acontecida na área desde o começo da plantação florestal.

Tabela 4-2. Textura e matéria orgânica do solo (Lucena J., 2006), segundo Attenberg e ISSS (n=17).

Local	Exposição, posição na encosta	Profund. (cm)	n	Matéria orgânica (%)	Areia grossa (%)	Areia fina (%)	Limo (%)	Argila (%)	Classe Textural
Açores 1	Base	0-5	3	10,3	37,0	25,2	24,0	12,7	Franca
		5-10	3	10,4	32,6	28,8	24,9	12,2	Franca
		10-20	2	11,2	35,8	29,1	24,9	10,2	Franco-arenosa
Açores 2	Topo	0-5	3	9,0	36,0	34,9	20,3	7,0	Franco-arenosa
		5-10	3	8,6	37,3	32,4	23,0	7,2	Franco-arenosa
		10-20	3	8,4	39,7	34,3	20,6	6,7	Franco-arenosa

Como já foi referido no subcapítulo 3.2.1, as classes texturais que vão ser utilizadas na modelação são as da USDA, as quais consideram às argilas e limos com uma gama maior de diâmetros do que a ISSS.

¹⁶ Litosol. do grego: *lithos* "pedra"; do latim: *solum* "solo".

¹⁷ Entre 70 e 80%. Jorge Lucena, comunicação pessoal.

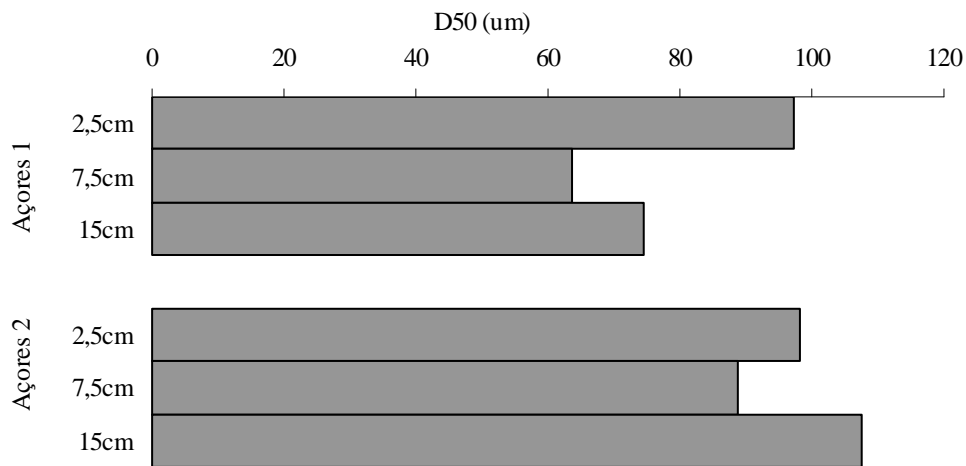


Figura 4-1. D50 segundo Skaggs et al, 2001 (n=17).

O diâmetro de partícula é utilizado na modelação como um parâmetro de entrada que controla a erosão, uma vez que o tamanho das partículas influirá na remoção e transporte. Na modelação serão empregados os valores de 2,5cm, e na Figura 4-1 não se podem apreciar diferenças nos valores médios para 2,5 cm entre Açores 1 e 2 (97.3um vs. 98.3 um).

4.1.3 Erodibilidade do solo.

A erodibilidade do solo foi obtida a partir dos valores do torvane e penetrómetro medidos no controlo de cada par de simulações. Na Figura 4-2 pode-se apreciar que globalmente Açores 2 é mais resistente do que Açores 1.

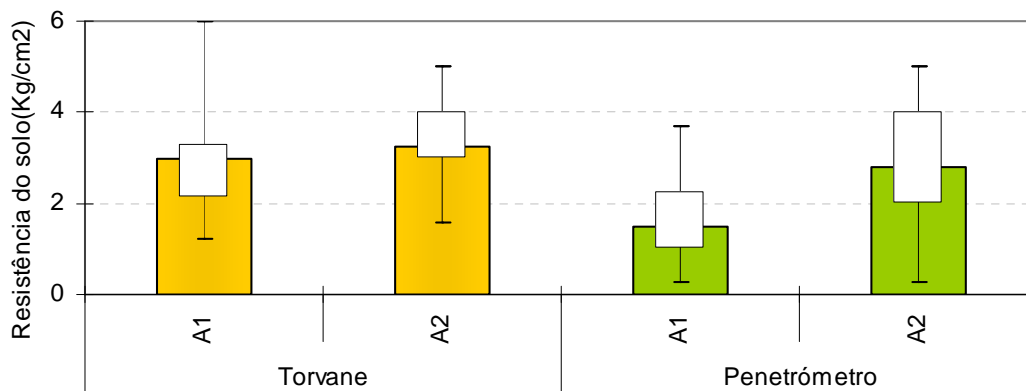


Figura 4-2. Resistência do solo à torção e penetração (mediana, 1º e 3º quartil, max e min. n=180).

A Figura 4-3 mostra a evolução temporal da resistência do solo dividindo as encostas em topo e base. A tendência na base das encostas é para valores mais fracos do que nos topos (mediana 3.0 vs. 3.5 para torvane e também 1.9 vs. 2.5 para penetrómetro, n=180). Respeito da evolução temporal, pode-se apreciar que Açores 1 tem maiores irregularidades, com máximos que atingem os 6kg/ m², enquanto que Açores 2 aparece estável entorno a 4 kg/c m². A resistência mecânica dum solo à deformação e a fluir sob acção de forças mecânicas depende do seu conteúdo em humidade (Porta et al., 1994). Entre os diferentes períodos não houve diferenças significantes entre o período húmido (3º) e os outros períodos (R2=0.054). Sim que houve diferenças maiores entre as medições efectuadas nos controlos e nas parcelas móveis já molhadas (3.3 vs. 2.9kg/c m²).

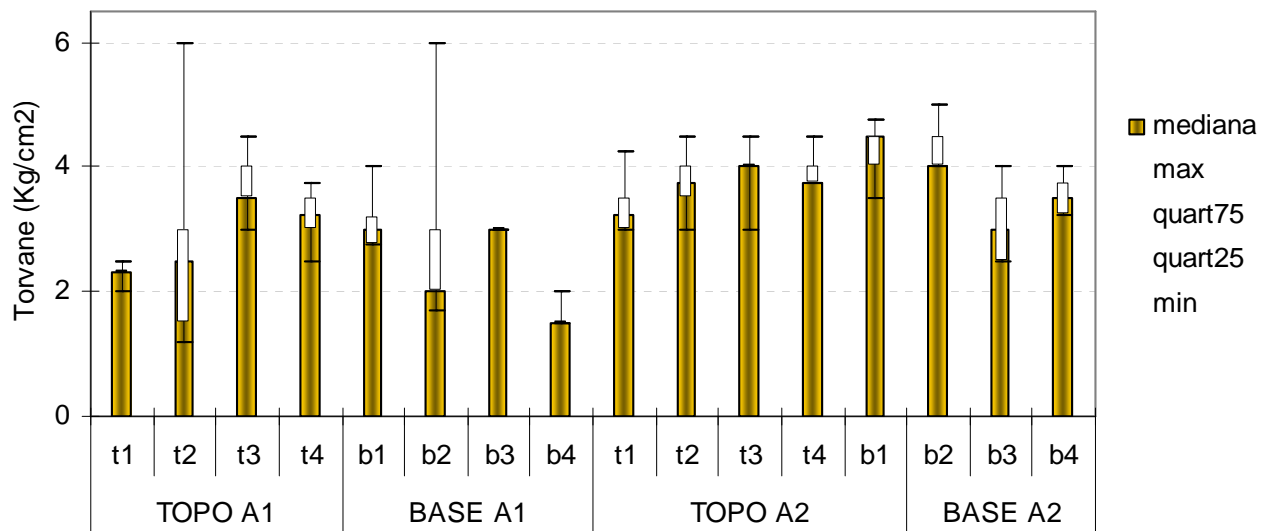


Figura 4-3. Valores do Torvane obtidos para cada secção do declive.

4.1.4 Microtopografia.

A Figura 4-4 mostra os valores máximos, mínimos e medianos da rugosidade das três medições efectuadas em cada parcela. Os dois locais têm rugosidade semelhante, apesar de que Açores 2 está lavrado. Os valores médios vão de 1,11 cm para Açores 1 e 1.3 cm para Açores 2. A rugosidade irá definir a capacidade de retenção superficial. Em termos globais as duas áreas vão ter comportamentos parecidos, mas existem algumas diferenças entre parcelas. Em Açores 1 as parcelas fixas têm rugosidades mais amplas. Existem duas parcelas quase planas (tb- 1.23 e bb- 0.85cm) e outras duas muito irregulares (tb-1.89 e ta- 1.81cm). Aleatoriamente foram coincidir com simulações de baixa e alta intensidade. Por enquanto, em Açores 2 as parcelas, ainda que com morfologia em cômoros (bb-) e vales (ta- e ba-) têm rugosidades homogêneas em torno a 1.2 cm.

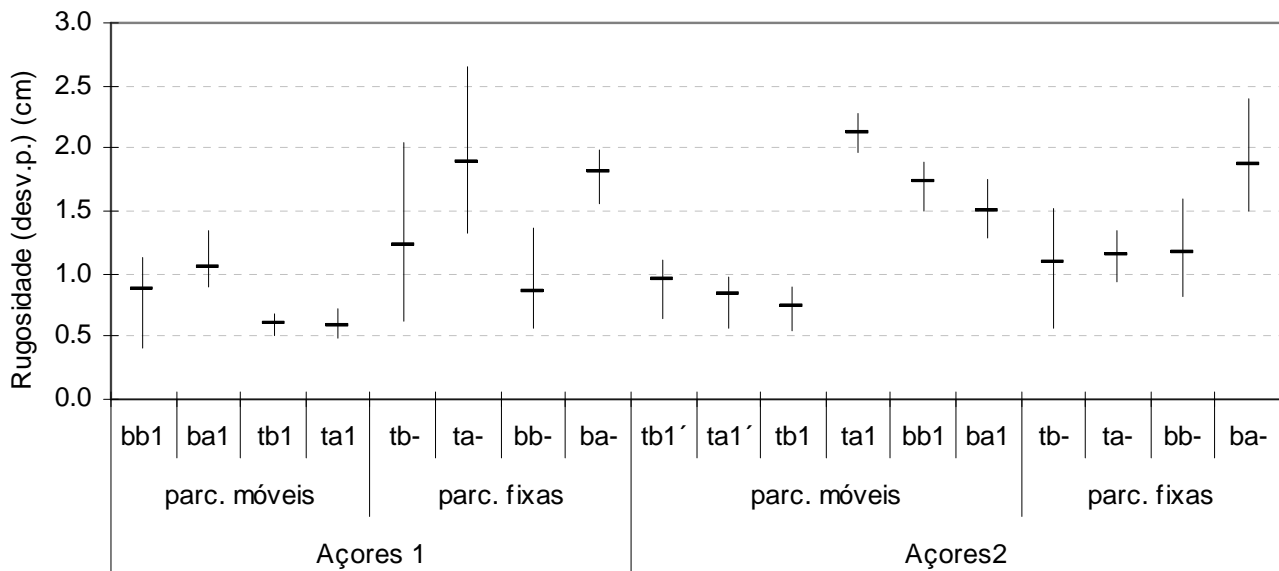


Figura 4-4. Rugosidade das 10 parcelas móveis e das 8 parcelas fixas estudadas (n=54).

4.1.5 Repelência e humidade inicial

Enquanto a repelência, segundo a Figura 4-13 podemos tirar algumas conclusões:

1º.- A camada de cinzas, teve repelência muito baixa durante todo o período excepto no fim, que sobre todo na base do declive de Açores 2 atingiu valores da mediana de 4 e até um máximo de 5 (classe MED).

2º.- Existem dois períodos de repelência, o primeiro mais intenso do que o segundo, separados por um período de repelência baixa, na data de Março Abril.

3º.- A repelência diminui em Abril devido às chuvadas antecedentes (ver fig. 4-3) para todas as camadas.

4º.- Os valores são extremamente altos no primeiro período, (com medianas de 7 e 8 classe MED) mas são menores e mais heterogêneos do que no segundo período (de 8 a 5 para Açores 2; e classe 5 para Açores 1). Pode ser observada uma recuperação da repelência em Açores 2 maior do que em A1; isto é; no site A2 a repelência recupera melhor do que em A1. Isto resulta certamente contraditório com os altos valores de escorrência que se produziram em A1 (fig. 4-13). Para Julho 2006: 24.9 e 7,13 no topo; 13.52 e 4.13 na base em A1, frente a 2.6 e 7.34 no topo e 2.2 e 0.3 mm na base em A2); encontrando então que o site que tem menor repelência gera mais escorrência.

5º.- Quando analisada por profundidades, verifica-se que a superfície do solo foi a que apresentou uma repelência mais continua (os valores máximo e mínimo apenas se afastam um valor da mediana). Na superfície do solo na base do declive de Açores 2 foram encontrados os valores maiores, seguidos do topo de Açores 1. Nos dois casos a repelência foi restabelecida de novo em Julho 2006 até a classe 8. Mas a homogeneidade da camada repelente, segundo o desvio padrão dos valores é menor do que no primeiro período.

Teremos em conta principalmente estes dados para estabelecer as directrizes gerais de repelência.

6º.- A dispersão da repelência aumenta claramente com a profundidade, especialmente na base de Açores 2 e no topo de Açores 1. Estes dois lugares são também os que ficaram mais hidrófobos no final do período estudado. Abaixo da superfície do solo, a repelência é mais heterogênea, encontramos amplas variações nas medições (1-8 unidades MED).

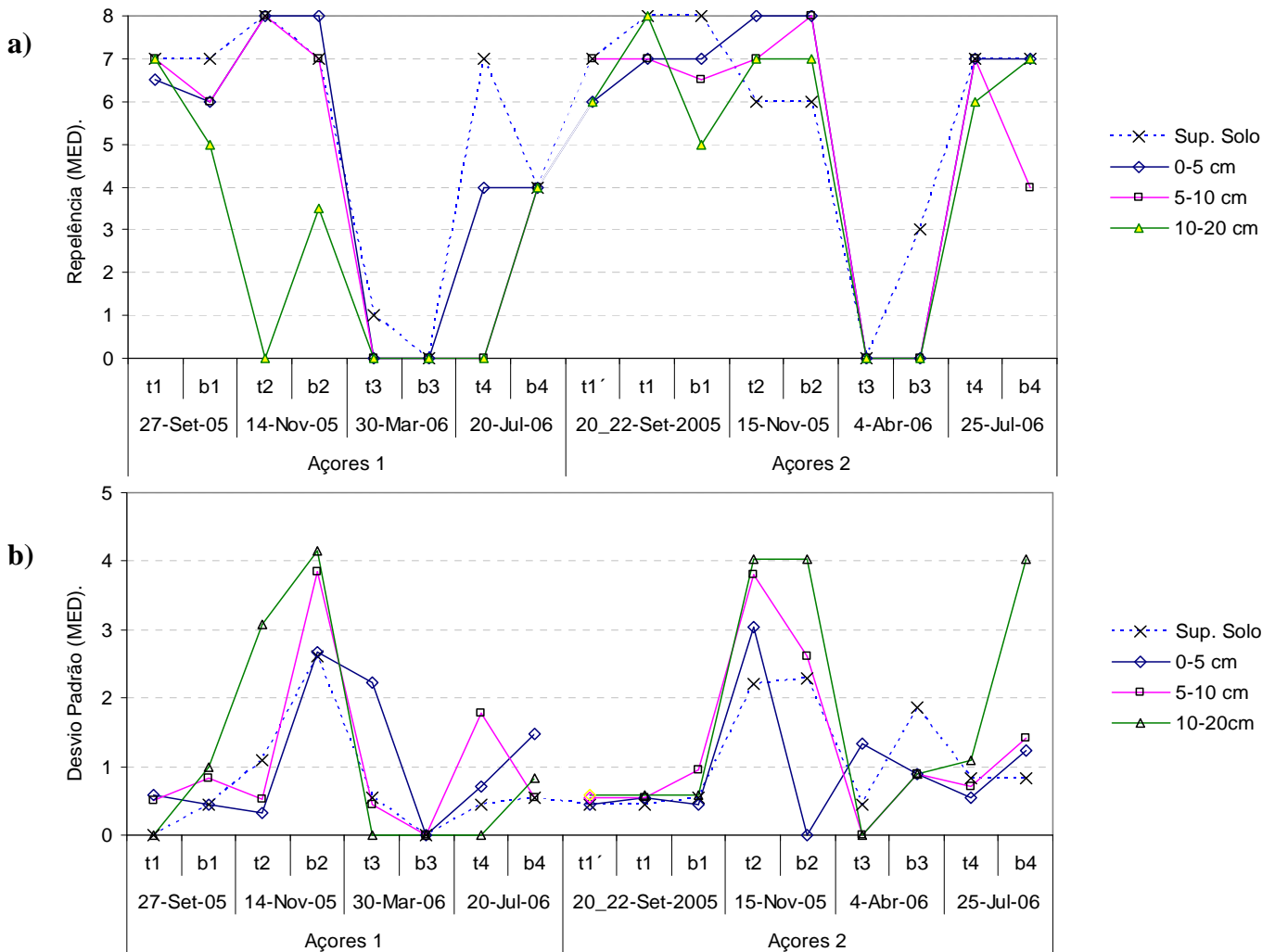


Figura 4-5. a) Mediana da repelência e b) desvio padrão por posição no declive (t=topo; b=base) e desvio padrão da repelência para Açores 1 e 2.

Enquanto à humidade podem ser esgrimidas algumas diferenças para cada área:

Açores 1:

Humidade baixa nas primeiras provas (solo repelente), no período húmido a base (25% humidade em volume) retêm mais humidade do que o topo (perto 10%); e consequentemente a escorrência é maior (0.87;39.02mm no topo e 25.59;51.32mm na base)

Açores 2:

Humidade também baixa nas primeiras provas (solo repelente), no período húmido os solos de A2 retêm menor quantidade de agua, e a base retêm igual quantidade que o topo (perto 10%). No entanto as escorrência são menores do que em A1 (0.1; 34.34mm no topo e 5.6;0.31mm na base).

Este comportamento pode ser explicado uma vez que é verificado o desaparecimento da repelência. Então a escorrência fica dependente da saturação do solo e é maior naqueles locais onde a humidade é também maior: A1 na base.

Quando a hidrofobia volta a aparecer em Julho de 2006 aparecem resultados contraditórios.

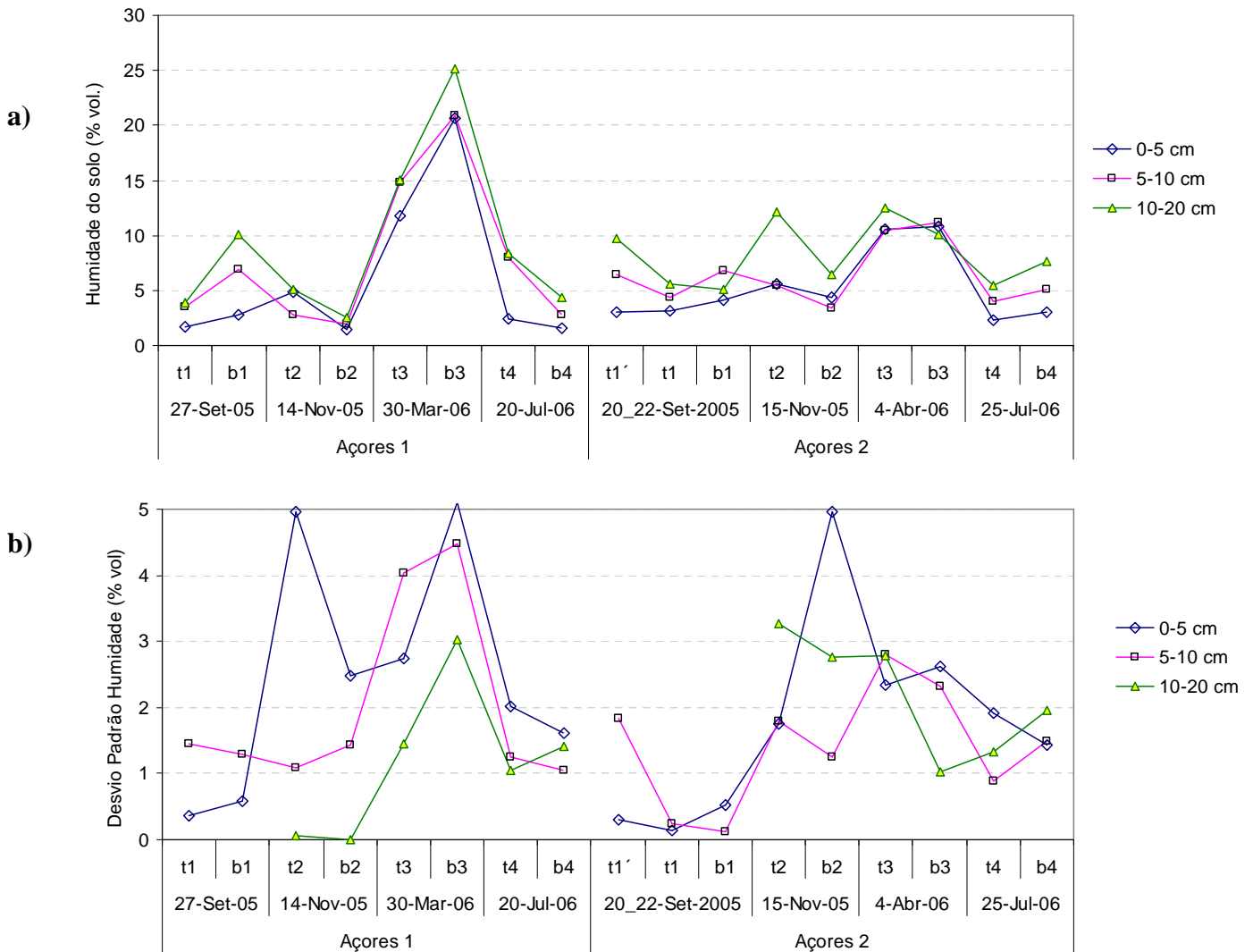


Figura 4-6 a) Mediana da Humidade do solo e b) desvio padrão por posição no declive (t=topo; b=base) e desvio padrão da repelência para Açores 1 e 2.

4.1.6 Coberto do solo.

A Figura 4-2 mostra o coberto de dois dos parâmetros de entrada no modelo (vegetação e pedras) e de outros três cobertos importantes na geração de escorrência e sedimentos. As principais tendências apontam para uma diminuição das cinzas com o tempo (mais acentuada em Açores 1, sobre todo na parcela ba, que registou a máxima erosão). Consequentemente a cobertura de pedras e de solo nu vai incrementando-se. Em Açores 2 o coberto de litter é maior do que em Açores 1 e influenciou levemente na produção de escorrência (correlação linear litter vs. escorrência $r=-0.36$, Anexo4). A vegetação aumenta entre Novembro e Abril (2º e 3º período), sobre todo em Açores 1 (um arbusto cresceu muito rapidamente na parcela ta de Açores 1, chegando a valores maiores de 20% (ver anexo fotográfico).

As diferenças entre parcelas são bastante importantes. As de Açores 1 têm cobertos de pedras em torno a 40%, enquanto que em Açores 2 não atinge o 20% (Só a parcela A2-bb tem teores similares aos de Açores 1). Em Açores 1 a redução na cobertura de cinzas está relacionada com a aparição das pedras que estavam por baixo (a parcela A1-ba passou de 50% para 6% de

cinzas), enquanto que em Açores 2 a diminuição das cinzas também é devida ao aumento do litter (na parcela A2-ba o litter passa de 0% para 40%). Os cobertos de litter e vegetação podem-se sobrepor e ocultam a superfície do solo, enquanto que o coberto de pedras, cinzas e solo nu são excludentes.

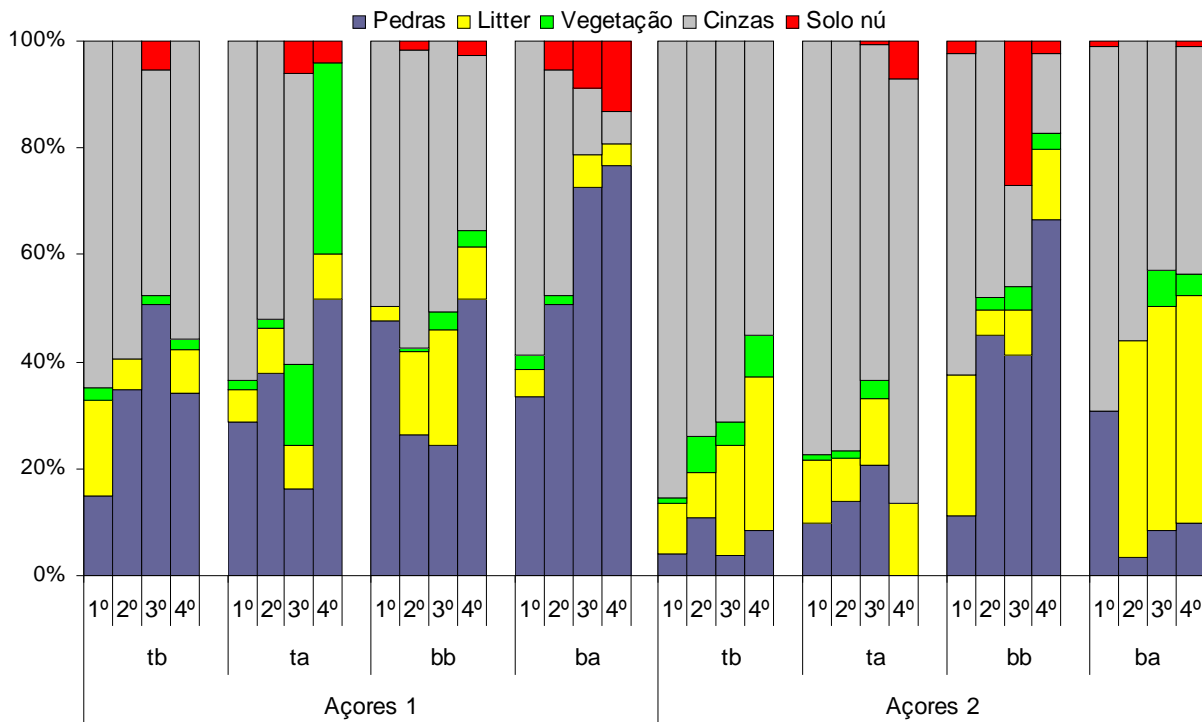


Figura 4-7 Evolução do coberto do solo nas diferentes parcelas.

Avaliou-se também a aparição de sinais de erosão (pedestais¹⁸ e regos ou pequenos canais). A aparição destes fenómenos pode não ser devida exclusivamente a este incêndio. Noutros estudos foi verificada a presença de pedestais sob uma densa protecção vegetal (Projecto PHOENIX), indicando que o período erosivo que os formou parou no passado, e na actualidade a vegetação evita que continuem a crescer.

4.1.7 Condições climáticas antecedentes.

As quatro repetições ou períodos nos quais se realizaram as simulações tiveram a influência das chuvas naturais registadas anteriormente a essas datas.

A Figura 4-12) mostra a precipitação diária desde o incêndio (zeta) até ao fim das simulações desta tese. Permite verificar que as quatro épocas de amostragem diferem em termos de condições climáticas antecedentes, sendo estas muito mais secas na primeira e última época. A Figura também transparece que as simulações da mesma época diferem em termos da precipitação antecedente, excepto no caso da 1ª época. Assim os resultados obtidos nas duas encostas poderão estar afectados em termos da sua comparabilidade directa. Esta possibilidade parece ser bastante real no caso da 3ª época, com uma humidade do solo bastante maior em Açores 1 do que em Açores 2 (Tabela 4.5).

¹⁸ Pequenos montículos de solo que fica protegido do impacte da chuva baixo uma pequena pedra. Quanto maior é o processo erosivo, esperam-se encontrar pedestais maiores.

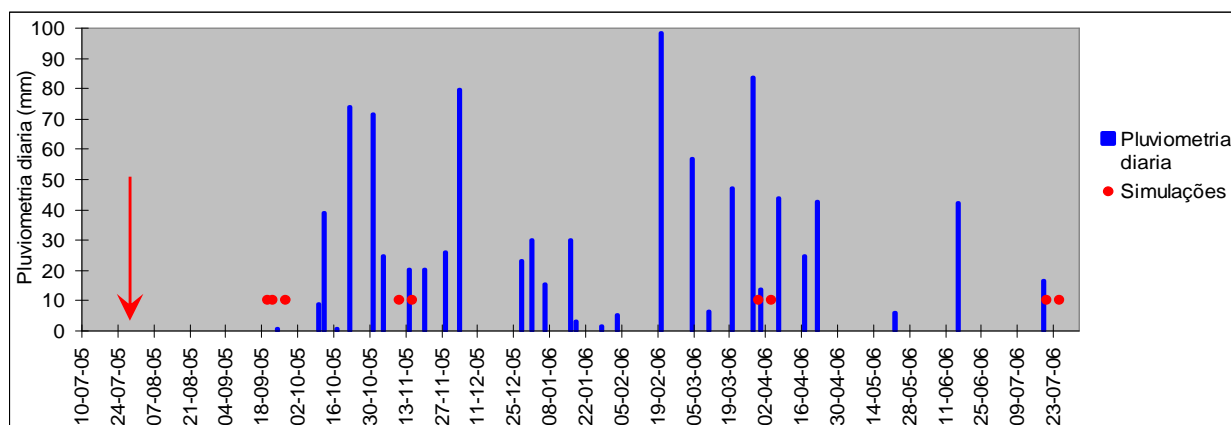


Figura 4-8: Pluviometria diária registada durante o período de estudo e momentos nos quais as simulações foram efectuadas.

Os eventos que podiam estar a pôr em risco a comparabilidade entre provas nos dois locais aconteceram nas primeiras, segundas e terceiras repetições. A Tabela 4-3 compara a humidade inicial do solo dos locais nas datas das simulações que teriam de ser simultâneas e mostra a pluviosidade caída no meio dessas provas. Que estas chuvas afectam as condições iniciais de humidade e repelência do solo é um facto, mas não dispomos de dados suficientes para avaliar a intensidade desta mudança. Contudo, temos uma ideia da magnitude das diferenças observadas entre os locais nessas datas tão próximas. Iremos considerar desprezáveis essas variações em base a que:

- 1º Realizámos sempre medições das condições iniciais imediatamente antes de cada experiência,
- 2º Não se pretende monitorizar a evolução da humidade do solo das áreas de estudo fora do que são as simulações de chuva,
- 3º As alterações não parecem ser de grande importância, a teor dos dados mostrados na Tabela 4-3 (ver também comentários no capítulo repelência (Crokford et al, 2002) estabilidade da repelência).

Tabela 4-3. Data, local e humidade inicial (% volume) das simulações que aconteceram antes do evento chuvoso, data e pluviosidade do evento que podiam comprometer a comparabilidade entre simulações e data, local e humidade inicial das simulações que aconteceram depois do evento.

Repetições	Data simulações (local);humid. solo.	Evento chuvoso	Data simulações (local);humid. solo.
1ª	20 Set. (A2); 3,0%	Não houve	22 Set. (A2); 3,61%
	22 Set. (A2); 3,61%	24 Set.: 0,8 mm	27 Set. (A1); 2,26%
2ª	10 Nov (A1); 4,08%	14 Nov: 20,2mm	15 Nov. (A2); 5,01%
3ª	30 Mar. (A1); 16,28%	31 Março: 14 mm	4 Abr. (A2); 10,72%
4ª	20 Jul. (A1); 2,15%	Não houve	25 Jul. (A2); 2,4%

4.2 Precipitação e Escorrência.

4.2.1 Precipitação simulada.

Para validar a intensidade da chuva realizaram-se um grande número de calibrações, tentando obter três calibrações consecutivas semelhantes. Nas Figura s 4-9 (baixa intensidade) e 4-10 (alta intensidade) são mostradas três séries: a intensidade dos copos exteriores medidos no laboratório (quadros grandes) e no campo (quadros pequenos); a intensidade utilizada nas

simulações de chuva no campo com o valor médio da intensidade da parcela obtida no laboratório (linha contínua) e ainda se mostra uma “intensidade calculada”; onde a intensidade da parcela aparece como função dos copos exteriores (a partir da equação da recta) uma vez que são testemunhas das variações na intensidade.

A Figura 4-9 mostra os resultados finais das calibrações efectuadas no laboratório dos nozzles de baixa intensidade. Nas três ocasiões conseguem-se intensidades de calibração bastante semelhantes para três calibrações consecutivas. Os coeficientes de Christiansen das calibrações variam entre 76.17% e 68.56%, assim que a homogeneidade foi inferior à obtida por Cerda et al (1997; 93.2%). Esta diferença deve-se, pelo menos em parte, ao facto de se ter optado por parcelas quadradas em vez de circulares. O “spray” cónico inerente aos nozzles empregados é ilustrado na Figura 4-11.

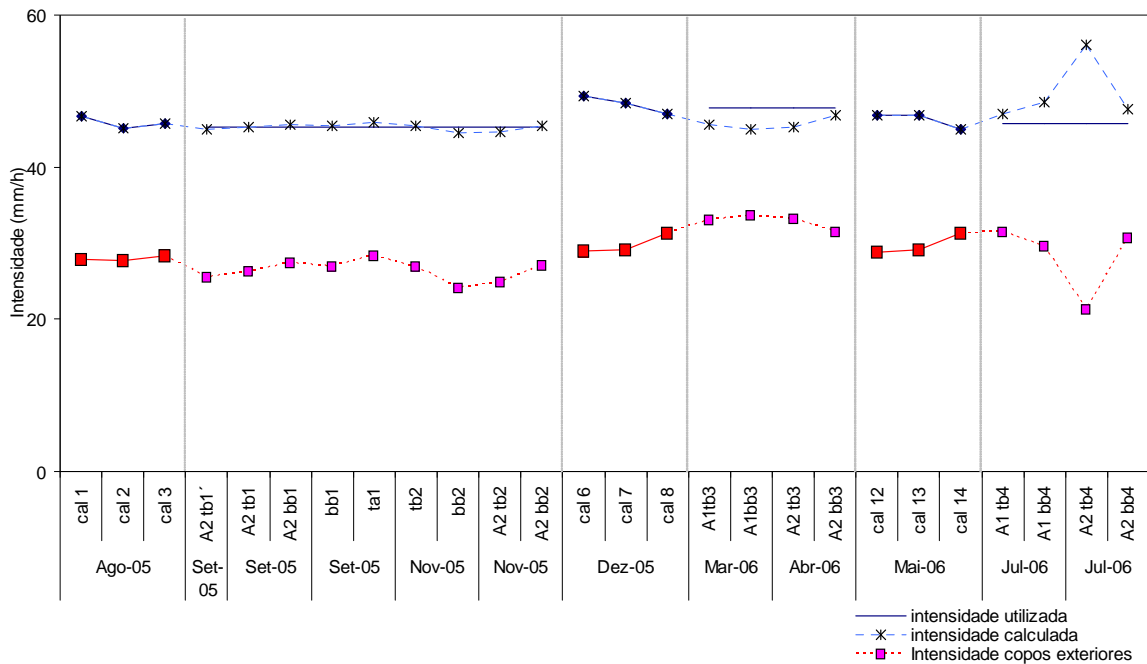


Figura 4-9. Calibrações e simulações com os nozzles de Baixa intensidade de chuva.

A Figura 4-9 também mostra a intensidade para um conjunto de três copos localizados fora da parcela. Permitem alguma validação das intensidades obtidas durante as simulações de campo, embora seja de realçar que sobretudo as medições no campo estão sujeitas a erros, devido à dificuldade de colocar os copos em terreno de forte declive. Mesmo assim, é possível afirmar que, por um lado, as intensidades medidas no campo são bastante constantes (Figuras 4-9 e 4-10), e por outro, que as simulações de alta intensidade produzem mais variabilidade, sendo as intensidades dos copos exteriores mais sensíveis e apenas foi possível obter as três calibrações consecutivas (Figura 4-10).

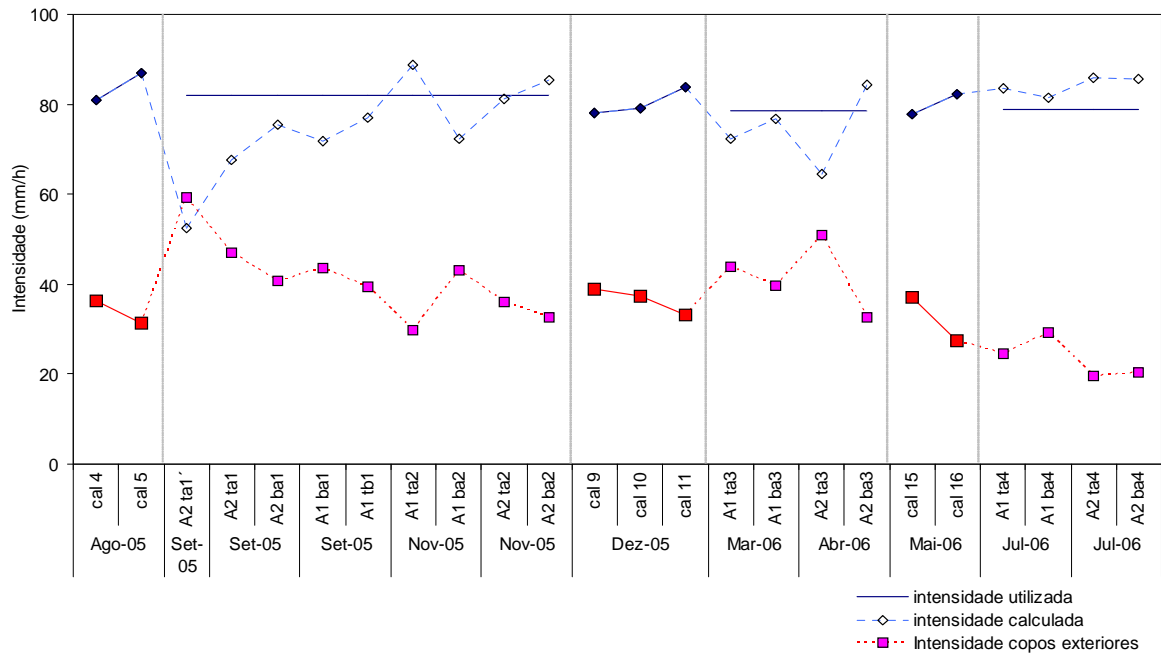


Figura 4-10. Calibrações e simulações com os nozzles de Alta intensidade de chuva.

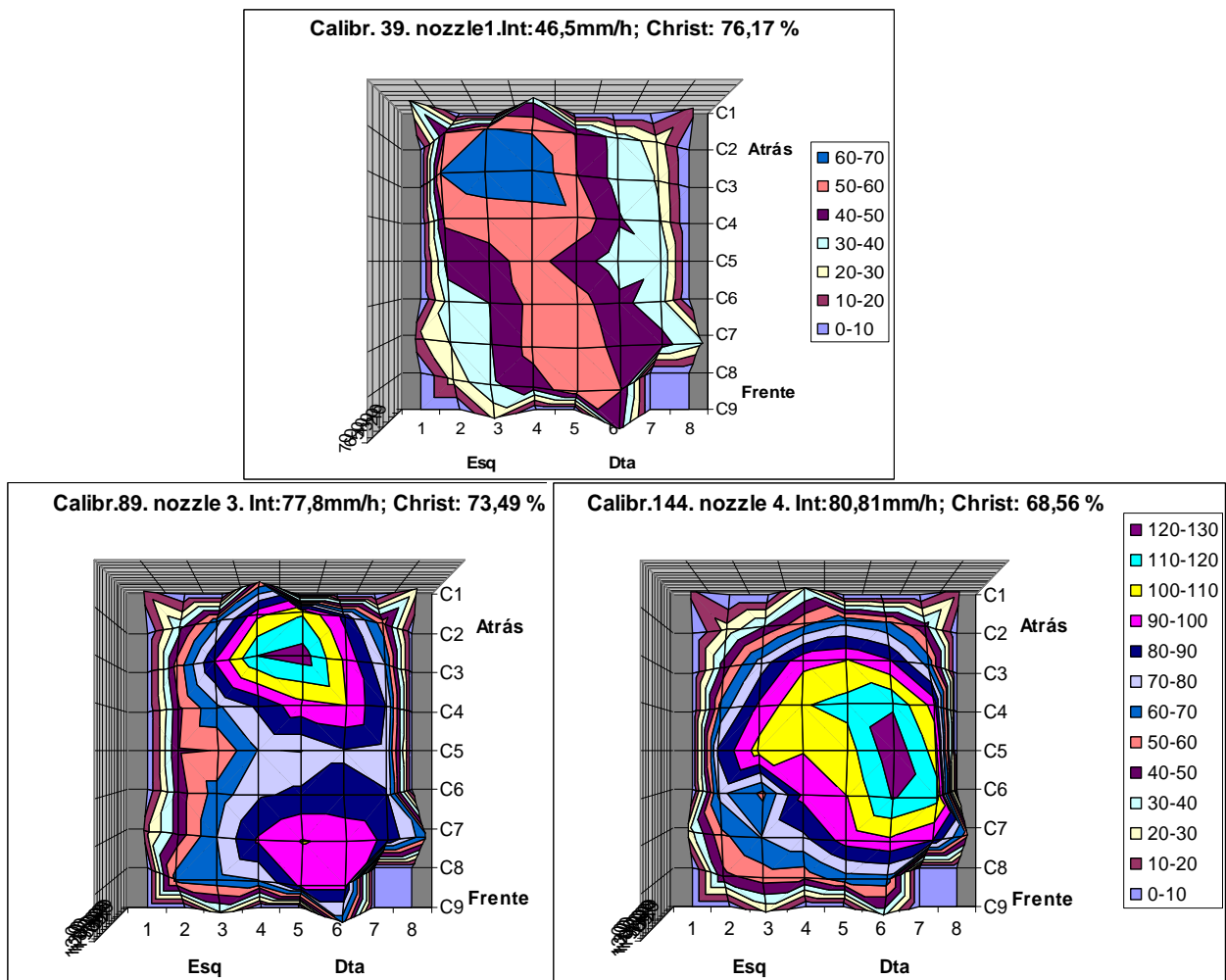


Figura 4-11: Distribuição espacial da intensidade produzida pelos nozzles empregados.

4.2.2 Variação com a Intensidade da chuva.

A Figura 4-12 resume a produção de escorrência para as simulações de alta e baixa intensidade ao longo do período de estudo. Em termos relativos (Figura 4-12 esquerda) a intensidade da chuva artificial não parece ter uma influência importante. Tanto os valores medianos (52,1 nas baixas vs. 48,6 % nas altas) como os valores do 1º e 3º quartil (11,6 vs. 9,1%; 73.1 vs 69.9%) diferem pouco. Isso implica, no entanto, que as quantidades absolutas (Figura 4-12 direita) que infiltram e/ou ficam retidas (pelas cinzas, a vegetação, etc.) são aproximadamente o dobro no caso da alta intensidade do que na baixa intensidade (24 vs. 40mm¹⁹).

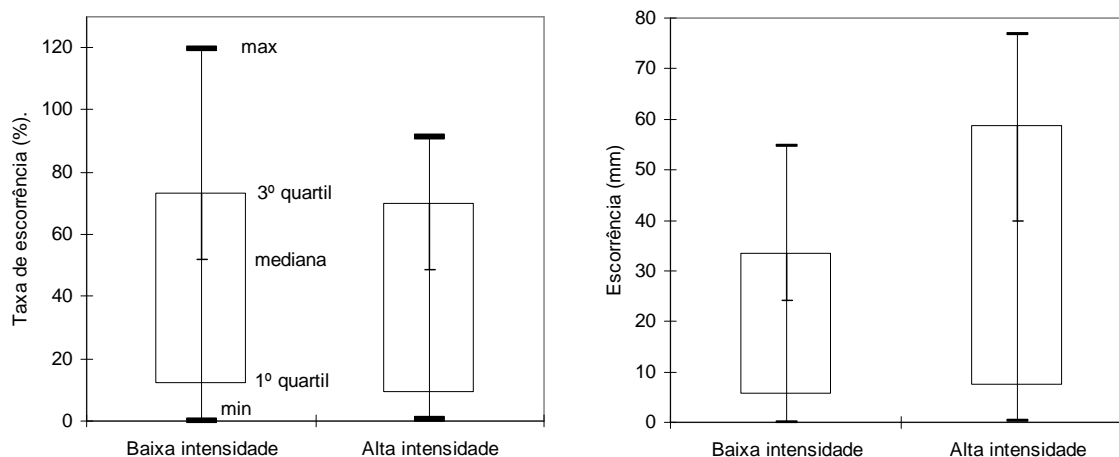


Figura 4-12. Escorrência relativa (% da precipitação) e absoluta (mm) para as simulações de alta e extrema intensidade (n=17).

Também na Figura 4-12 esquerda é de notar um valor máximo superior a 100% no caso das simulações de baixa intensidade. Não foi possível atribuir este valor a uma intensidade de chuva extraordinária (muito elevada ou muito baixa) nos copos colocados fora da parcela. Os valores médios são semelhantes aos de outras simulações (26.2mm vs.26.4mm médio nas outras rse realizadas, ver Figura 4-9, A2-tb1).

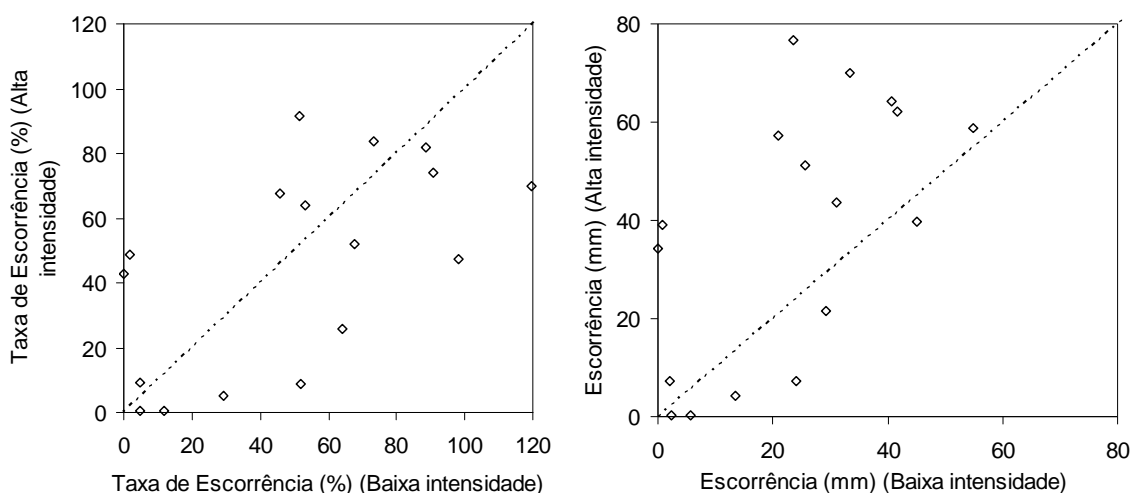


Figura 4-13. Relação entre os pares de simulações simultâneas em termos de escorrência produzida.

¹⁹ Acumulados: 394mm para as baixas vs. 637mm para as altas (n= 17 para cada intensidade)

Os pares de simulações simultâneas demonstram uma relação pouco clara entre a escorrência produzida pelas baixas e altas intensidades (Figura 4-13). Isto se aplica tanto aos valores absolutos como aos relativos, com coeficientes de correlação linear de 0.79 e 0.60, respectivamente. Parece ainda haver uma ligeira tendência para maiores valores relativos no caso das intensidades baixas, sendo a tendência ao contrário para os valores absolutos.

4.2.3 Variação espacial.

A produção de escorrência é comparada na Figura 4-14. Ao longo das 4 épocas de amostragem, a escorrência mediana é ligeiramente maior em Açores 1 do que em Açores 2, chegando a diferenças, em termos absolutos, de quase 10 mm. Há que salientar que Açores 2 conta com 2 simulações a mais e ainda com isso a mediana relativa e absoluta é maior em Açores 1. As duas simulações contribuem para um aumento de apenas 7mm e 10% (com n=18: 45%, 27mm), que não dão para superar os 35mm de Açores 1 (com n= 16: e 34%, 22mm). A resposta hidrológica também é mais homogênea em Açores 1, reflectido sobre tudo num 1º quartil mais alto do que o de Açores 2. Comparando totais acumulados temos 402 mm (n=16) para Açores 2 frente à 527 mm (n=16) para Açores 1²⁰.

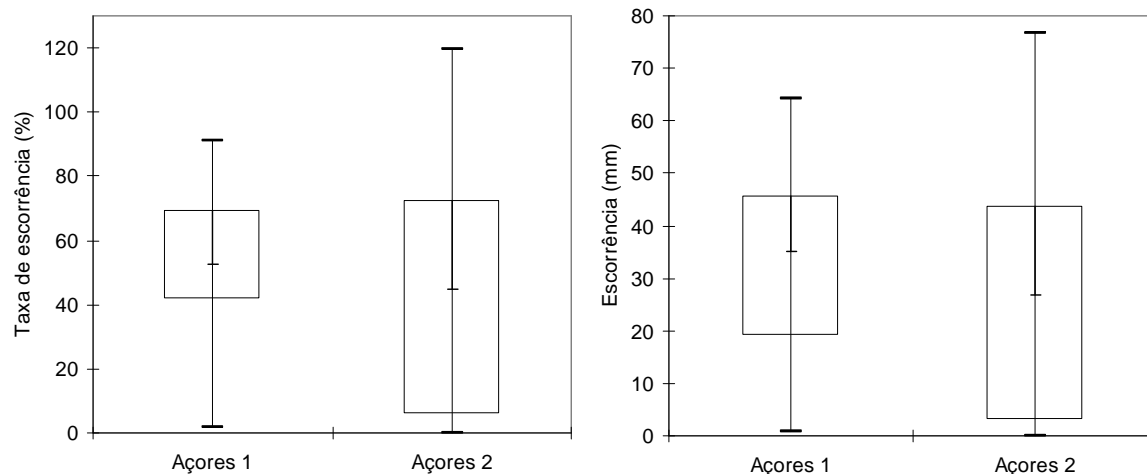


Figura 4-14. Escorrência relativa (% de precipitação) e absoluta nos dois locais de estudo ao longo do período de estudo. n_{Açores 1}= 16, n_{Açores 2}= 18.

A posição na encosta parece ter alguma influência sobre a produção de escorrência (Figura 4-15). Tanto o valor mediano como o a amplitude entre quartis são algo maiores na parte superior do que a parte inferior das encostas. As duas simulações a mais estão no topo, e tanto os valores relativos (52% vs.51%) como os absolutos (33mm vs. 32mm) incrementam pouco o valor da mediana.

²⁰ Ainda 505'8mm em Açores 2 (n=18) frente à 527 mm em Açores 1 (n=16).

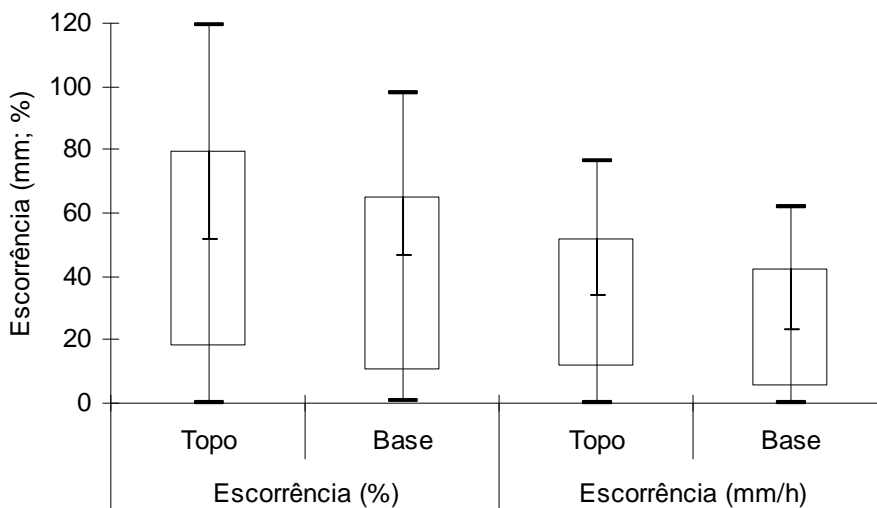


Figura 4-15. Escorrência relativa (% de precipitação) e absoluta (mm) no topo e na base dos dois sites. $n_{\text{topo}}=18$; $n_{\text{base}}=16$

Existe uma relação pouco clara entre as quantidades de escorrência produzidas pelas simulações da mesma intensidade efectuadas no mesmo dia, nas partes superior e inferior de cada encosta (Figura 4-16). Os coeficientes de correlação linear são 0,63 e 0,61, para as escorrências relativas (em % da precipitação) e absolutas (em mm) respectivamente. A Figura 4-16 também ilustra bastante bem a tendência para maiores escorrências no topo do que na base das encostas.

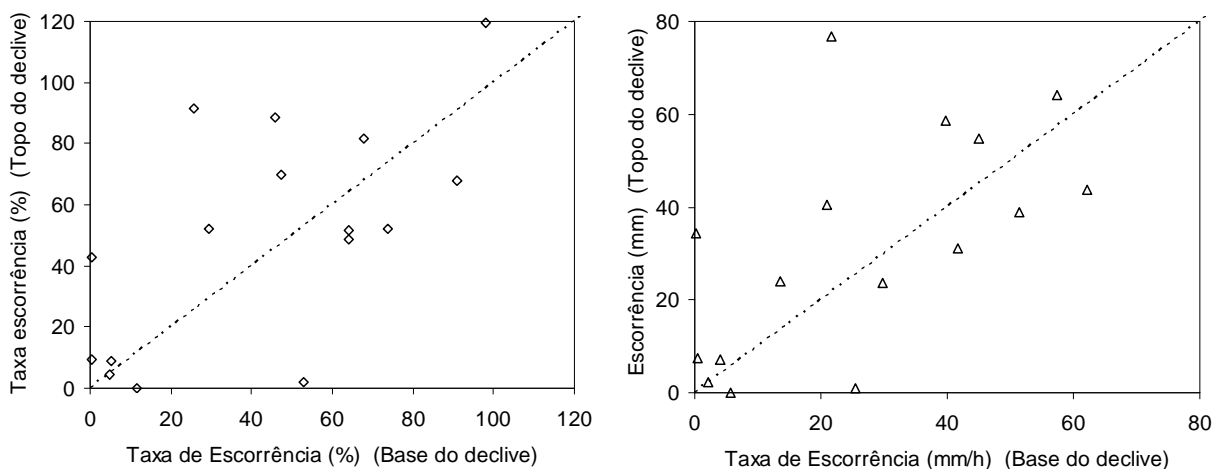


Figura 4-16. Relação entre a escorrência das simulações da mesma intensidade na base e no topo das encostas.

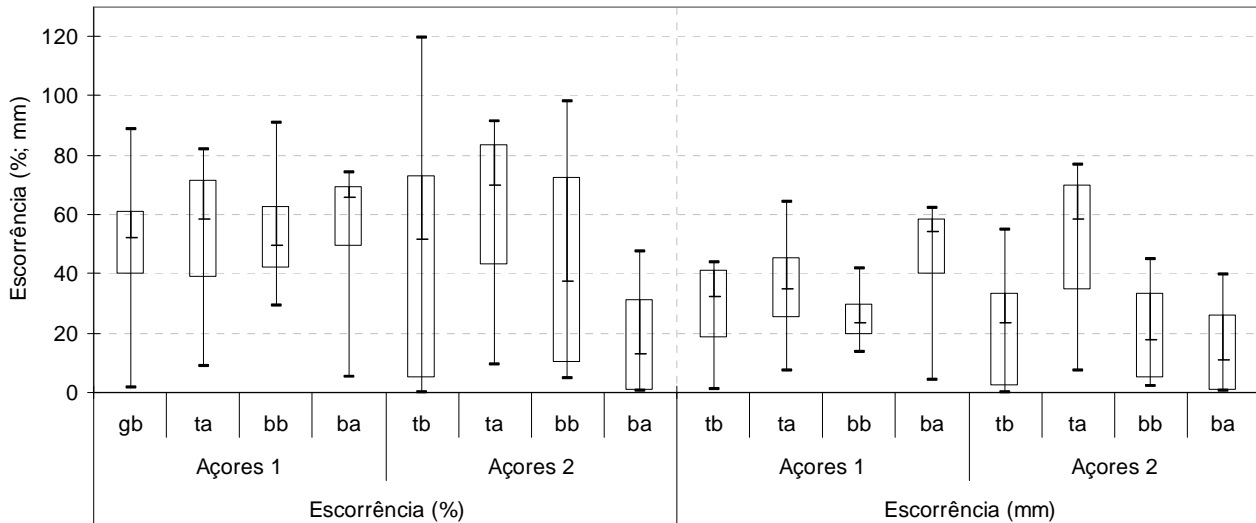


Figura 4-17. Escorrência relativa (% de precipitação) e absoluta (mm) nas parcelas estudadas. $n_{topo}=18$; $n_{base}=16$

A Figura 4.17 analisa a escorrência relativa e absoluta produzida em cada uma das parcelas. Pode-se apreciar uma homogeneidade nas taxas de escorrência perto do 50%, sobre todo em Açores 1, onde a amplitude entre quartis é bastante menor e as medianas mais parecidas do que em Açores 2. Também as parcelas de baixa intensidade geram respostas similares nas duas áreas, mas não assim nas de alta intensidade, sobre todo em Açores 2. As parcelas do topo de Açores 2 (ta e tb) levam duas simulações a mais, pelo que se vêm incrementadas em termos relativos em 23% e 13%, e em termos absolutos em 11 e 12 mm, respectivamente. Salva esta diferença, pode-se afirmar que a resposta na parte superior e inferior do declive é semelhante em Açores 1, e menor e mais heterogénea em Açores 2.

Das 8 parcelas estudadas temos duas que apresentam respostas medianas extremas: uma de alta intensidade que gera as maiores medianas de escorrência durante os quatro períodos (66%; 54mm; parcela ba-A1,) e uma de alta que apenas gera escorrência (11mm, 13%; parcela ba-A2). Dunjó et al. 2004 encontraram também alta variabilidade na resposta hidrológica das suas parcelas.

4.2.4 Variação temporal.

Na sua globalidade existe um decréscimo de escorrência mediana com a tempo. Ao mesmo tempo é de recalcar a variação entre os valores mínimos e máximos de cada amostragem, que ultrapassam o 50%. A Figura 4-18 mostra os coeficientes de escorrência para as quatro séries de simulações que foram levadas a cabo entre Setembro de 2005 e Julho do 2006. Tal e como a grande maioria de autores já verificaram, após o incêndio a escorrência é extremamente alta (Doerr 2006, Ferreira 2006, Robichaud 2000a,b). Pelo menos até 5 meses depois do incêndio (2º período; Novembro 2005) a mediana de escorrência mantém-se maior a 60%.

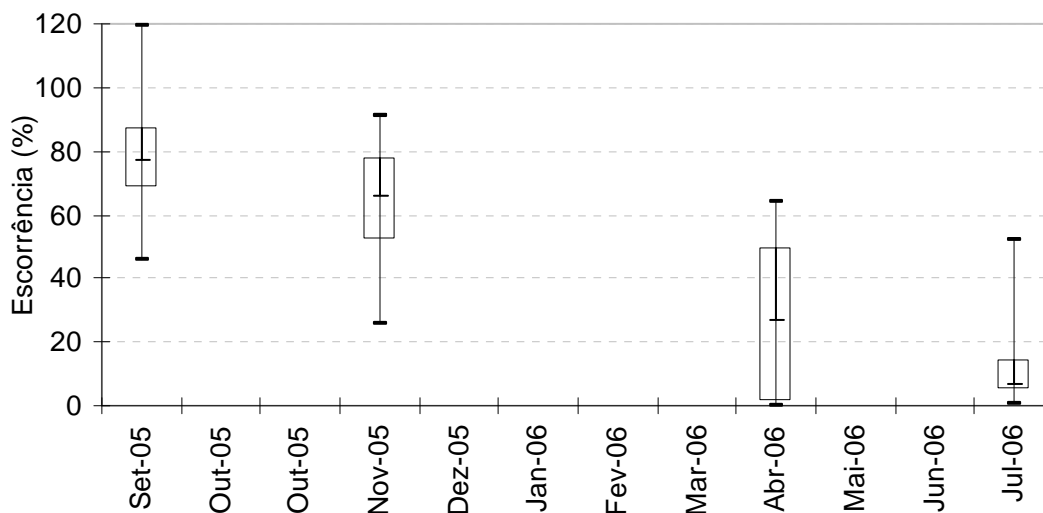


Figura 4-18. Variação temporal da escorrência em termos relativos (% da precipitação). Para Set-05, $n = 10$; para Nov-05, Abr-06 e Jul-06 $n=8$.

Quando analisadas em separado, as duas áreas apresentam comportamentos bem diferenciados. Na Figura 4-19 pode ser observado que a mediana da escorrência em Açores 1 tende a manter-se alta por mais tempo do que Açores 2. É Abril, com uma diferença de 45% o principal responsável pela alta escorrência detectada em açores 1. Enquanto que no segundo e terceiro períodos Açores 1 apresentou medianas de 51% e 19%, em Açores 2 apenas há escorrência (6% e 5%, respectivamente), e a amplitude das medições é inferior à de Açores 1.

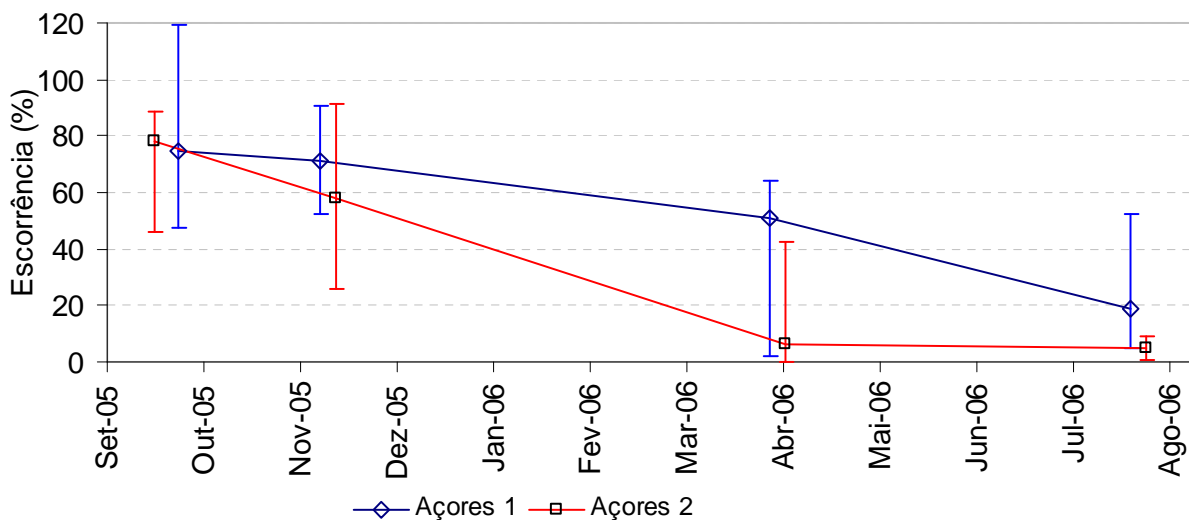


Figura 4-19. Variação temporal da mediana dos coeficientes de escorrência em Açores 1 e Açores 2 ($n=34$).

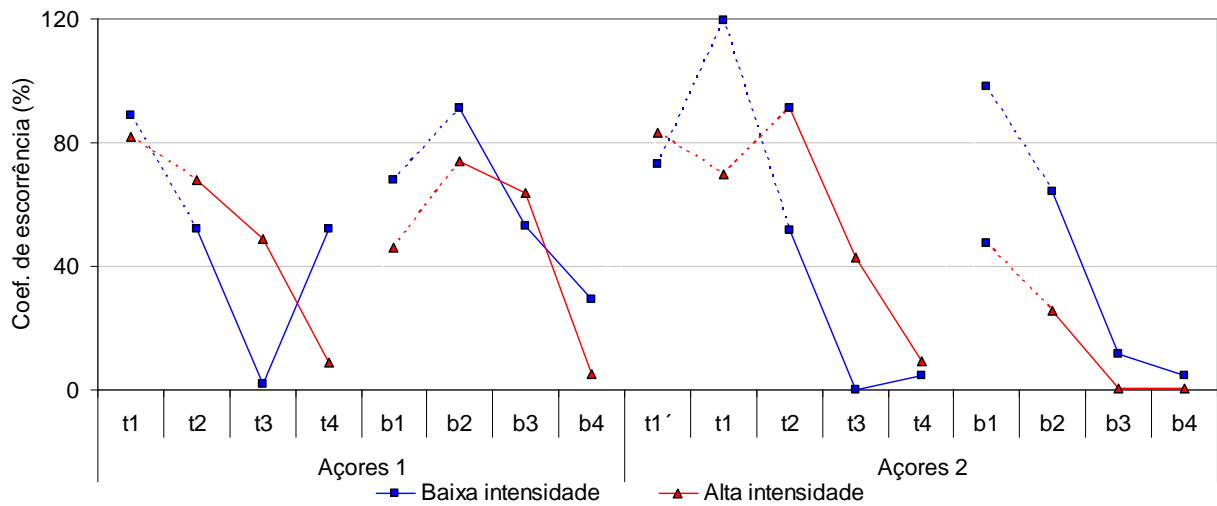


Figura 4-20. Coeficientes de escoimento obtidos para cada uma das parcelas de baixa intensidade (cor azul) e alta (cor vermelha) para os quatro períodos de estudo (t=topo; b=base).

A Figura 4-20 apresenta coeficientes de escoimento de todas as simulações, agrupando-as por encosta e posição no declive e mostrando ainda as séries temporais de baixa e alta intensidade. É de salientar que só as experiências a partir da 2ª amostragem foram efectuadas nas mesmas parcelas, assim que a variabilidade espacial pode ajudar a explicar a falta de consistência nas diferenças entre as simulações da mesma intensidade do 1º e 2º período, nomeadamente no caso de Açores 1. É de referir que por diferentes razões tanto em Açores 1 como em Açores 2 a intensidade não parece ter uma influência consistente sobre a escoimento relativa das parcelas fixas adjacentes. Existem diferenças consistentes no caso de Açores 2, mas estas são opostas para os dois pares nas duas secções das encostas.

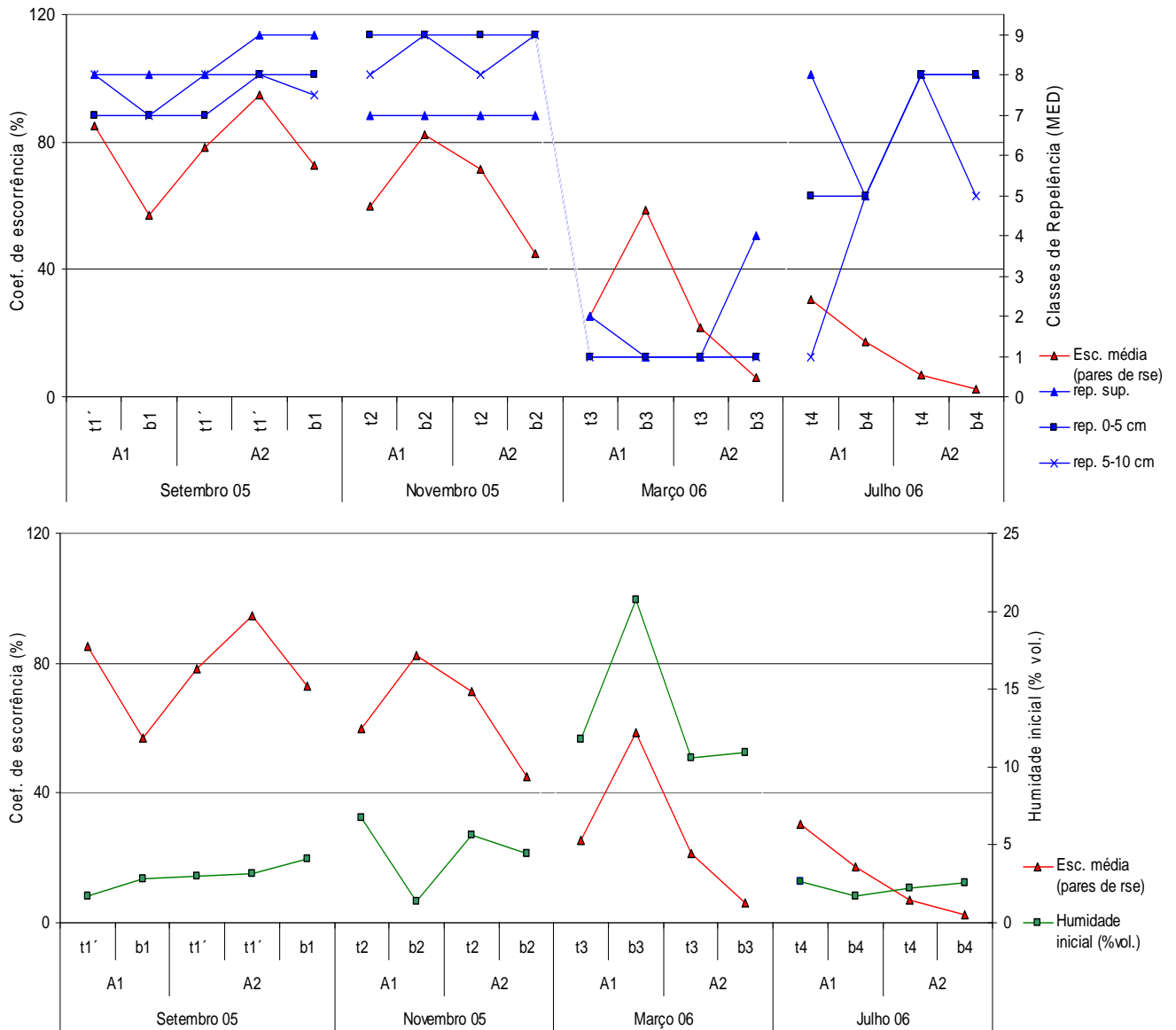


Figura 4-21. Coeficiente de escorrência médio por par de simulações, mediana da classe de repelência MED na parcela controlo por profundidades (acima) e média da humidade inicial (abaixo).

Devido à sua suposta importância na resposta hidrológica em áreas ardidas em particular (Keizer et al., 2007) explorou-se a relação da repelência à água do solo com a escorrência observada. Existe uma correlação linear bastante forte ($r = 0,6$; figura 4-22 esquerda). No entanto, há casos isolados em que foram medidos altos valores de repelência e baixas taxas de escoamento, e também situações de baixa repelência à água com altas taxas de escorrência.

Notou-se que com humidade inicial muito baixa e repelência muito alta a produção de escorrência é também alta (Figura 4-21 acima, 1ª e 2ª repetição). O maior coeficiente de escorrência obtido em Novembro (próximo ao 80%) aparece relacionado inversamente com o valor da humidade inicial, apesar da repelência ser, para todas as provas nesta 2ª repetição de classe 7. Conforme a repelência diminui, também o faz a escorrência (Figura 4-20 acima, 3ª repetição), mas quando a repelência desaparece a escorrência depende então da humidade presente no solo.

Note-se na Figura 4-21 acima que durante a 3ª repetição (30 Março-4 Abril) há um pico de 50% de escorrência que não pode ser explicado pela presença da repelência (classe 1 MED), mas na Figura 4-20 abaixo pode-se ver que esse pico é relacionado, agora directamente, com uma

humidade inicial muito alta, perto de 20% em volume. Nesta suposição, em solos sem repelência a escorrência vai depender da saturação de água no solo.

No entanto, há que salientar que os valores de escorrência da 4ª repetição são anormalmente baixos, o que pode ser explicado pela heterogeneidade da repelência no perfil do solo. A homogeneidade da repelência no tempo foi já explicada no sub-capítulo 4.1.5. Ao fazermos as correlações de repelência e humidade vs. escorrência (Figura 4-22) foram escolhidos os valores de 5-10cm de profundidade por serem estes os que apresentaram as melhores correlações (ainda que muito fracas). Pode-se apreciar que existem valores de repelência baixos (classe 0, Figura 4-22 esquerda) e valores de humidade elevados (perto de 20%, Figura 4-22 direita) que deram escoamentos de perto de 50%. O caso oposto (alta repelência, baixa humidade e escoamento quase nulo) pode ser também observado como *outlines* na Figura 4-22 direita e esquerda. Este último suposto foi verificado na 4ª repetição, em Julho de 2006.

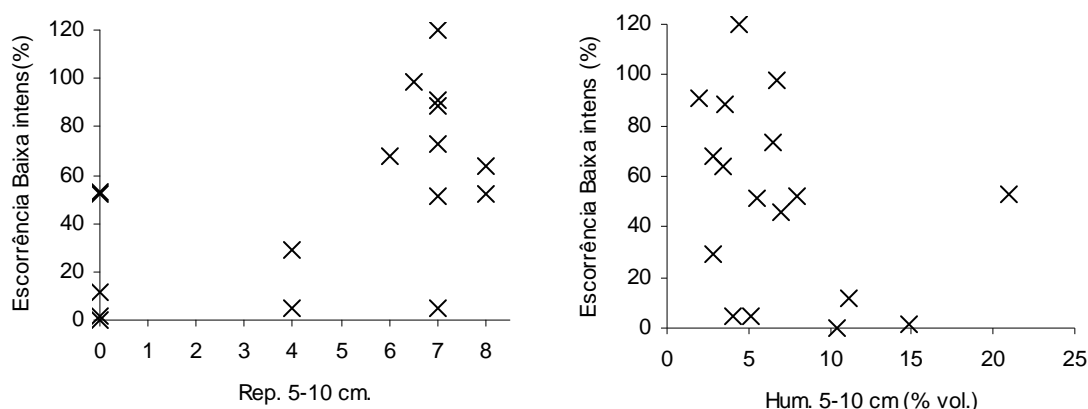


Figura 4-22. Correlações entre repelência (esquerda), humidade inicial (direita) e escorrência para as baixas intensidades.

Tabela 4-4. Dados de escorrência por períodos.

Períodos estudados	Fixa/ móvel	Humidade inicial (0-5 cm) (% vol.)	Repel. na superfície (MED)	Tempo para início de escorrên- cia (min)	Tempo para a escorrên- cia acabar (min)	Coef. de escorr. (%)	Sedim. Totais (g/ m ²)
1º Período (20-27 Set 2005)	móvel	2,9	8,4	2,3	10,7	77,6	29,0
2º Período (10-15 Nov 2005)	fixa	4,6	7,0	2,4	6,7	64,7	18,5
3º Período (30 Mar-4 Abril 2006)	fixa	13,5	2,0	5,4	1,9	27,8	6,0
4º Período (20-25 Julho 2006)	fixa	2,3	7,3	9,0	3,7	14,3	1,7

Dois dos parâmetros que melhor descrevem a evolução da escorrência dentro da simulação são o tempo para início da escorrência e o tempo para a escorrência acabar, uma vez que a chuva pára depois de uma hora de simulação (Tabela 4-4). O primeiro está inversamente relacionado com o coeficiente de escorrência, e o segundo está directamente relacionado. Parece lógico pois, pensar que a capacidade de retenção do solo se vai incrementando com o tempo. Durante o primeiro e segundo período não há grandes diferenças nos tempos de início, obtiveram-se valores médios de 2-3 minutos. No 2º período os tempos finais sofrem uma redução de 4 minutos, e existe uma maior dispersão dos valores (temos oito simulações de chuva onde o tempo final de escorrência excede os 10 minutos junto a simulações com tempos finais de só um minuto). O 3º período apresenta tempos de início um pouco maiores (media 5,4 minutos), e os tempos finais diminuem em 5 minutos. No 4º período há 2 simulações com escorrência

maior de 30%, o tempo final, que vinha diminuindo desde o início recupera alguns minutos, sobre tudo devido a estas duas simulações. As correlações do coeficiente de escorrência com o tempo de início ($R^2=0,3343$) foram piores do que as obtidas com o tempo final ($R^2=0,4883$). As correlações com o tempo desde o início do incêndio são também muito baixas, mas servem para observar a evolução da escorrência do ponto de vista da retenção de água.

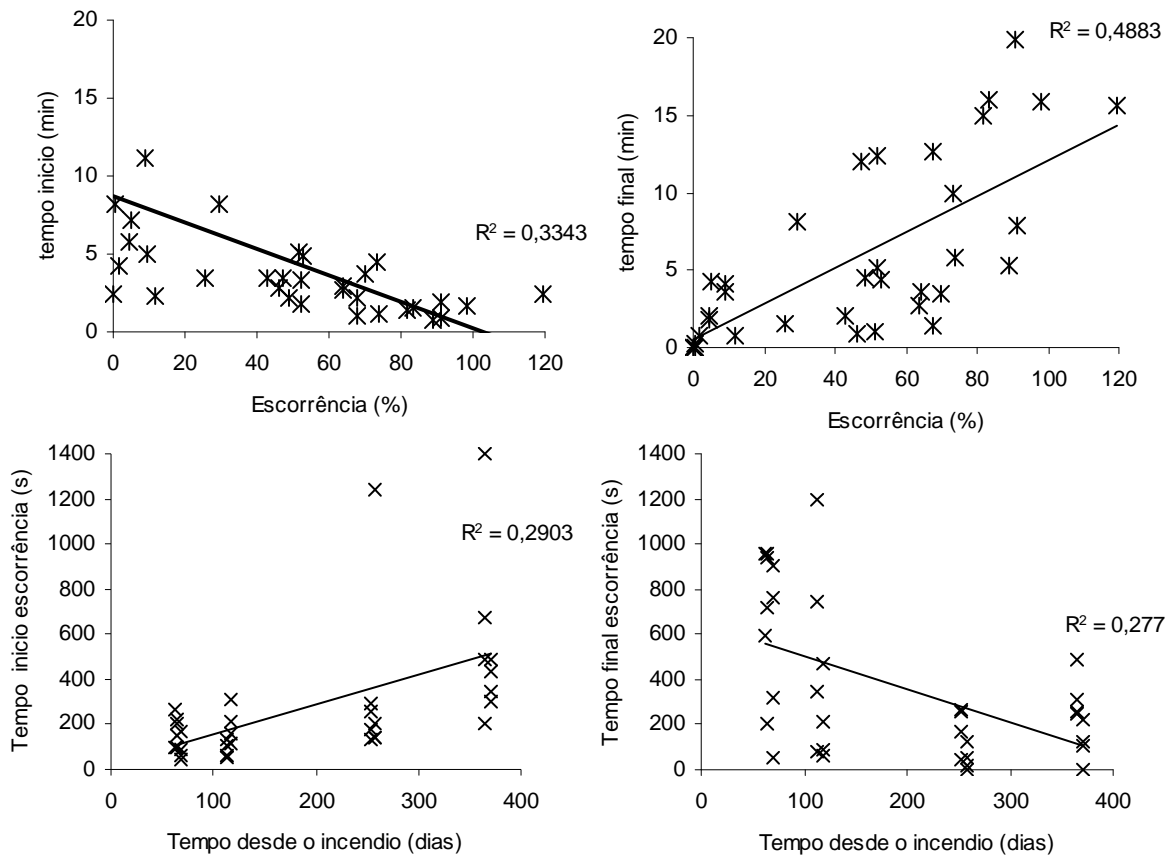


Figura 4-23. Correlações entre o coeficiente de escorrência vs.m tempo início de escorrência, tempo fim escorrência e tempo desde que o incêndio aconteceu.

4.2.5 Análise de Hidrogramas.

Vamos analisar as **variações nas experiências** durante 1 hora para os quatro períodos de tempo nos quais decorreram as simulações de chuva: 1º período: Setembro 2005, 2º: Novembro 2005, 3º: Abril 2006 e 4º: Julho 2006. Segundo os comportamentos das curvas de escorrência e humidade pode-se saber a reacção do solo durante a experiência. É recomendável ver os hidrogramas apresentados no anexo 5.

Foram seleccionados os hidrogramas correspondentes à parcela **tb** de Açores 2. Ainda que existam diferenças entre parcelas, o comportamento em cada um dos quatro períodos é semelhante. As características gerais das curvas de escorrência, humidade do solo, e produção de sedimentos serão analisadas.

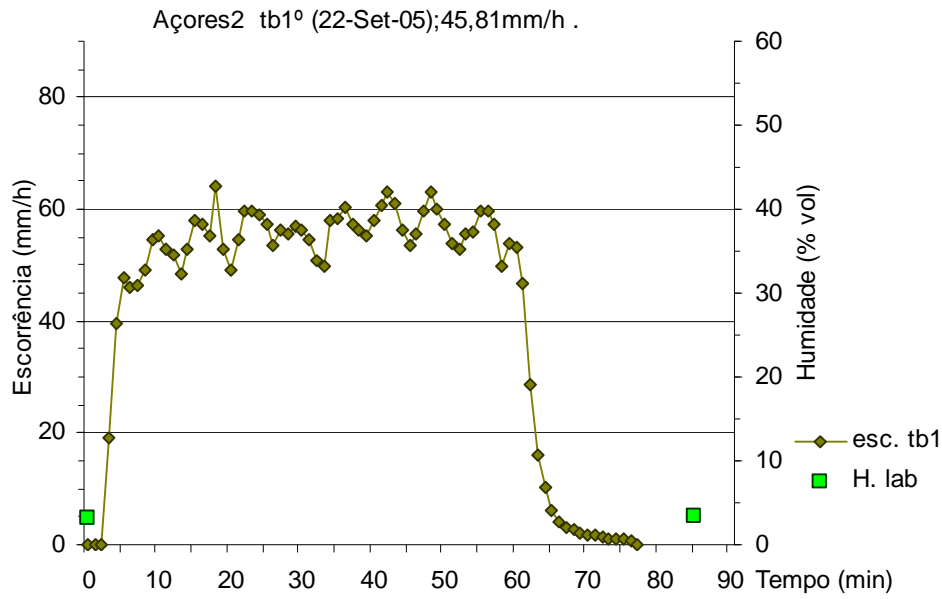


Figura 4-24. Hidrograma da parcela tb1; típico do 1º Período.

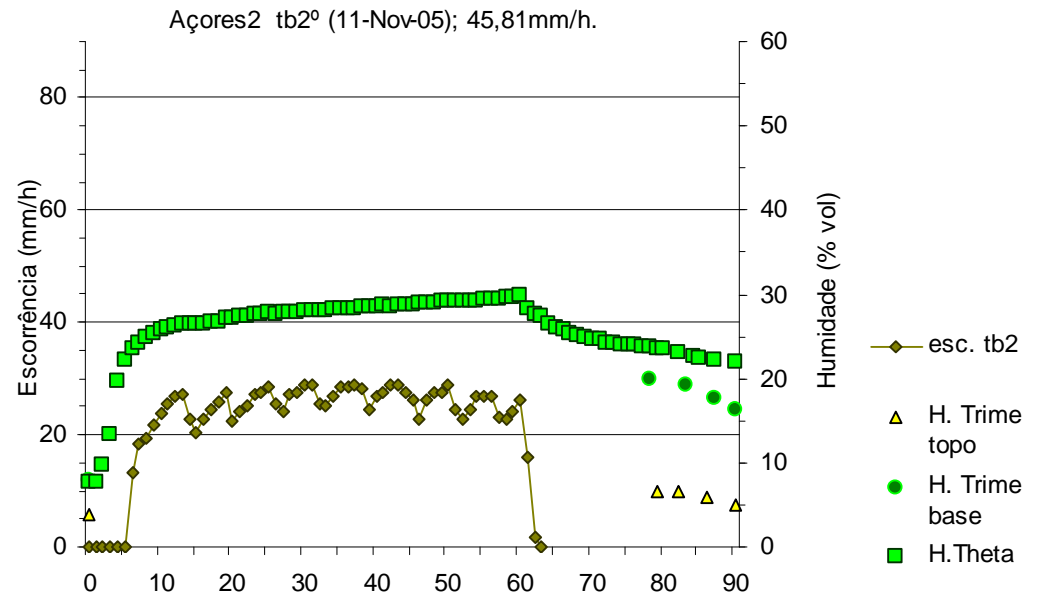


Figura 4-25. Hidrograma da parcela tb2; típico do 2º Período.

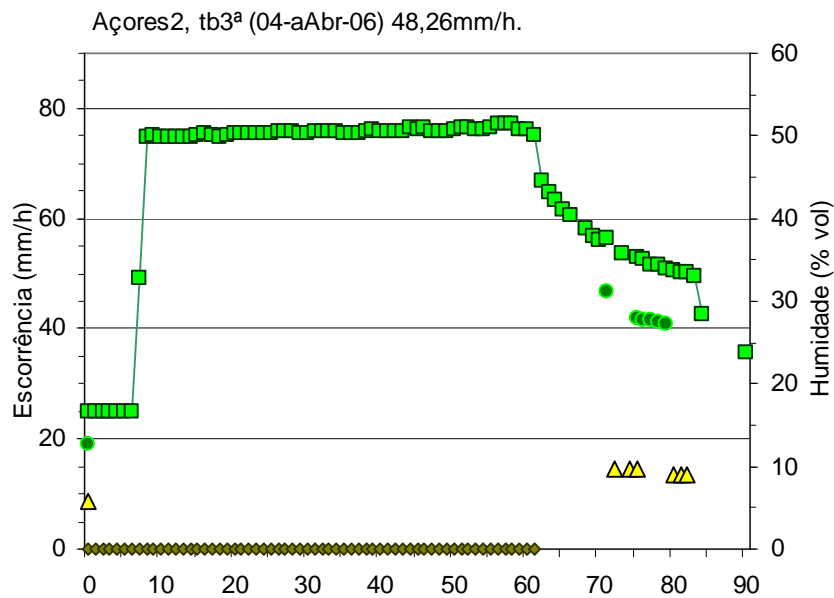


Figura 4-26. Hidrograma da parcela tb3; típico do 3º Período.

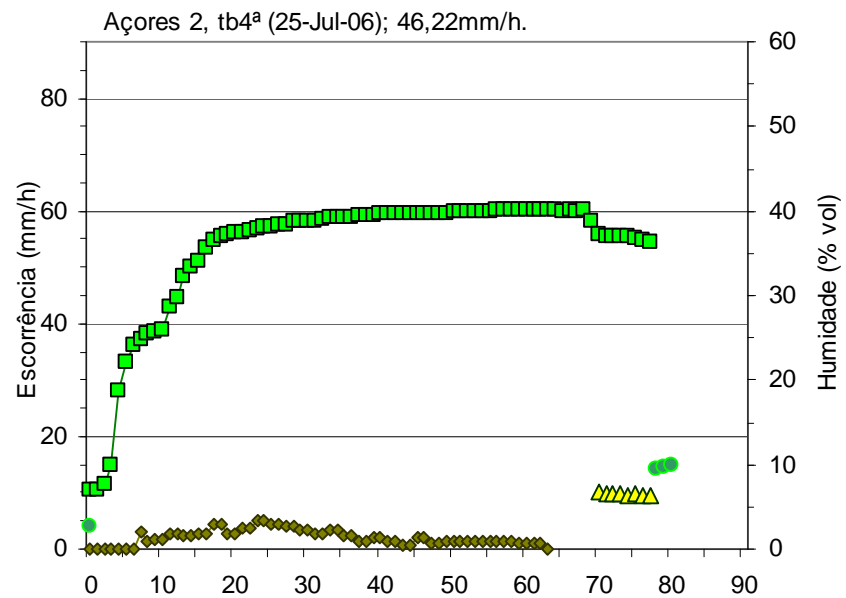


Figura 4-27. Hidrograma da parcela tb4; típico do 4º Período.

1º Período: Setembro de 2005.

As simulações realizadas nesta altura aconteceram sob condições de humidade inicial e repelência extremas (hum. por baixo de 5% em vol. e hidrofobia de classe 8 e 9). Até esta data não aconteceu nenhuma chuva natural de importância (Figura 4-9). Devido a avarias com a sonda Theta-probe ML2 não foi possível medir a evolução da humidade com o tempo. A análise laboratorial mostra umas diferenças insignificantes na humidade do solo antes e depois de realizar as simulações. A capacidade de retenção do solo é extremamente baixa, e portanto as taxas de escorrência estão sempre perto do 100% (ver anexo 5; 1º Período).

A escorrência começa sempre antes dos 5 minutos. A curva de escorrência sobe rapidamente e permanece estável até o final da simulação. Para as duas intensidades atingem-se patamares relativamente horizontais. No caso da alta intensidade, devido às oscilações da pressão o patamar é quebrado periodicamente (a escorrência desce até 40mm/h) mas mantém-se entre 70 e 80 mm/h nos cumes destas oscilações. Após a chuva parar, a escorrência desce muito rapidamente, e o tempo final abrange uma ampla gama de valores (0,9- 16 min; Tabela 4-4).

2º Período: Novembro de 2005.

As diferenças mais importantes que começam a ser observadas nestas simulações vêm da irregularidade das curvas de escorrência. A pluviometria recebida nos locais entre finais de Setembro e Novembro faz com que a humidade inicial do solo seja maior, e possivelmente, a repelência é mais fraca. A diferença das obtidas em Setembro, agora o patamar deixa de ser estável e se observam alguns comportamentos diferenciados (anexo5; 2º Período):

- a) Curvas com patamar estável: Algumas simulações de Açores 2 continuam a gerar um patamar quase horizontal, (ba2º, tb2º, ta2º) mas as taxas de escorrência são agora inferiores ao 100%.
- b) Curvas com patamar com tendência à descida: Em Açores 1 foram encontradas duas simulações com hidrogramas onde a escorrência diminui com o tempo (tb2º, bb2º). Alguns autores também encontraram este comportamento, e justificaram esta diminuição a uma “rotura” progressiva da repelência à água (Pierson et al. 2001). É possível que no nosso caso, depois das chuvadas de Outubro a repelência possa ter diminuído na sua intensidade, e só agora, em Novembro é que começa a ser possível quebrar a repelência e a capacidade de infiltração aumenta progressivamente.
- c) Curvas com patamar tendente a aumentar: Sobre tudo nas simulações de alta intensidade (Açores 1 ta2º, ba2º e em Açores 2 bb2º) a escorrência é máxima no final da simulação. Foram as simulações que apresentaram as maiores escorrências (60-90%). A aparição destas curvas implica que a retenção do solo seja suficiente para retardar a aparição da escorrência máxima no início da experiência, e que a repelência não possa ser quebrada.
- d)

Com respeito à humidade do solo, existem situações onde a estabilização acontece dentro dos 10 minutos iniciais (Açores 1) e outras onde não se produz estabilização (Açores 2). As simulações de baixa intensidade apresentam curvas de humidade que tendem para a estabilização, mas nunca chegam a atingir um valor estável. As simulações de alta intensidade mostram curvas de humidade com oscilações paralelas aos picos da escorrência (sem dúvida devidas ambas funcionamento da bomba), ainda que em Açores 2, na simulação ba2º a humidade começa a descer depois de 20 minutos.

Após a chuva parar, a descida da humidade acontece mais rapidamente em Açores 1 do que em Açores 2, quando existem medições no topo, e na base da parcela pode-se verificar que a humidade é sempre maior na base; evidentemente, o fluxo da escorrência segue a linha de máxima pendente. As condições em Açores 1 (maior declive, textura mais grossa e menor profundidade do solo) vão influenciar a curva de descida da humidade, e em termos gerais vai

existir uma menor capacidade de retenção da humidade no solo. Os tempos de escorrência confirmam estas afirmações (Tabela 4-4), onde vemos que Açores 1 tem tempos finais de escorrência muito maiores do que Açores 2 (gama 1-20 minutos frente a 1-8 min.).

3º Período: Abril de 2006.

A característica mais importante nestas simulações vai ser a alta humidade inicial. As chuvas naturais ocorridas desde Outubro têm sido importantes (até 750 mm desde a data do incêndio) e a repelência do solo é muito baixa. Quatro das oito simulações geraram escorrência por baixo de 10%. As maiores taxas de escorrência foram de 50-60% e corresponderam a Açores 1. Neste período registraram-se os menores tempos de fim da escorrência (inferiores a 1 minuto). A característica mais importante nesta altura é a estabilização da humidade dentro dos 10 primeiros minutos. Ao contrário diferença do 2º período, a humidade permanece estável durante o resto da experiência. Cada parcela tem um patamar de humidade definido, em Açores 1 entre o 40 e o 60%, em Açores 2, as parcelas da base nunca chegam a ultrapassar o 30%. Quando a prova acaba, a humidade volta a descer mais rapidamente em Açores 1 do que em Açores 2. Os valores de saturação do solo obtidos no laboratório (Lucena J. 2006) estão em concordância com estes valores de humidade do solo (Tabela 4-5).

Tabela 4-5. Valores de saturação do solo em volume para as áreas de estudo (Lucena J. 2006).

Saturação (%vol.)		0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
Açores1	base	43,7	60,1	57,5
	topo	50,3	53,0	54,6
Açores2	direita	50,5	60,3	61,2
	esquerda	40,5	40,6	63,7

4º Período: Julho de 2006.

Das oito simulações realizadas, seis deram taxas de escorrência abaixo de 10%, e todas elas tiveram tempos de início de escorrência altos, superiores a 5 minutos. Só duas simulações registaram taxas de 30 e 50%, em Açores 1, com tempos de início de 8,2 e 3,4 minutos respectivamente. Exceptuando a parcela tb4º de Açores 1 (carácter decrescente) o resto das parcelas apresentam curvas de escorrência crescentes ou estáveis (ba4º de A1).

Por estranho que pareça, nem a escorrência nem a retenção de humidade no solo aumentam. A repelência é heterogénea (Figura 4-20 acima), e portanto, devem existir canais de infiltração que permitam à água sumir para profundidades maiores (Ferreira et al. 2005).

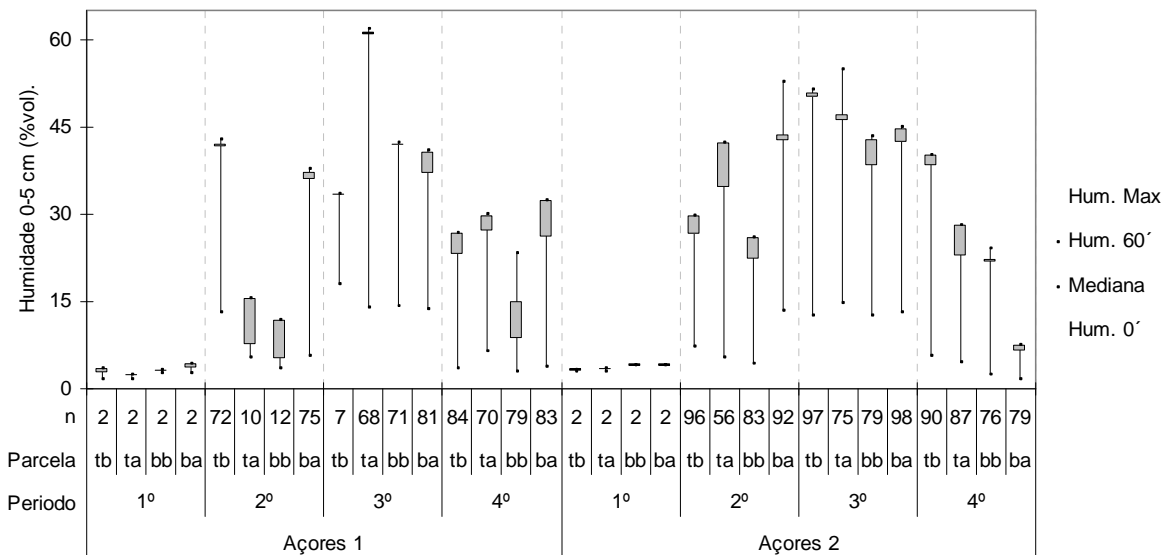


Figura 4-28. Monitorização da humidade nas simulações de chuva. Mostra-se a humidade máxima registada durante a simulação, a humidade no minuto 60' (a última medição antes de acabar a chuva; topo da caixa) a mediana de todos os valores (base da caixa) e a humidade inicial no minuto 0'.

Na Figura 4-28 foi analisada a evolução da humidade para todas as simulações de chuva. A gama de valores abrange desde a humidade inicial no minuto 0 até as medições realizadas após da chuva parar (90 minutos aprox.). O número de medições é extremamente baixo durante o primeiro período, onde só podemos notar a diferença entre os valores de humidade inicial e final tirados no laboratório com o resto de períodos. Percebe-se que no 2º período os valores medianos da humidade são menores do que no terceiro, e a humidade máxima coincide quase sempre com a humidade no final da experiência (Hum. 60'). O terceiro período tem uma alta homogeneidade na humidade atingida: humidade máxima, humidade 60' e humidade mediana são praticamente iguais, no limite da saturação (45-60% em volume). No 4º período as curvas de humidade chegam a estabilizar em valores muito inferiores aos do 3º período (entre 10 e 40%). Isto pode ser devido à presença da repelência, que impede atingir a saturação do solo nos primeiros 5 cm. As curvas da humidade tem uma aparência semelhante à do 2º período, mas agora os valores começam a crescer só depois dos 15 – 20 minutos do início da simulação (anexo5; 4º período). O atraso na resposta da escorrência e na retenção da humidade colocam em evidência que a infiltração do solo está a funcionar mais efectivamente do que nos períodos anteriores.

4.2.6 Infiltração e índice de repelência à água.

Os índices de repelência à água foram calculados segundo Pierson e Robichaud (2001). Estes autores desenvolveram uma forma de calcular a repelência do solo a partir de simulações de chuva. O cálculo foi efectuado para cada simulação segundo a seguinte fórmula: Water repellency index $WRI = (I_{final} - I_{min}) / I_{final} * 100$, sendo a infiltração mínima o valor mínimo infiltração numa hora, e a infiltração final é o valor da infiltração média nos últimos 3 minutos.

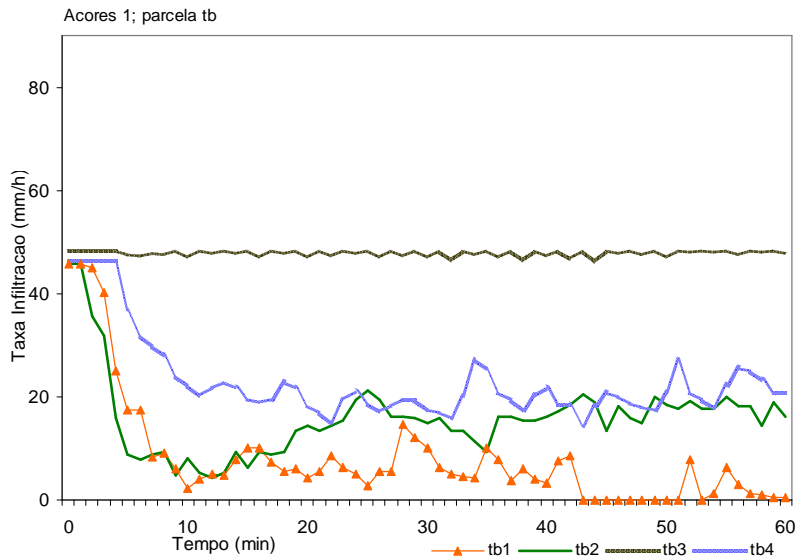


Figura 4-29. Infiltração durante as quatro simulações consecutivas na parcela tb de Açores 1.

Dos resultados obtidos, observa-se uma semelhança entre os valores do WRI da Figura 4-30 e as taxas de escorrência mostradas na Figura 4-20 ($R^2=0,88$). Sendo certo que a repelência medida pelo método MED coincide para os períodos 1º e 2º, não acontece o mesmo para os períodos 3º e 4º. As correlações entre os valores do WRI e os valores de repelência MED para as distintas profundidades não foram muito boas. A melhor correlação foi encontrada entre WRI e a repelência entre 5-10 cm de profundidade ($R^2=0,25$) (Figura 4-31).

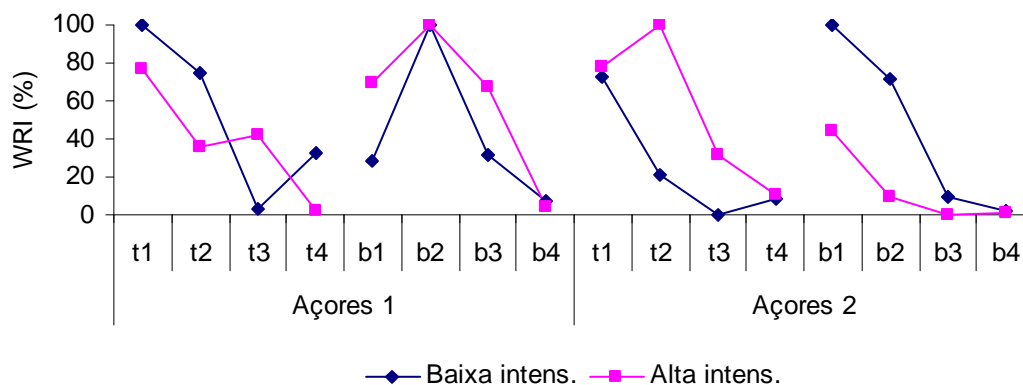


Figura 4-30. Índices de repelência á água para cada parcela e período.

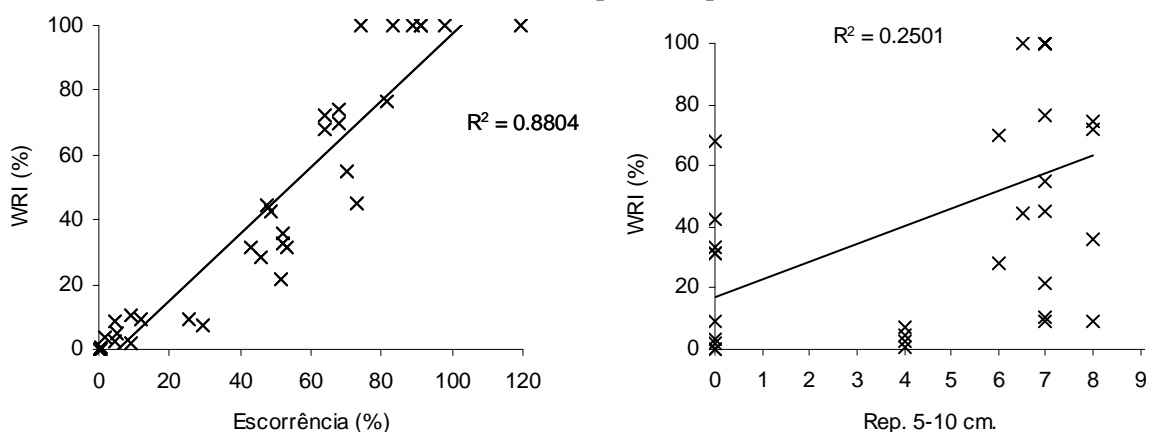


Figura 4-31. Correlação entre o WRI vs. Escorrência e vs. Repelência 5-10cm.

4.3 Erosão.

4.3.1 Variação segundo a intensidade da chuva.

Na Figura 4-39 pode ser observada a relação entre intensidade da chuva e a erosão do solo medida nas experiências. Logicamente, os valores medianos são maiores nas simulações de alta intensidade. No lado esquerdo da Figura podemos observar taxas de sedimentos totais de 80 e 101 g/ m², que correspondem à erosão medida nos primeiros períodos. No entanto, a erosão mediana é extremamente baixa para as duas intensidades de chuva testadas, com valores de 5.5 e 13 g/ m². Também se pode observar uma maior amplitude nos valores medidos nas simulações de alta intensidade. No centro e no lado direito da Figura são separados os valores respectivos da fracção mineral e orgânica. Em princípio são proporcionais às perdas observadas, ainda que a fracção orgânica apresenta valores bastante altos.

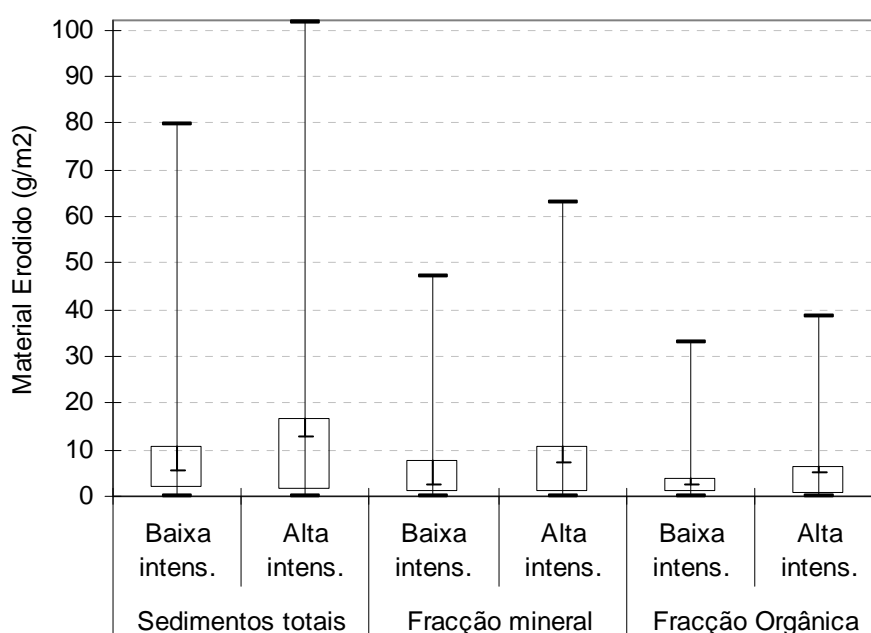


Figura 4-32. Comparação entre a erosão produzida nas simulações de baixa intensidade (Max, min, quartis 3º e 1º, mediana, n=17) e de alta intensidade (Max, min, quartis 3º e 1º, mediana, n=17).

4.3.2 Variação segundo a localização.

Com uma análise dos valores acumulados para cada um dos locais podemos encontrar resultados interessantes. Para facilitar a comparação foram tiradas as duas simulações de chuva a mais realizadas em Açores 2 (ta1´ e tb1´) e se deixou o mesmo *n* nas duas áreas. Na Figura 4-40 são comparados os totais acumulados para 16 provas em cada uma das áreas de estudo (8 rse´s de alta intensidade e 8 rse´s de baixa). É verificada uma maior produção de escorrência em Açores 1, mas comprova-se que as maiores perdas acontecem na área que produz menos escorrência. Também o volume de material orgânico em proporção é maior em Açores 2. Isto pode ser devido à presença de uma cobertura de cinzas maior em Açores 2 do que em Açores 1. A cobertura em pedras é maior em Açores 1 do que em Açores 2, e pode ser responsável pela maior protecção do solo.

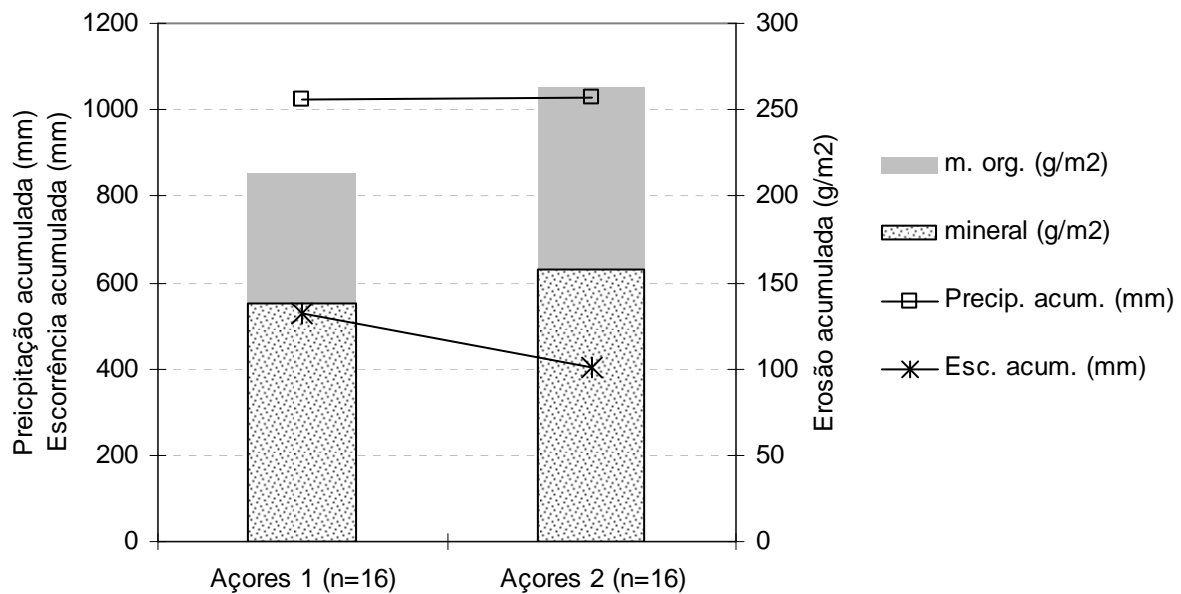


Figura 4-33. Precipitação, escorrência, fracção mineral e orgânica acumulada nos dois locais de estudo.

Por tanto, pode ser dito que a erosão é maior nas exposições norte dos declives, o qual concorda com os valores tirados por Cerdà et al., 1995 que mediante simulações de chuva em parcelas de 0,25 m² encontraram maiores taxas de erosão na exposição norte (10,3 g/m²) do que na exposição sul (3,71 g/m²), ainda que o estudo foi feito em áreas queimadas dez anos antes. No mesmo trabalho, fizeram-se simulações de chuva numa encosta com orientação Norte queimada 2 anos antes das simulações, e as taxas resultantes (214 g/ m²) são muito maiores do que as medianas medidas neste estudo (Figura 4-33).

Enquanto às diferenças entre o topo e a base do declive, as caixas de valores da Figura 4-34 mostram de novo respostas inversas enquanto à produção de escorrência e sedimentos. Há que reparar que o n no topo é maior do que na base (n=18 frente a n=16). Ainda assim, as maiores taxas de escorrência correspondem-se com as menores taxas de erosão. No entanto, a dispersão dos sedimentos medidos na base é muito alta: os valores medianos são menores para a base do que para o topo do declive (4,4 frente a 7,5 g/ m²), mas as médias voltam a engrandecer a produção de sedimentos na base frente ao topo (21.9 frente a 8.2 g/ m²).

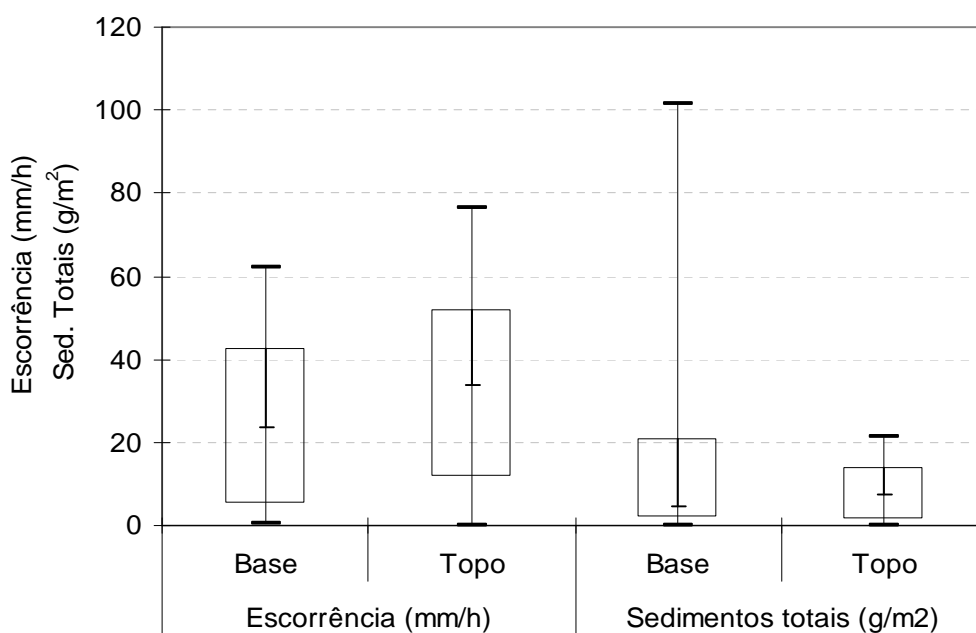


Figura 4-34. Valores da escorrência e sedimentos produzidos na base (n=16) e topo (n=18) das duas encostas.

Ao separar os valores obtidos em cada parcela foi possível construir a Figura 4-35. Existem parcelas que funcionaram sempre como mínimos com taxas acumuladas em torno a 50 g/m² e parcelas que funcionaram como máximos, com valores em torno a 100 g/m². A diferença intraparcelar é elevada, e ainda resulta mais surpreendente comprovar que a parcela ba de Açores 2 chegou a produzir até 100 gramas de sedimentos com muita pouca escorrência. Esta vai ser a parcela que maior taxa de sedimentos produz. A sua contrapartida é a parcela ta de Açores 2, que com a maior escorrência medida produz poucos sedimentos. No entanto, é preciso discernir quando é que a erosão se produz.

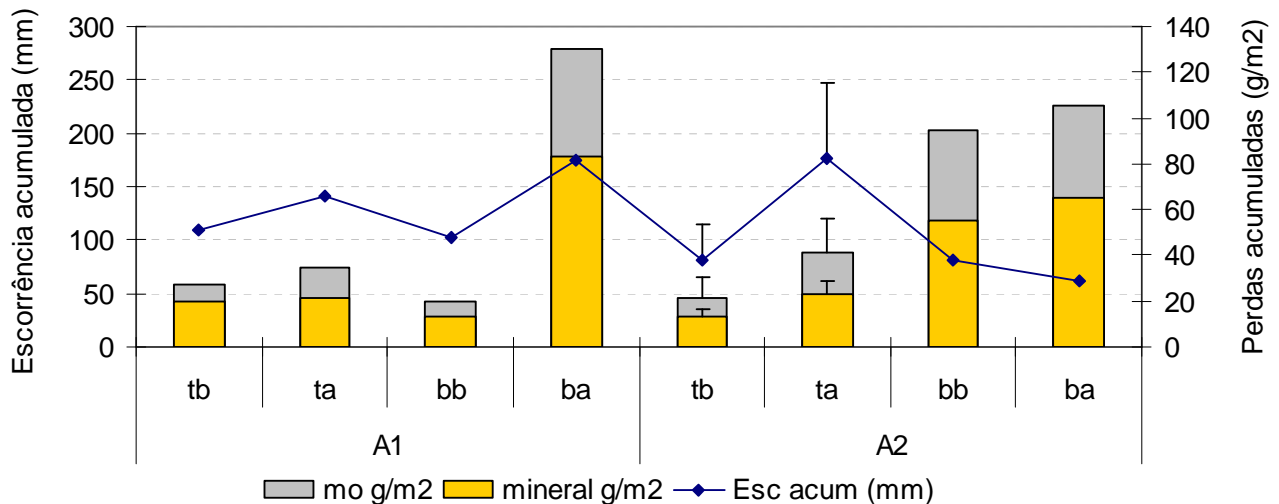


Figura 4-35. Escorrência (mm) e perdas acumuladas (g/m²) produzida em cada parcela durante as quatro simulações (n=4 em todas as parcelas. As barras de erro em A2tb e A2ta mostram n=5).

4.3.3 Evolução temporal.

Agrupados os valores na série temporal, vê-se uma clara tendência para a diminuição dos sedimentos produzidos (Figura 4-36). Alguns autores (Dunjó et al., 2004) referem que as pequenas parcelas formam um sistema fechado onde os sedimentos transportados não são repostos por materiais desde acima, pelo que os materiais erodidos tendem a ficar esgotados no tempo. Também Vacca et al. (2000) se referem a este problema. Com tudo, assume-se que as parcelas podem funcionar bem durante o período de um ano, e é considerado que no nosso caso não existe este problema.

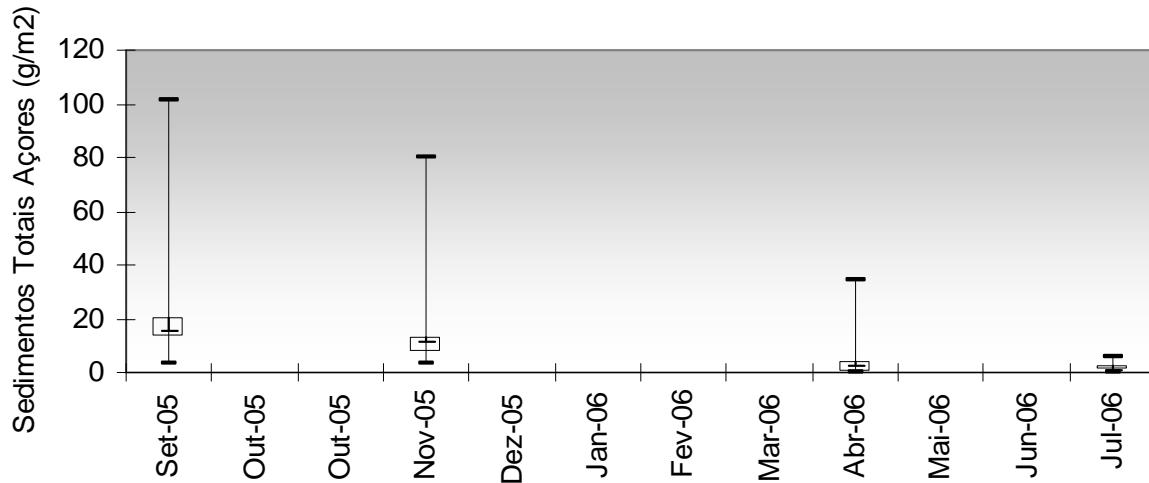


Figura 4-36. Evolução temporal das perdas de sedimentos medidas por períodos (Set-05 n=10; Nov-05 n= 8; Abr-06 n=8; Jul-06 n=8).

As caixas de valores mostradas na Figura 4-36 agrupam as taxas de sedimentos totais medidas nas 34 simulações de chuva no tempo. Verifica-se que existem parcelas que produzem máximos que decrescem nos três primeiros períodos (100, 80 e 40 g/m²) sobre uma base inferior a 20 g/m² que diminui até valores próximos a 2 g/m² em Julho. Quando comparado com o trabalho de Ferreira et al., 2005b para um fogo de alta intensidade acontecido em Maio de 1999 num eucaliptal sobre xistos na localidade de Caratão (29 g/m²), vemos que o nosso valor mediano no primeiro período concorda com a medição de este autor.

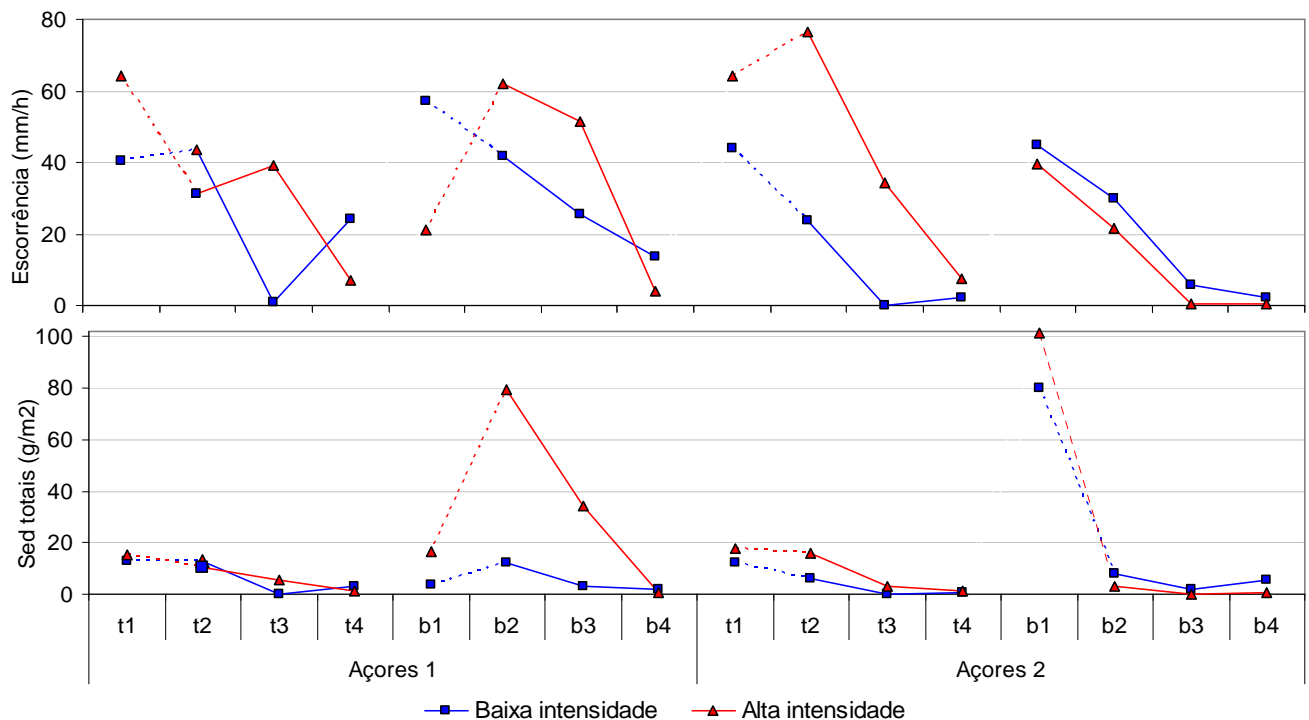


Figura 4-37. Escorrência e sedimentos totais produzidos em cada parcela e em cada período.

Na Figura 4-37 verifica-se serem as simulações de alta intensidade a produzirem maior erosão, mas nem sempre é devido a uma maior geração de escorrência. As correlações entre produção de escorrência e de erosão são positivas (ver anexo 4; $r = 0.44$), mas como se pode observar na Figura 4-35 há parcelas que ainda com pouca erosão geram muita escorrência. O que sim se aprecia claramente é que as parcelas que produziram mais erosão se encontram na base das encostas. Já no 4º período todas as parcelas se aproximam a umas taxas muito baixas, quando

comparadas com outros estudos. Ferreira et al., 2005b encontrou valores nos pinhais de Caratão de 7 g/m², e 0.5 g/m² no mato de Aigra Nova. Ambas as áreas não estavam queimadas, as quais induz a pensar que já no segundo ano a erosão em Açores voltou ao seu nível de base. Também Benito et al., 2003 encontrou valores de 7 até 0.94 g/m² em pinhais não queimados sobre gneiss com alta repelência.

Na Tabela 4-6 podemos observar os valores médios da escorrência e da conseguinte erosão em cada período. Há que salientar que utilizamos duas intensidades de chuva, pelo que a efeitos médios teremos de pensar numa intensidade de chuva média de 64.19 (±0.66) mm/h. Para cada período e área temos n=4, excepto Setembro-05', que temos n=2.

Tabela 4-6. Resposta hidrológica e de erosão média para cada período estudado.

Período	Escorrência (mm/h)		Taxa de escorrência (%)		Concentração de sedimentos (g/l)		Sedimentos (g/m ²)	
	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
Setembro-05'		30.29		47.7		0.17		11.59
Setembro 05	45.77	49.54	71.1	83.8	0.35	0.34	12.12	54.49
Novembro 05	44.61	37.42	71.2	57.3	0.84	0.23	28.71	8.10
Abril 06	29.20	10.09	41.8	13.7	0.30	0.26	10.74	1.29
Julho 06	12.21	3.02	23.9	4.8	0.15	0.48	1.57	1.83
MÉDIAGLOBAL			51.9	44.3			13.2	15.9

Verifica-se uma diminuição da erosão e da escorrência com o tempo, e também percebemos algumas diferenças nos valores que podem ser devidas ao facto de utilizar parcelas móveis ou fixas. Por exemplo, em Açores 2, durante o período 1º (Setembro-05'), os valores de escorrência e erosão foram muito inferiores aos medidos no período 2º. Ao utilizarmos parcelas diferentes a dispersão dos valores vai aumentar.

Chama à atenção encontrar taxas de sedimentos de 0.48 g/l em Julho para Açores 2, sobre tudo porque difere da erosão produzida (1.83 g/m²). Este problema está relacionado com a baixa quantidade de sedimentos amostrados, e será abordado no seguinte subcapítulo.

4.3.4 Concentração de sedimentos.

Em cada simulação de chuva foram tiradas normalmente 5 amostras de escorrência. Na Figura 4-38 mostram-se os tempos médios que se correspondem com cada uma dessas amostras, podendo assim ser avaliada a variação das concentrações de sedimentos dentro de cada simulação.

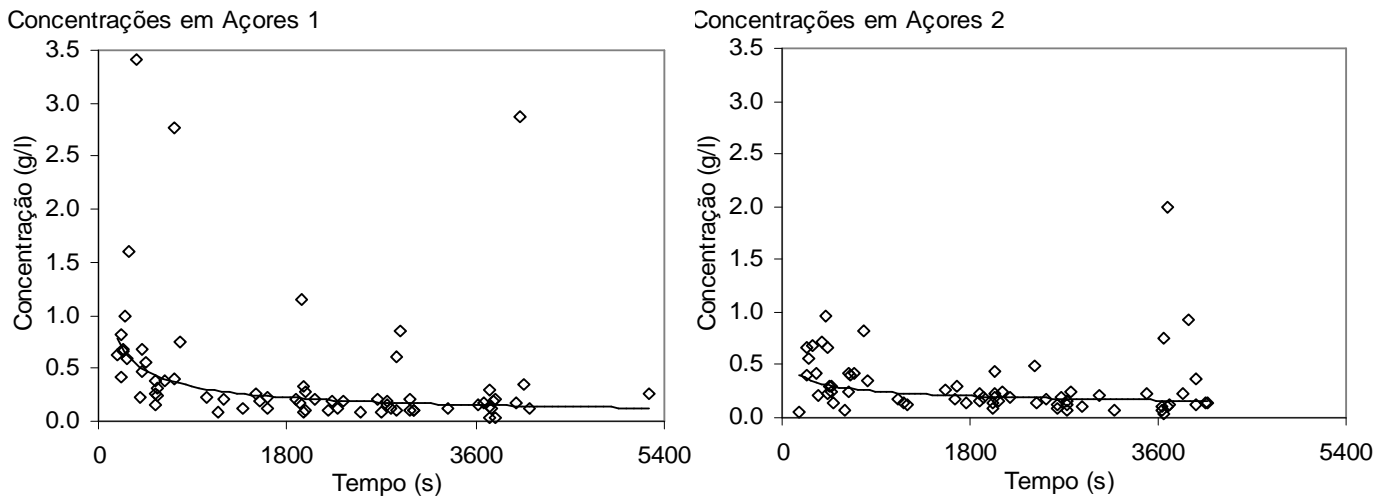


Figura 4-38. Concentrações de sedimentos tiradas nas amostras das simulações de chuva.

Por serem tomadas 5 amostras durante a simulação aparecem na Figura 4-38 agrupamentos de pontos:

- a) em torno ao início (“*rs1*”²¹) as concentrações são as mais altas de cada experiência e de facto é quando os sedimentos mais móveis são arrastados e a concentração é maior,
- b) justo após do início (*rs2*, logo a seguir à *rs1*) com valores geralmente inferiores ao da *rs1* e que ainda têm uma carga importante de sedimentos,
- c) outros dois agrupamentos depois da metade da simulação (*rs3* e 4) bastante estáveis e ordens de grandeza semelhantes depois da remoção e lavado de sedimentos durante a primeira meia hora,
- d) o último após 3600 segundos, quando a chuva já parou, que se corresponde com o que podíamos chamar “escorrência terminal”, e onde aparecem concentrações muito elevadas.

Estas últimas são as amostras de escorrência tomadas após a chuva parar (*rs5*), quando a escorrência está a acabar. Nestas condições não é possível que a concentração de sedimentos seja maior do que as concentrações durante a chuva. Quando o volume da amostra recolhida é menor a 100 ml a análise de sedimentos no laboratório tem maiores hipóteses de gerar erros. Tanto na Figura 4-38 direita como esquerda podem-se observar vários destes pontos.

A regressão que mais se ajustou é de tipo potência, o valor de R^2 foi de 0,31 para Açores 1 ($Y=12.94x^{-0.54}$) e ainda menor para Açores 2 ($R^2=0,12$; $y=1.86x^{-0.29}$). Estes coeficientes estão afectados pela presença dos “outliers” depois dos 3600 segundos. Quando removidos estes valores anómalos os coeficientes antes descritos melhoram para Açores 1 (0,44) e Açores 2 (0,31). Os pontos altos em Açores 1; que mostram concentrações por cima de 1,5 g/l correspondem-se com a simulação ba2, que foi a que gerou maior erosão em todos os períodos. Benito et al., 2003 encontrou concentrações de 0.84-0.05g/l para um pinhal em Galicia, 12.65-3.64 g/l para solo lavrado, sempre maiores concentrações em períodos húmidos e sem coberto.

²¹ A codificação empregada para as amostras de escorrência vem do inglês: *runoff sample*

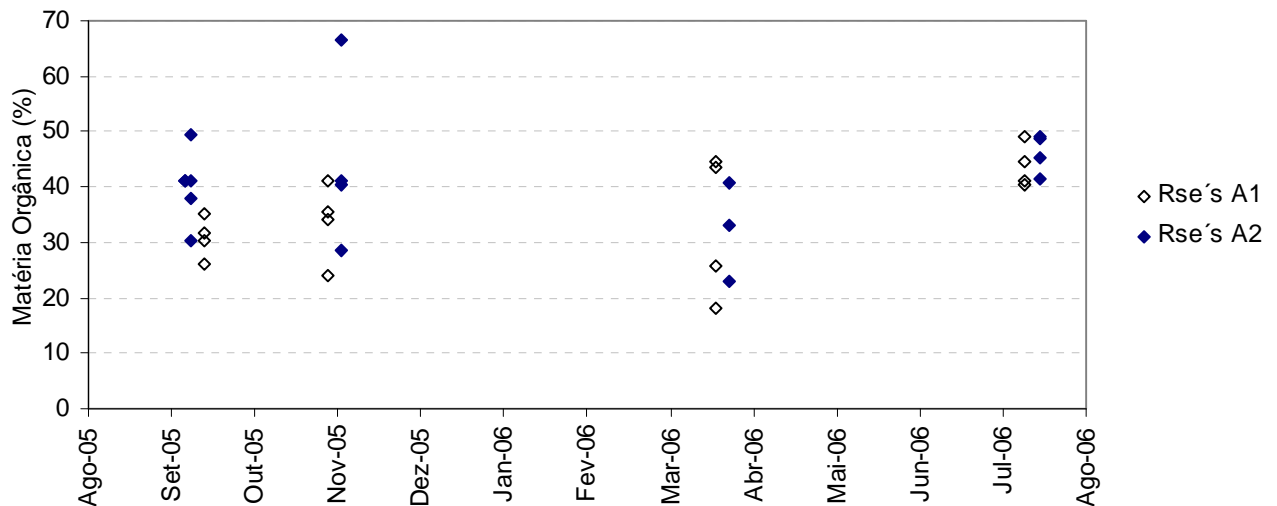


Figura 4-39. Percentagem de matéria orgânica medido sobre o total de sedimentos medido em cada simulação de chuva.

Uma análise da evolução da percentagem de matéria orgânica com o tempo pode ser vista na Figura 4-39. Ainda que parece decrescer ligeiramente durante os três primeiros períodos, ao final do estudo as percentagens aumentam até 45%, se calhar por ter amostras muito pequenas e taxas de erosão muito baixas. Isto pode indicar que não existe um esgotamento da camada de cinzas. Com um valor médio de 36%, o material orgânico erodido em Açores encontra-se no meio dos valores obtidos por Ferreira et al., 2005b para o incêndio de Caratão e o fogo controlado de Cadafaz. (54% e 24% respectivamente). A área controlo não queimada analisada no mesmo trabalho (pinhal adulto em Caratão) mostrou valores de 19% (com umas taxas de erosão de 0.5 g/m² e escorrência de 8%).

4.4 Aplicação do modelo MEFIDIS.

4.4.1 Parametrização inicial.

Como já foi referido no capítulo 3.3.2, a parametrização inicial do modelo é baseada nas medições de campo e laboratório, frequentemente transformadas a través de funções de pedotransferência. Definiram-se três conjuntos de valores:

-as medianas (ORIG),

-os máximos ou mínimos, dependente do parâmetro que maximizassem (Cal max) ou minimizassem (Cal min) a escorrência e erosão modelada.

Segundo estas três disposições dos parâmetros se fez correr o modelo para as parcelas de calibração A1-tb, A1-ta, A2-tb e A2-ta para os quatro eventos de cada parcela. Os resultados de escorrência são mostrados na Tabela 4-7.

Tabela 4-7. Resultados dos diferentes critérios de avaliação para a parametrização inicial.

Parametrização base (Cal 1).									
	ORIG			Cal max			Cal min		
	Erro (bias)	r	Nash-Sutcliffe	Erro (bias)	r	Nash-Sutcliffe	Erro (bias)	r	Nash-Sutcliffe
Global	-19.47	0.31	-0.67	-12.76	0.29	-0.38	-24.69	0.28	-1.06
A1	-12.11	0.41	-0.38	-2.18	0.37	-0.09	-18.66	0.48	-0.75
A2	-26.84	0.54	-0.81	-23.34	0.50	-35.75	-30.72	0.64	-19.04
A1-tb	-14.71	0.52	-0.59	-4.66	0.47	-0.01	-20.46	0.55	-1.15
A1-ta	-9.51	0.24	-0.35	0.31	0.19	-0.23	-16.86	0.35	-0.60
A2-tb	-20.17		-0.84	-20.17		-0.84	-20.17		-0.84
A2-ta	-33.51	0.72	-1.57	-26.52	0.53	-0.96	-41.27	0.83	-2.45

Os resultados de erosão foram muito fracos, o modelo infravalorou a escorrência entre 12 e 20 mm, o erro observado é menor na parametrização Cal Max, e o coeficiente de Nash-Sutcliffe é inferior à unidade nos três cenários (Tabela 4-7).

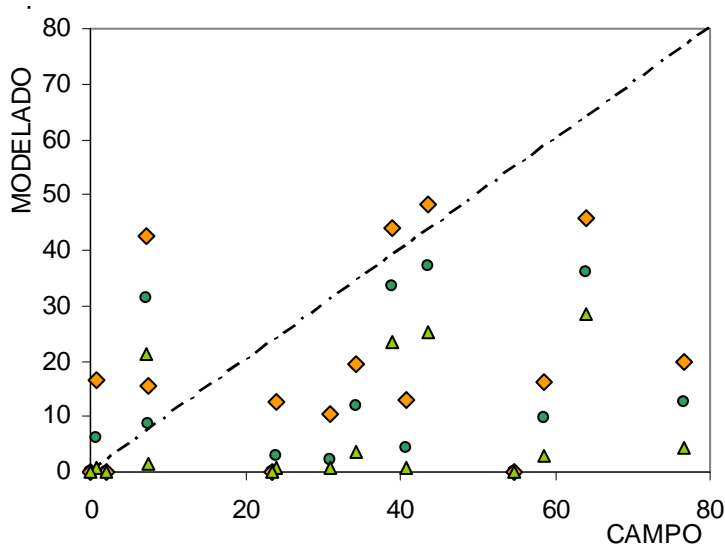


Figura 4-40. Relação entre a escorrência observada e a modelada na calibração n°1 (n=48).

Na Figura 4-40 observa-se que relação entre a escorrência observada e a parametrização com os valores medianos (ORIG; $r=0.31$) se situara no meio das parametrizações “Cal max” ($r=0.29$) e “Cal min” ($r=0.28$). Comprova-se que o modelo está a calcular a escorrência por baixo dos valores observados.

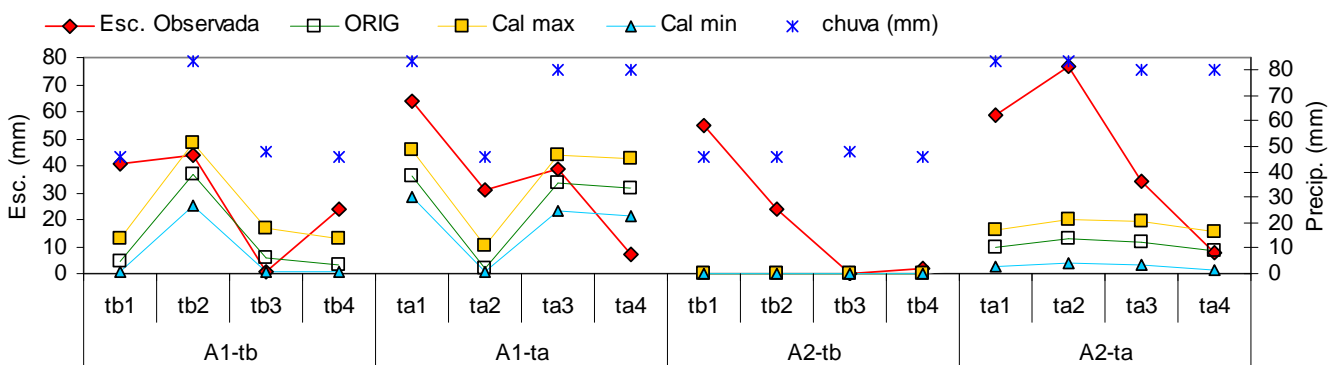


Figura 4-41. Calibração n°1 nas 4 parcelas de calibração.

Na Figura 4-41 é mostrada a escorrência observada frente aos resultados das parametrizações. Em Açores 1 o modelo consegue, aproximar-se à curva da escorrência observada durante os quatro períodos para os três cenários, mas em Açores 2 o modelo mostra respostas homogêneas, e na parcela tb não resposta (N-S inferior em Açores 2).

A análise da sensibilidade feita teve em conta os principais parâmetros de entrada para as três parametrizações englobadas na calibração nº1, para um total de 32 corridas. São determinados os parâmetros cuja oscilação afecta em maior medida as predições do modelo, antes de ser este calibrado. A análise de sensibilidade da escorrência pode ser observada na Tabela 4.8. Os parâmetros seleccionados foram aqueles que mudam com cada cenário (máximo, mediano e mínimo). Do resto de parâmetros só temos um valor, pelo que não será possível efectuar a análise da sensibilidade.

Tabela 4-8. Sensibilidade da escorrência a diferentes parâmetros de entrada (n= 32).

Ordem	Parâmetro	Unidade	Gama ²²		Sensibilidade
1	Surface retention	mm	1.18	6.20	-294.69
2	Ksat	cm/h	1.45	4.30	66.69
3	D50	mm	0.06	0.16	-13.38
4	Clay fraction	%	6.20	13.13	2.35
5	psi	cm	10.58	15.86	1.86
6	Initial soil moisture content	% vol.	0.00	46.65	1.49
7	Shear strength	kPa	11.76	58.80	0.97
8	Effective soil moisture capacity	%	39.01	44.65	0.46

A retenção superficial, Ksat e D50 afectam com maior medida à produção de escorrência. Por outro lado, já foi referida a importância da repelência no processo de infiltração-escorrência (sub capítulo 4.1.5). Ksat e psi (derivadas da análise textural por médio de funções de pedotransferência) são os parâmetros que podem estar afectados pela repelência, e serão os alterados nas calibrações.

A sensibilidade da erosão a diferentes parâmetros é mostrada na Tabela 4-9. Os três primeiros factores dizem respeito ao processo de infiltração. De novo é evidenciada a importância de realizar uma boa calibração destes parâmetros. No sub capítulo 4.2.1 falou-se da importância da energia da chuva nas simulações, e para corrigir este facto, pode ser calibrado o factor shear strength, que é uma medida da resistência do solo a ser mobilizado. Ainda que parâmetros escolhidos para realizar as calibrações da escorrência afectarão também à erosão produzida, teremos de calibrar também o shear strength para calibrar a erosão. Pelo geral teremos de aumentar a resistência do solo à denudação para conseguir que o modelo não sobrestime a erosão.

Tabela 4-9. Sensibilidade da erosão a diferentes parâmetros de entrada (n= 32).

Ordem	Parâmetro	Unidade	Gama		Sensibilidade
1	Surface retention	mm	1.18	6.20	-4.721
2	Ksat	cm/h	1.45	4.30	1.041
3	Escorrência	mm	0.00	48.22	0.263
4	Shear strength	kPa	11.76	58.80	0.013
5	psi	cm	10.58	15.86	0.011
6	Clay fraction	%	6.20	13.13	-0.010
7	Initial soil moisture content	% vol.	0.00	46.65	0.009
8	D50	mm	0.06	0.16	-0.033
9	Effective soil moisture capacity	%	39.01	44.65	0.001

²² A gama de oscilação dos parâmetros obteve-se à partir dos valores medidos no campo e laboratório.

4.4.2 Calibração da escorrência.

Na Tabela 4-10 são sintetizadas as modificações que as calibrações introduzem nos parâmetros. Também serão modeladas as parametrizações de cada calibração indicadas com uma cruz. A presença de repelência não é tida em conta pelo modelo nem pelas PTF's, e por tanto teremos de modificar os valores teóricos da velocidade de infiltração e sucção do solo nas calibrações. Enquanto que a calibração 2 não altera os valores de psi, a cal 3 os divide à metade. A calibração 4 introduz uma escala de valores que diminuem ks_{at} e psi conforme a repelência aumenta e a calibração 5 incrementa este efeito. A calibração 7 altera o psi com o desvio padrão da repelência e o ks_{at} só quando a repelência é severa. Por último, a calibração 8 minimiza ambos parâmetros acentuadamente quando a repelência é maior de 5. É mostrada também a calibração feita à resistência do solo (soil shear strenght) que irá influir na erosão.

Tabela 4-10. Caracterização das calibrações utilizadas.

		Cal 2	Cal 3	Cal 4	Cal 5	Cal 7	Cal 8	
Parametriz. efectuadas	ORIG	+	+	+	+	+	+	
	Cal max	+		+	+	+	+	
	Cal min	+		+	+	+	+	
Factor de multiplicação do K _{sat}	MED	MED	MED	MED	MED	MED	MED	
	0	1	1	2	1	1	1	
	1	1	1	1	1	1	1	
	2	1	1	1	1	1	1	
	3	1	1	1	1	1	1	
	4	1	1	1/2	1/3	1	1	
	5	1	1	1/2	1/3	1	1	
	6	1	1	1/3	1/4	1	1/10	
	7	1/2	1/2	1/3	1/4	1/7	1/10	
8	1/2	1/2	1/4	1/5	1/7	1/10		
Factores de multiplicação do PSI	Dev. Pd.	MED	MED	MED	MED	MED	Dev. Pd.	MED
	0	0	1	1	2	1	1/100	1
	0.5	1	1	1	1	1	1/100	1
	1	2	1	1	1	1	1/100	1
	1.5	3	1	1	1	1	1/100	1
	2	4	1	1	1/2	1/3	2	1
	2.5	5	1	1	1/2	1/3	2	1
	3	6	1	1	1/3	1/4	2	1/1000
	3.5	7	1	1/2	1/3	1/4	2	1/1000
4	8	1	1/2	1/4	1/5	2	1/1000	
SSS	Soil shear strenght							
		1	1	1	1	4	4	

Tabela 4-11. Resultados da calibração da escorrência.

		CAL1			CAL2	CAL3	CAL4	CAL5	CAL7	CAL8
		ORIG	Cal max	Cal min						
A1&2	BIAS (Erro)	-19.47	-12.76	-24.69	-9.63	-1.19	-1.13	5.28	6.58	8.25
	r	0.31	0.29	0.28	0.55	0.54	0.49	0.54	0.70	0.62
	Nash-Sutcliffe	-0.67	-0.38	-1.06	0.10	0.23	-0.01	0.11	0.36	0.03
A1	BIAS (Erro)	-12.11	-2.18	-18.66	-4.41	5.03	1.21	8.89	6.42	5.94
	r	0.41	0.37	0.48	0.67	0.63	0.48	0.57	0.77	0.79
	Nash-Sutcliffe	-0.38	-0.09	-0.75	0.32	0.24	-0.35	-0.12	0.33	0.28
A2	BIAS (Erro)	-26.84	-23.34	-30.72	-14.85	-7.42	-3.46	1.66	6.74	10.57
	r	0.54	0.50	0.64	0.54	0.56	0.52	0.55	0.67	0.51
	Nash-Sutcliffe	-0.81	-0.53	-1.22	-0.01	0.23	0.16	0.23	0.38	-0.09
A1-tb	BIAS (Erro)	-14.71	-4.66	-20.46	-6.93	2.51	1.71	6.17	4.25	3.42
	r	0.52	0.47	0.55	0.71	0.68	0.86	0.86	0.62	0.80
	Nash-Sutcliffe	-0.59	-0.01	-1.15	0.12	0.22	0.45	0.40	-0.25	-0.18
A1-ta	BIAS (Erro)	-9.51	0.31	-16.86	-1.89	7.55	0.71	11.61	8.59	8.46
	r	0.24	0.19	0.35	0.65	0.58	0.12	0.19	0.92	0.85
	Nash-Sutcliffe	-0.35	-0.23	-0.60	0.41	0.20	-1.02	-0.57	0.68	0.55
A2-tb	BIAS (Erro)	-20.17	-20.17	-20.17	-16.47	-10.12	-4.11	-0.48	2.30	8.43
	r				0.68	0.52	0.53	0.54	0.81	0.55
	Nash-Sutcliffe	-0.84	-0.84	-0.84	-0.43	0.00	0.24	0.29	0.56	0.11
A2-ta	BIAS (Erro)	-33.51	-26.52	-41.27	-13.23	-4.73	-2.81	3.80	11.18	12.72
	r	0.72	0.53	0.83	0.34	0.33	0.34	0.33	0.41	0.27
	Nash-Sutcliffe	-1.57	-0.96	-2.45	-0.15	0.06	-0.25	-0.15	-0.02	-0.71

Na Tabela 4-11 são apresentados os resultados das 6 calibrações efectuadas, tendo sido seleccionada a parametrização ORIG. Para todo o conjunto de parcelas e eventos a que consegue melhores resultados é a calibração 7. Tanto a cal 7 como a 8 mostram coeficientes de Nash-Sutcliffe negativos em duas das quatro parcelas estudadas, mas Em Açores 2 a Cal 8 não consegue coeficientes de N-S estar por cima de 0. Serão escolhidas ambas calibrações para realizar a validação.

4.4.3 Validação da escorrência.

Na Tabela 4-12 são apresentados os resultados da validação nas quatro parcelas (A1-bb, A1-ba, A2-bb, A2-ba) com quatro eventos e nas duas parcelas com um evento A2-tb1 e A2-ta1. Assim mesmo, mostra-se o n empregado em cada calibração.

Tabela 4-12. Validação da Escorrência.

		n	CAL7 ORIG	CAL8 ORIG
GLOBAL	BIAS (Erro)		6.95	12.66
	r	18	0.43	0.53
	Nash-Sutcliffe		-0.23	-0.46
A1	BIAS (Erro)		2.48	2.63
	r	8	0.84	0.76
	Nash-Sutcliffe		0.64	0.39
A2	BIAS (Erro)		10.52	20.68
	r	10	0.12	0.46
	Nash-Sutcliffe		-0.92	-1.16
A1-bb	BIAS (Erro)		-3.08	-3.24
	r	4	0.59	0.65
	Nash-Sutcliffe		-3.76	-5.65
A1-ba	BIAS (Erro)		8.04	8.50
	r	4	0.91	0.73
	Nash-Sutcliffe		0.70	0.38
A2-bb	BIAS (Erro)		1.39	7.51
	r	4	0.65	0.40
	Nash-Sutcliffe		0.41	-0.30
A2-ba	BIAS (Erro)		39.97	41.58
	r	4	0.80	0.55
	Nash-Sutcliffe		-5.25	-7.18
A1-tb´	BIAS (Erro)	1	-29.76	4.81
A1-ta´	BIAS (Erro)	1	-30.50	5.62

Ao analisar todos os índices em conjunto percebe-se que o modelo, no global não se consegue ajustar bem aos resultados. As parcelas de Açores 1 foram melhor modeladas que as de Açores 2, onde aconteceram os maiores erros. A validação teve piores resultados do que a calibração enquanto à escorrência.

4.4.4 Calibração da erosão.

A Tabela 4-10 mostrou as modificações feitas na resistência do solo em cada calibração. No entanto, nas primeiras calibrações o modelo prediz perdas de até 700g por parcela (2.500 g/m², Coeficiente de Nash-Sutcliffe de até -260000 na cal 5). As calibrações 7 e 8 potenciam os valores da resistência do solo numa tentativa de equilibrar a fraca energia cinética da chuva. Na Figura 4-42 pode-se apreciar esta redução no erro médio nas calibrações 7 e 8.

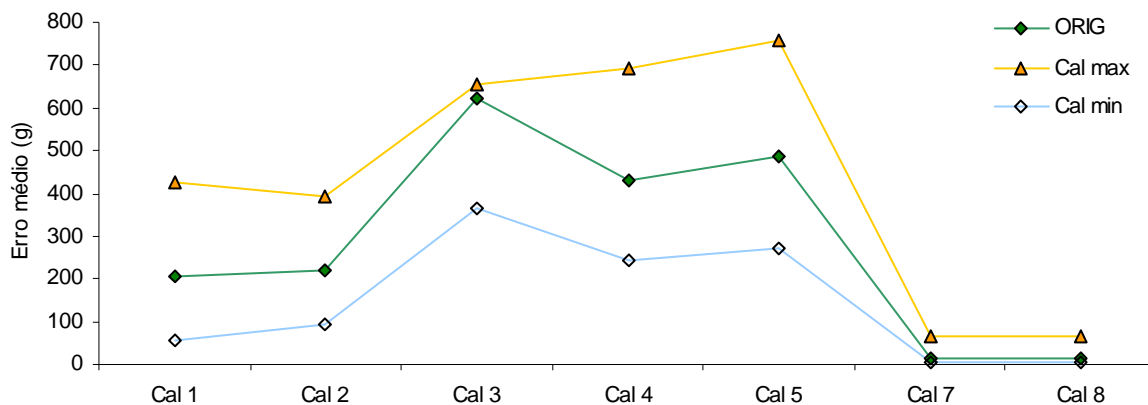


Figura 4-42. Erro médio na erosão em cada um dos cenários analisados em cada calibração.

Por serem muito fracos, na Tabela 4-13 só se mostram os resultados das calibrações 7 e 8, para o global das 16 simulações por áreas e por parcelas que agrupam os quatro eventos.

Tabela 4-13. Resultados da calibração da erosão.

		CAL7	CAL8
		ORIG	ORIG
GLOBAL	BIAS (Erro)	13.25	13.65
	r	0.41	0.42
	Nash-Sutcliffe	-275.31	-280.53
A1	BIAS (Erro)	25.16	24.69
	r	0.78	0.78
	Nash-Sutcliffe	-859.38	-868.63
A2	BIAS (Erro)	1.35	2.60
	r	0.51	0.36
	Nash-Sutcliffe	-0.79	-4.12
A1-tb	BIAS (Erro)	20.88	20.61
	r	0.91	0.90
	Nash-Sutcliffe	-363.02	-377.32
A1-ta	BIAS (Erro)	29.44	28.77
	r	0.80	0.80
	Nash-Sutcliffe	-1449.91	-1453.44
A2-tb	BIAS (Erro)	-0.21	0.58
	r	0.93	0.62
	Nash-Sutcliffe	0.68	0.26
A2-ta	BIAS (Erro)	2.91	4.63
	r	0.32	0.16
	Nash-Sutcliffe	-1.83	-7.19

4.4.5 Validação da erosão.

Na Tabela 4-14 são apresentados os resultados da validação para os eventos reproduzidos nas parcelas A1-bb, A1-ba, A2-bb, A2-ba, A2-tb1´ e A2-ta1´ (n=18).

Tabela 4-14. Resultados da validação da erosão.

		n	CAL7 ORIG	CAL8 ORIG
GLOBAL	BIAS (Erro)	18	8.04	10.47
	r		0.28	0.23
	Nash-Sutcliffe		-6.12	-7.56
A1	BIAS (Erro)	8	22.05	25.31
	r		0.57	0.49
	Nash-Sutcliffe		-22.12	-27.05
A2	BIAS (Erro)	10	-3.17	-1.41
	r		0.71	0.48
	Nash-Sutcliffe		0.25	0.20
A1-bb	BIAS (Erro)	4	13.49	18.75
	r		0.99	0.85
	Nash-Sutcliffe		-447.61	-626.43
A1-ba	BIAS (Erro)	4	30.62	31.88
	r		0.43	0.36
	Nash-Sutcliffe		-23.95	-27.65
A2-bb	BIAS (Erro)	4	-5.14	-4.34
	r		0.80	0.74
	Nash-Sutcliffe		0.70	0.71
A2-ba	BIAS (Erro)	4	-1.96	-0.90
	r		0.96	0.86
	Nash-Sutcliffe		0.51	0.50
A1-tb´	BIAS (Erro)	1	-1.90	-0.13
A1-ta´	BIAS (Erro)	1	-1.46	6.97

A erosão é sobrestimada de 8 a 10.5 gramas por parcela para o global, respectivamente para as calibrações 7 e 8, mas por Áreas acontece que Açores 1 gera erros de 23 e 25 gramas enquanto que em Açores 2 são de -3 e -1 gramas para as calibrações 7 e 8 respectivamente.

Na validação da erosão a execução do modelo melhorou com respeito à calibração, mas o coeficiente de Nash-Sutcliffe é negativo no global. Açores 2 foi modelado aceitavelmente bem, com resultados positivos, mas Açores 1 obteve resultados muito fracos. As duas calibrações correram de modo similar, se bem a calibração obteve coeficientes de Nash-Sutcliffe menos fracos.

Na Figura 4-43 podem-se observar as amplitudes de erro e erro médio na escorrência e na erosão para todas as parcelas estudadas.

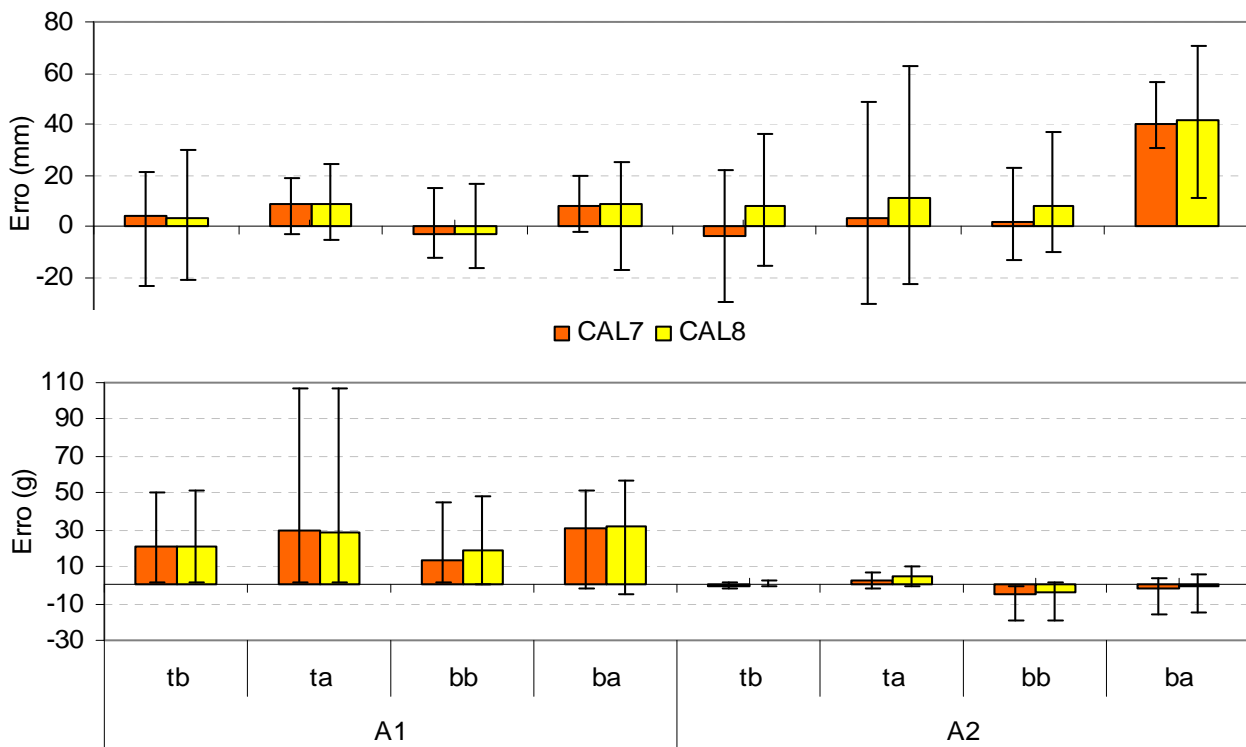


Figura 4-43. Erro médio, máximo e mínimo na modelação da escorrência e da erosão obtida nos quatro períodos em cada parcela.

Verifica-se que das 8 parcelas só A2-ba apresenta um erro médio superior às outras e é a responsável pelo grande erro na validação da escorrência. Não é casualidade que esta parcela seja a que apresente menor escorrência. Pode existir alguma particularidade, alguma característica intraparcelar que não foi considerada, que faz esta parcela diferente das características gerais de Açores e que o modelo não pode resolver. Pensou-se sobre todo em características texturais ou numa repelência heterogénea. As outras 7 parcelas foram modeladas aceitavelmente bem, desde o ponto de vista do erro médio para os quatro eventos em conjunto. A amplitude de erro é menor na calibração 7 do que na 8 por ter em conta o desvio padrão da repelência como “moderador” da escorrência.

Resulta evidente uma maior amplitude de erro e erro médio na erosão de Açores 1. Agora não se pode tratar de uma consideração para uma parcela isolada, mas sim para o local de Açores 1. No capítulo 4.3 (Figura 4-33) comprovou-se que a erosão é ligeiramente menor em Açores e parece que aqui o modelo prediga de novo resultados maiores aos obtidos. Há alguma peculiaridade que faz com que o modelo prediga altas perdas em Açores 1. Na Figura 4-7 pode-se apreciar uma diferença importante nos valores medianos da resistência do solo entre as duas áreas, resultando Açores 2 claramente mais resistente (diferenças de 0,3 para o torvane até 1,2 Kg/cm² para o penetrómetro), o que parece contradizer com a erosão medida.

5 CONCLUSÕES

Consoante com os objectivos pretendidos por este trabalho chegou-se a conclusões de diversa índole:

Enquanto aos os métodos:

- A realização de pares de simulações de chuva em simultâneo com intensidades de chuva diferentes em parcelas contíguas revelou-se um método óptimo pela grande quantidade de dados produzidos e a possibilidade de serem utilizados como medidores da heterogeneidade temporal e espacial na resposta hidrológica.
- Apesar das dificuldades acontecidas na calibração do simulador de alta intensidade o seu emprego permitiu comparar a reacção do solo perante situações de extrema e alta intensidade da chuva simulada.
- Medições da infiltração no local onde vão ser desenvolvidas as simulações de chuva são recomendadas para complementar o estudo hidrológico do solo e melhorar a modelação com sucesso.

Enquanto aos resultados de escorrência:

- Não há diferenças perceptíveis nas taxas de escorrência entre intensidades de chuva extremas (80mm/h) e altas (45 mm/h).
- As maiores taxas de escorrência foram observadas durante o primeiro período de estudo, 2 meses depois do incêndio (mediana 77%).
- Em períodos sem repelência diminui a produção de escorrência, ficando condicionada à saturação de água no solo.
- Quando alta e homogénea, a hidrofobia controla o processo de escorrência, mas esta diminui quando a repelência é alta e heterogénea.
- Verificou-se que depois de um ano do incêndio acontecer e com valores de repelência na classe 7 e desvio padrão entorno a 1ª escorrência foi inferior a 10%.

Enquanto aos resultados de erosão:

- Ainda que a resistência do solo á erosão é maior em Açores 2, verificou-se ser neste local onde se registaram os maiores valores acumulados.
- As perdas médias durante o período de estudo foram de 14.4 g/m² enquanto que a mediana ficou em 5g/m². O valor máximo medido foi de 101,4 g/m². Os valores acumulados para quatro simulações de chuva sobre uma mesma parcela em períodos consecutivos foram muito variáveis (de 20 até 130 g/m²), sendo a erosão nos primeiros dois primeiros períodos.
- O risco de erosão medido dista muito de ser alto quando comparado com outros estudos que utilizam simulações de chuva.

Enquanto aos resultados de modelação:

- Por não contemplar a energia cinética da chuva simulada nem, a repelência do solo o modelo MEFIDIS só conseguiu modelar os resultados dos quatro períodos aceitavelmente enquanto a escorrência.
- A calibração da escorrência visou diminuir os valores da condutividade hidráulica e do potencial de sucção do solo consoante à classe MED e o desvio padrão da repelência.
- A calibração da erosão visou incrementar os valores da resistência do solo à denudação para corrigir a energia cinética da chuva.
- Por ser uma simplificação dos processos, o modelo considera as variações intraparcelsares claves na produção de escorrência, mas não na produção de erosão.

- O modelo MEFIDIS foi validado para medir o risco de erosão com simulações de chuva com uns resultados gerais pouco aceitáveis para a escorrência (Nash-Sutcliffe: -0.23) e muito fracos para a erosão (-6.1).

Como considerações finais podemos assinalar que as simulações de chuva acompanhadas da modelação constituem uma metodologia apropriada para reconhecer os processos erosivos dominantes e aperfeiçoar os modelos. Pode ser por tanto, uma ferramenta económica válida para a medição do risco de erosão. Também é de que salientar que as simulações de precisam de ser contrastadas com estudos com chuva natural, só assim seria possível validar os resultados e os modelos.

A trajectória seguida durante a realização de este trabalho tem feito possível a abertura de várias linhas de investigação no campo das simulações de chuva e da modelação da erosão. Para já o estudo pode servir para o desenvolvimento e comparação com futuros estudos de erosão em outros ambientes. Também a utilização de parcelas de simulações de chuva de tamanhos diferentes poderia analisar a influência da escala no processo erosivo. Por outro lado, um passo lógico na modelação seria a comparação de resultados com chuva natural e simulada, utilizando diferentes tamanhos de parcelas. Isto iria esclarecer certas lacunas já típicas na hidrologia das áreas ardidas, como o papel dos macroporos e outras sinais capazes de alterar a homogeneidade espacial da repelência à vez que o modelo poderia já considerar a sua importância.

REFERÊNCIAS

- Agassi M., & Bradford JM. 1999. Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil & Tillage Research* 49 (1999) 277±287.
- Benavides-Solorio J., MacDonald L. 2001. Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall small plots, Colorado front Range. *Hydrological Processes* 15, 2931-2952 (2001).
- Benito E., Santiago J.L., De Blas E. & Varela M.E. 2003. Deforestation of water-repellent soils in Galicia (NW Spain): effects on surface runoff and erosion under simulated rainfall. 2003 *Earth Surf. Process. Landforms* 28, 145-155.
- Beven, K., 2000. *Rainfall-Runoff Modelling-the Primer*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Botelho da Costa, J., 1999. *Caracterização e constituição do solo*. 6a Edição. pg 344.
- Cardoso et al., 1971, 1973. *Carta de Solos de Portugal 1:1.000.000*
- Carvalho TMM, Coelho COA, Ferreira AJD, Charlton CA. 2002. Land degradation processes in Portugal: farmers' perceptions of the application of European Agroforestry Programmes 2002 *Land Degradation and Development* 13: 177-188
- Cerdà A, Lasanta T 2005 Long-term erosional responses after fire in the Central Spanish Pyrenees. 1. Water and sediment yield. *Catena*, 60, 59-80.
- Cerdà A., Ibáñez S., Calvo A. 1997. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology* 11, 163-170.
- Cerdà A., Imeson AC., Calvo A. 1995. Fire and aspect induced differences on the erodibility and hydrology of soils at La Costera, Valencia, southeast Spain. *Catena* 24 (1995) 289-304
- Chapra, S.C., 1997. *Surface Water-Quality Modeling*. McGraw-Hill, New York.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, Singapore, 572 pp.
- Coelho COA, Ferreira AJD, Baake M, Keizer JJ. Impacts of prescribed shrubland fire and forest wildfire on overland flow and soil erosion generating processes. 2002a In: Rubio, J.L, Morgan, R.P.C., Asins, S, & Andreu, V. (eds.), 'Proceedings of the Third International Congress Man & Soil at the Third Millennium', Geofoma Ediciones, Logroño, 1485-1496.
- Coelho COA, Ferreira AJD, Boulet AK, Keizer JJ. 2004. Overland flow generation processes, erosion yields and solute loss following different intensity fires. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 37, 3, 233-240.
- Coelho COA, Shakesby RA, González del Tánago M, Ternan L, Walsh RPD, Williams AG. 1995b. IBERLIM: Land management and erosion limitation in the Iberian Peninsula. Final Report to the EC in fulfilment of Project EV5V-0041 'Land management practice and erosion limitation in contrasting wildfire and gullied locations in the Iberian Peninsula (unpublished), 246 pp.
- Coelho COA, Shakesby RA, Walsh RPD. 1995a. Effects of forest fires and post-fire land management practice on soil erosion and stream dynamics, Águeda basin, Portugal. 'Soil and groundwater research report V', European Commission, 91p.
- de Roo, A.P.J., Offermans, R.J.E., Cremers, NHTD. 1996b. LISEM: a single event physically-based hydrological and soil erosion model for drainage basins: II-sensitivity analysis, validation and application. *Hydrol. Process.* 10 (8), 1119- 1126.
- de Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., Ritsema, C.J. 1996a. LISEM: a single event physically-based hydrological and soil erosion model for drainage basins: I-theory, input and output. *Hydrol. Process.* 10 (8), 1107- 1117.
- DeBano LF. 2000. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of hydrology*, Volumes 231-232, 29 May 2000, Pages 4-32.
- Díaz-Fierros F, Benito E, Vega JA, Castelao A, Soto B, Pérez R, Taboada T. 1990. Solute loss and soil erosion in burnt soil from Galicia (NW Spain). In *Fire in Ecosystem Dynamics: Mediterranean and Northern Perspectives*, Goldammer JG, Jenkins MJ (eds). SPB Academic Publishing: The Hague; 103-116.

- Díaz-Fierros F, Benito Rueda E, Pérez Moreira R. 1987. Evaluation of the U.S.L.E. for the prediction of erosion in burnt forest areas in Galicia (N.W. Spain). *Catena* 14: 189-199.
- Doerr S.H., Shakesby R., Walsh RPD. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51 (2000)33-65.
- Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD. 1996. Soil hydrophobicity variations with depth and particle size fraction in burned and unburnt *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* forest terrain in the Águeda basin, Portugal. *Catena*, 27, 25-47.
- Doerr SH., Ferreira AJD., Walsh RPD., Shakesby RA., Leighton-Boyce G., Coelho COA. 2003. Soil water repellency as a potential parameter in rainfall-runoff modelling: experimental evidence at point to catchment scales from Portugal. *Hydrol. Process.* 17, 363-377 (2003).
- Dunjó G., Pardini G., Gispert M. 2004. The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at microplot scale, in a small Mediterranean catchment. *Journal of Arid Environments* 57 (2004) 99-116.
- Favis-Mortlock, DT. 1998. Validation of field-scale soil erosion models using common data sets. In: Boardman, J., Favis-Mortlock, D. (Eds.), *Modelling Soil Erosion by Water*, NATO ASI Series I, Global Environmental Change, vol. 55, pp. 89- 127.
- Ferreira AJD. 1997. Soil erosion in a burned plot: Evaluation based on single event record. In: 'Forest fire risk and Management Proceedings of the European school of climatology and natural hazards course', EU-Comission, 373-380.
- Ferreira A.J.D., Silva J.S., Coelho C.O.A., Boulet AK, Keizer JJ & Carreiras MAM. 2007. Portuguese experience managing fire effects. In Robichaud P. & Cerdà A *restoration Strategies after Forest Fires*. (in press).
- Ferreira AJD. 1989. Três métodos de medição de parâmetros fundamentais na hidrologia de solos. *Actas do V Colóquio Ibérico de Geografia*, León, 21 a 24 de Novembro, 173- 181.
- Ferreira AJD 1996. *Processos hidrológicos e hidro-químicos em povoamentos de Eucalyptus globulus Labill. e Pinus pinaster Aiton*. Ph.D. Thesis on Applied Environmental Sciences Aveiro University, 418pp.
- Ferreira AJD, Coelho COA, Boulet AK, Leighton-Boyce G, Keizer JJ, Ritsema CJ. 2005b. Influence of burning intensity on water repellence and hydrological processes at forest sites in Portugal. *Australian Journal of Soil Research* 43, 327-336.
- Ferreira AJD, Coelho COA, Boulet AK, Lopes, FP. 2005a. Temporal patterns of solute loss following wildfires in Central Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 14, 401-412.
- Ferreira AJD, Coelho COA, Walsh RPD, Shakesby RA, Ceballos A, Doerr SH. 2000. Hydrological implications of soil water repellency in *Eucalyptus globulus* forests, north-central Portugal. *Journal of Hydrology*, 231-232, 165-177.
- Flanagan, D.C., Nearing, M.A. 1995. *USDA Water Erosion Prediction Project: hillslope profile and watershed model documentation*. NSERL Report no. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette.
- Gimeno-García E, Andreu V, Rubio JL. 2004. Spatial patterns of soil temperatures during experimental fires. *Geoderma*, 118, 17-38.
- Giovannini G, Lucchesi, S, Giachetti M.1988. Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science*, 146, 255-261.
- Govers, G., 1990. Empirical relationships for the transporting capacity of overland flow. *Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ.* 189, 45- 63.
- Imeson AC, Verstraten JM, Van Mullingen EJ, Sevink J. 1992. The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forests. *Catena* 19, 345-361.
- Imeson AC.,Vis M. 1984. Assessing soil aggregate stability by water-drop impact and ultrasonic dispersion. *Geoderma*, Volume 34, Issues 3-4, December 1984, Pages 185-200.
- Inbar M, Tamir M, Wittenberg L. 1998. Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology* 24: 17-33.

- Jetten V., de Roo A., Favis Mortlock D. 1999. Evaluation of field scale and catchment-scale soil erosion models. *Catena* 37 (1999) 521-541.
- Jetten, V., Govers, G., Hessel, R., 2003. Erosion models: quality of spatial predictions. *Hydrological Processes* 17, 887-900.
- Johansen MP, Hakonson TE, Breshears DD. 2001. Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: contrasting forests with shrublands and grasslands. 2001. *Hydrological Processes* 15, 2953-2965.
- 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. D. J. 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*, 2005, 43, 337-349.
- Keizer J.J., Doerr S., Malvar M., Prats S., Oñate M., Coelho C., Ferreira A.J.D. (accepted) 2007. Temporal variation in topsoil water repellency in two recently burnt eucalypt stands in north-central Portugal. Special Issue - Fire Effects on soil properties. *Catena Special Issue* xx(2007) xxx-xxx.
- Kutiel P, Inbar M. 1993. Fire impacts on soil nutrients and soil erosion in a Mediterranean pine forest plantation. *Catena*, 20, 129-139.
- Kutiel P, Lavee H, Segev M, Benyamini Y. 1995. The effect of fire-induced heterogeneity on rainfall-runoff-erosion relationships in an eastern Mediterranean ecosystem, Israel. *Catena* 25: 77-87.
- Lane PNJ., Morris J., Ningnan Z., Guangyi Z., Guoyi Z., Daping X. 2004. Water balance of tropical eucalypt plantations in south-eastern China. *Agricultural and Forest Meteorology* 124 (2004) 253-267.
- Lasanta T, Cerdà A. 2005. Long-term erosional responses after fire in the Central Spanish Pyrenees. 2. Solute Release. *Catena*, 60, 81-100.
- Letey J. 2001. Causes and consequences of fire-induced soil water repellency. *Hydrological Processes* 15: 2867-2875.
- Lucena JM. 2006. Características hidráulicas de solos em eucaliptares recentemente ardidos em la zona centro de Portugal. Relatório de Estágio Licenciatura em Engenharia dos Recursos Florestais. ESAC, Novembro 2006.
- Malvar M. 2007 Resposta hidrológica e de erosão em áreas florestais recentemente ardidas e a sua modelação com MEFIDIS. Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra.
- Mataix-Solera, J., Doerr, SH. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forest in southeastern Spain. *Geoderma* 118, 77-88.
- Meyer, L.D., 1994. Rainfall simulators for soil erosion research. In: Lal, R.(Ed.), *Soil Erosion Research Methods*. 2nd ed. Soil and Water Conservation Society (Ankeny) and St Lucie Press, Delray Beach, FL, pp. 83-103
- Meyer LD, Harmon WC. 1979. Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 22: 100-103.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N. 2001. Erosion modeling. In: Harmon, R.S., Doe, W.W. (Eds.), *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp. 117- 143.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Chisci, G., Torri, D. 1998. The EUROSEM model. In: Boardman, J., Favis-Mortlock, D.T. (Eds.), *Modeling Soil Erosion by Water*, NATOASI Series I-55. Springer, Berlin, pp. 389-398.
- Morris SE, Moses TA. 1987. Forest fire and the natural soil erosion regime in the Colorado Front Range. *Annals of the Association of American Geographers* 77(2): 245-254.
- Nearing M.A., Jetten V., Baffaut, C., Cerdan O., Couturier A., Hernandez M., Le Bissionais Y., Nichols M.H., Nunes J.P., Renschler C.S., Souchère V., van Oost K. 2005. Modelling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena* 61 (2005) 131-154.

- Nearing, M.A. 1998. Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses CATENA, Volume 32, Issue 1, February 1998, Pages 15-22
- Nunes, J.P., Vieira, G., Seixas, J., Gonçalves, P., Carvalhais, N. 2005. Evaluating the MEFIDIS model for runoff and soil erosion prediction during rainfall events. CATENA 61 (2-3), 210-228.
- Pereira V, FitzPatrick EA. 1995. Cambisols and related soils in north-central Portugal: their genesis and classification. Geoderma, 66, 185-212.
- 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
- Pierson FB, Carlson DH, Spaeth KE. 2002. Impacts of wildfire on soil hydrological properties of steep sagebrush-steppe rangeland. International Journal of Wildland Fire, 11, 145-151
- Pinaya I, Soto B, Arias M, Díaz-Fierros F. 1999. Revegetation of burnt areas: relative effectiveness of native and commercial seed mixtures. Land Degradation & Development, 11, 93-98
- Porta J., Lopez-Acevedo M., Roquero C. 1994. Edafologia para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundiprensa. Madrid.
- Prats S. 2001. Efeitos da eucaliptização nas comunidades vegetais da Serra do Caramulo. Relatório Final do curso de Licenciado en Ciências Ambientales. Universidade de Aveiro.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., Miller N. 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. Journal of Hydraulic Engineering-Asce 109 (1): 62-70 1983
- Ritsema CJ, Dekker LW, Hendrickx JMH, Hamminga W. 1993. Preferential flow mechanism in a water repellent soil. Water Resources Research, 29, 2183-2193.
- Robichaud P.R. 2000a. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. 2000b. Journal of Hydrology 231-232 (2000) 220-229.
- Robichaud PR, Beyers JL Neary DG. 2000b. Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments. USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, GTR 63, 85 p.
- Roth C.H., Meyer B. and Frede HG. 1985. A portable rainfall simulator for studying factors affecting runoff, infiltration and soil loss CATENA, Volume 12, Issue 1, 1985, Pages 79-85
- Rulli M.C., Bozzi S., Spada M., Bocchiola D., Roso R. 2006. Rainfall simulations on a fire disturbed mediterranean area. Journal of Hidrology (2006) 327,323-338
- 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.
- Scott DF. 1993. The hydrological effects of fire in South African mountain catchments. Journal of Hydrology, 150, 409-432.
- Scott DF., Schulze RE. 1992. The hydrological effects of a wildfire in a eucalypt afforested catchment. S.A. Forestry Journal, 160, 67-74.
- Severo Marques Gonçalves L, Mehnert K. R., Reutter KJ. 1974. Geologie und Petrologie des gabetes von Oliveira de Azemeis und Albergaria-A-Velha. Freien Universität Berlin-Zentrale Universitätsdruckerei V Aa 4, 1 Berlin, 41.
- Sevink J, Imeson AC, Verstraten, JM. 1989. Humus form development and hillslope runoff, and the effects of fire and management, under Mediterranean forest in NE Spain. Catena, 16, 461-475.
- Shakesby RA, Boakes DJ, Coelho COA, Gonçalves AJB, Walsh RPD. 1996. Limiting the soil degradational impacts of wildfire in pine and eucalyptus forests in Portugal. Applied Geography, vol. 16, No.4 (337-335).
- Shakesby RA, Coelho COA, Ferreira AJD, Terry JP, Walsh RPD. 1993. Wildfire impacts on soil erosion and hydrology in wet Mediterranean forest, Portugal. International Journal of Wildland Fire, 3, 95-110.

- Shakesby RA, Coelho COA, Schnabel S, Keizer J.J., Clarke MA. 2002. Ranking methodology for assessing relative erosion risk and its application to dehesas and montados in Spain and Portugal. *Land Degradation & Development* 13: 129-140 (2002).
- Shakesby RA, Doerr SH, Walsh RPD. 2000. Problems and prospects in determining the hydrological and erosional significance of soil hydrophobicity. *Journal of Hydrology*, 231-232, 178-191.
- Shakesby RA, Walsh RPD, Coelho COA. 1991. New developments in techniques for measuring soil erosion in burned and unburned forest catchments, Portugal. *Zeitschrift fur Geomorphologie Supplementband*, 83, 161-174.
- Sharma, P.P., Gupta, S.C., Foster, G.R., 1993. Predicting soil detachment by raindrops. *Soil Science Society of America Journal* 57 (3), 674- 680.
- 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.
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., Unkrich, C.L. 1995. KINEROS-a kinematic runoff and erosion model. In: Singh, V.J. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, pp. 697-732.
- Soto D, Diaz-Fierros F. 1998. Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model. *Catena*, 31, 257-270.
- Soto, D. and Diaz-Fierros F. 1993. Interactions between plant ash leachates and soil. *International Journal of Wildland Fire*, 3 (4), 207-216.
- Thomas AD, Walsh RPD, Shakesby RA. 1999. Nutrient losses in eroded sediment after fire in eucalyptus and pine forests in the wet Mediterranean environment of northern Portugal. *Catena*, 36, 283-302.
- Thomas AD., Walsh RPD., Shakesby RA. 2000a. Post-fire forestry management and nutrient losses in eucalyptus and pine plantations, northern Portugal. *Land Degradation & Development*, 11, 257-271.
- Thomas AD., Walsh RPD., Shakesby RA. 2000b. Solutes in overland flow following fire in eucalyptus and pine forests, northern Portugal. *Hydrological Processes*, 14, 971-985.
- Toy, T.J., Foster, GR., Renard, KG. 2002. *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Úbeda X., Sala M. 2001. Chemical concentrations in overland flow from different forested areas in a Mediterranean Environment: burned forest at different fire intensity and unpaved road. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 45, 225-238.
- Vacca A, Loddo S, Ollesch G, Puddu R, Serra G, Tomasi D, Aru A. 2000. Measurement of runoff and soil erosion in three areas under different land use in Sardinia (Italy). *Catena*, 40, 69-92.
- Vallejo, R. 2005. *Restoration Mediterranean Forest. Forest Restoration in landscapes. Beyond planting trees.* (Mansourian, S., Vallauri, D., and Dudley, N., eds.): 313-319.: Springer.
- Varela M. E., Benito E., de Blas E. 2005. Impact of wildfires on surface water repellency in soils of northwest Spain *Hydrol. Process.* 19, 3649-3657 (2005)
- Walsh RPD., Boakes DJ., Coelho COA., Ferreira AJD., Shakesby RA., Thomas AD. 1995. Post-fire land management and runoff responses to rainstorms in Portugal, in McGregor, D.F.M. e Thompson, D. (Eds), *Geomorphology and land management in a changing environment*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 283-308.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*, US Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537, US Government Printing Office, Washington, DC.
- Wu, T.H., Hall, J.A., Bonta, J.V. 1993. Evaluation of runoff and erosion models. *ASCE J. Irrig. Drain. Eng.* 119 (4), 364- 381.

Anexo 1: Dados climáticos

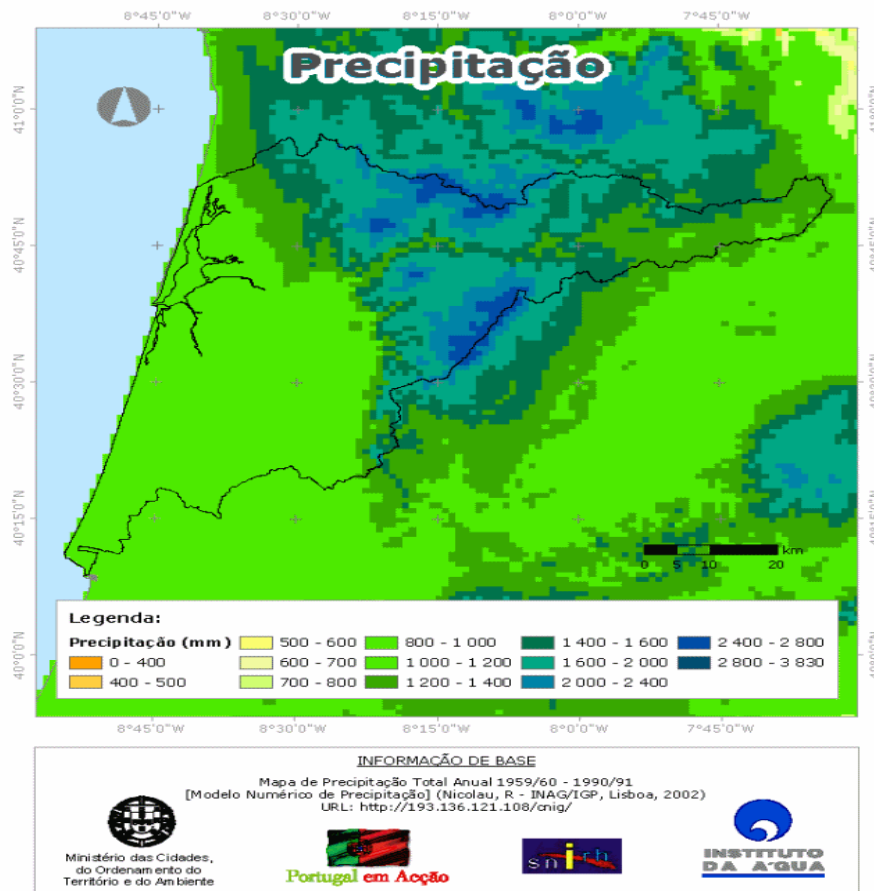


Figura A1-1: Mapa de precipitações médias no distrito de Aveiro. Fonte: <http://snirh.inag.pt/>

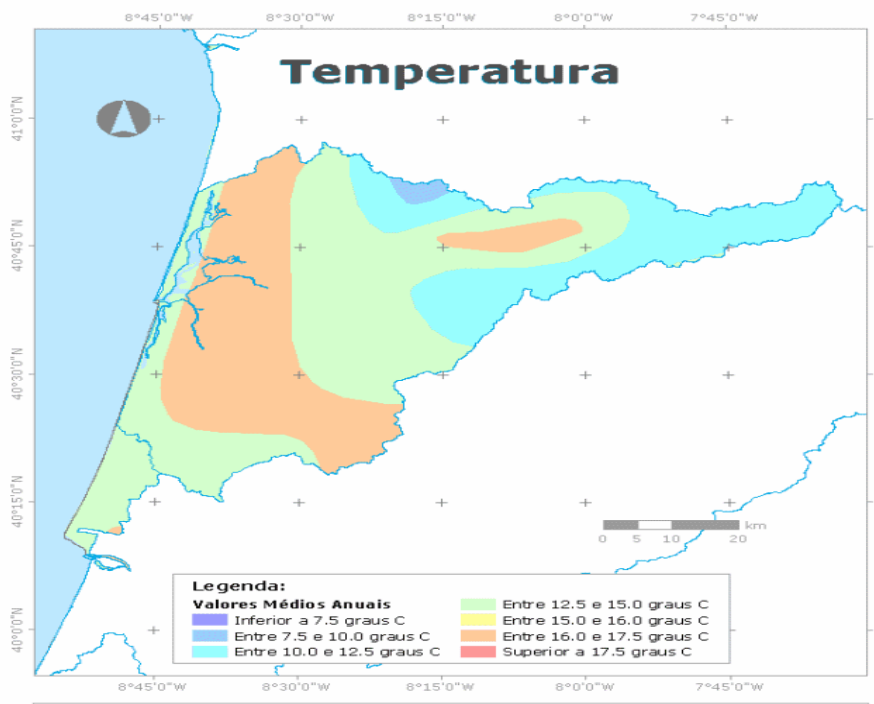


Figura A1-2: Temperaturas médias no distrito de Aveiro. Fonte: <http://snirh.inag.pt/>

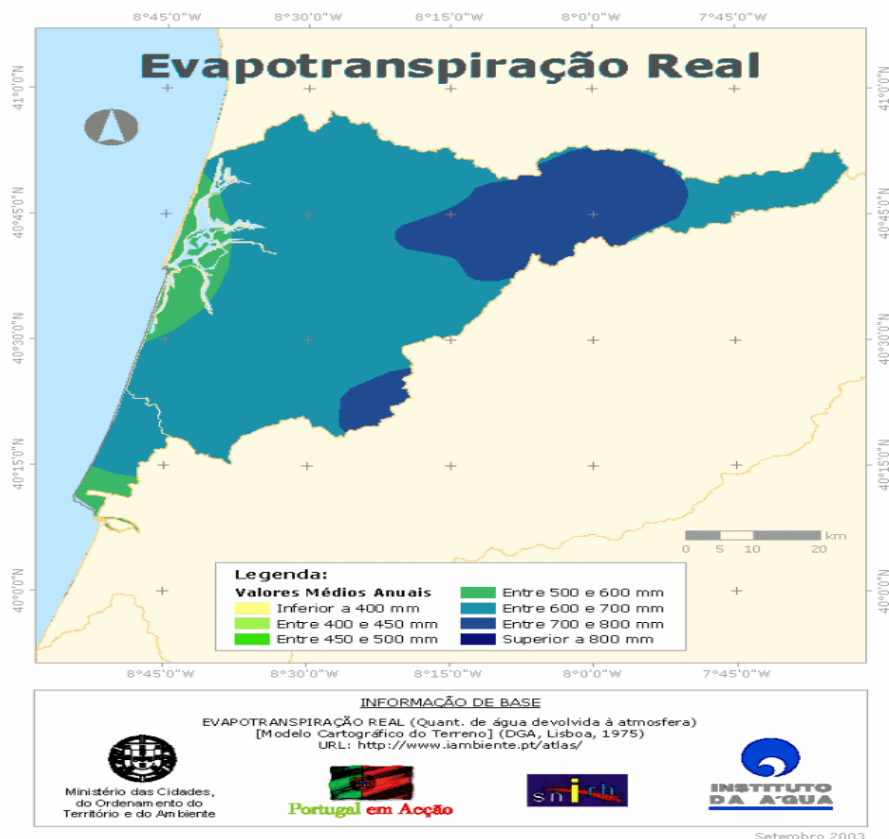
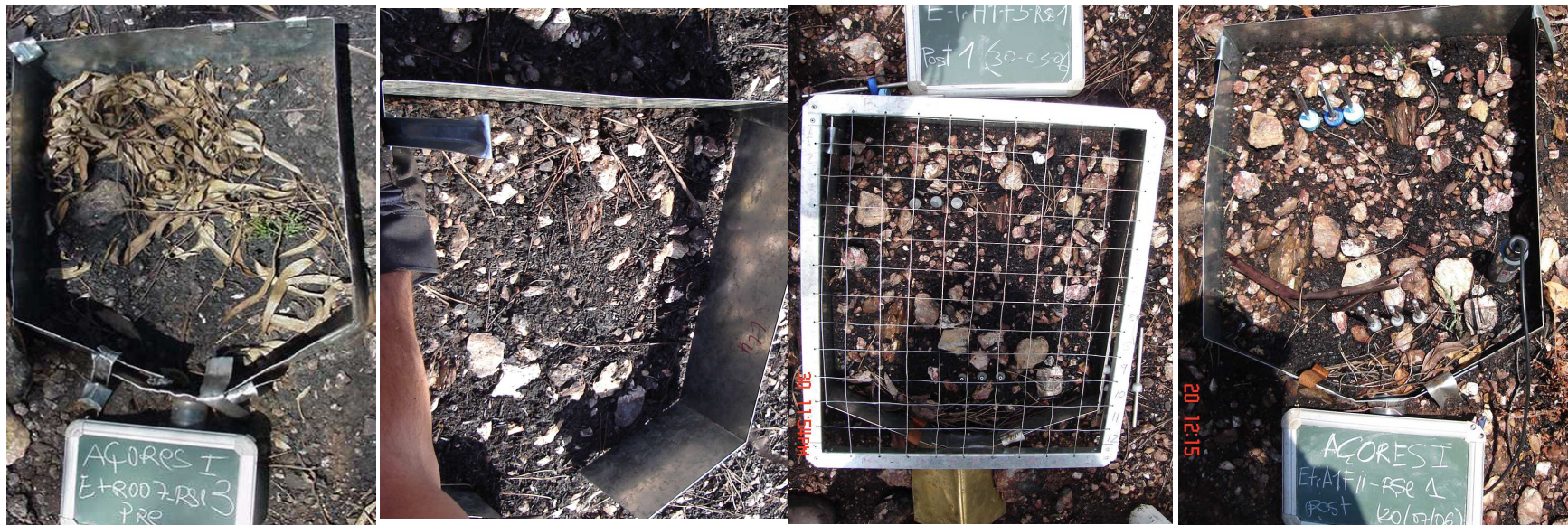


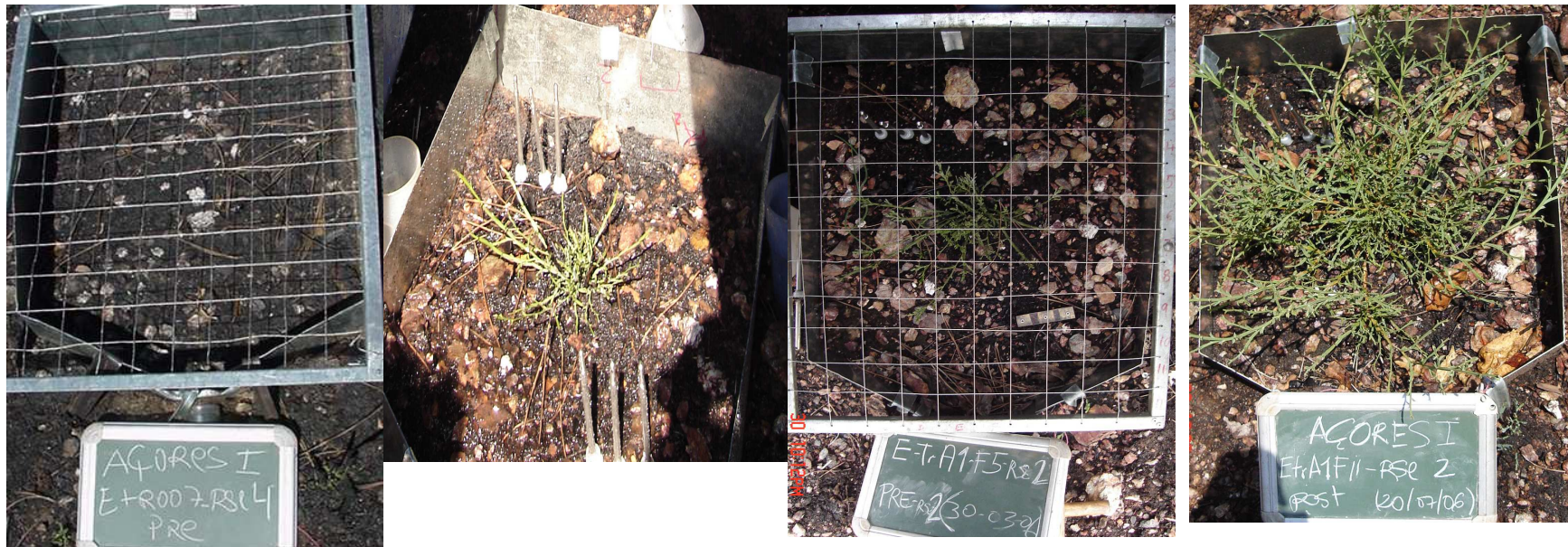
Figura A1-3. Evapotranspiração real no distrito de Aveiro. Fonte: <http://snirh.inag.pt/>

Anexo 2: Fotografias das parcelas e encostas.

Parcela A1-tb



Parcela A1-ta

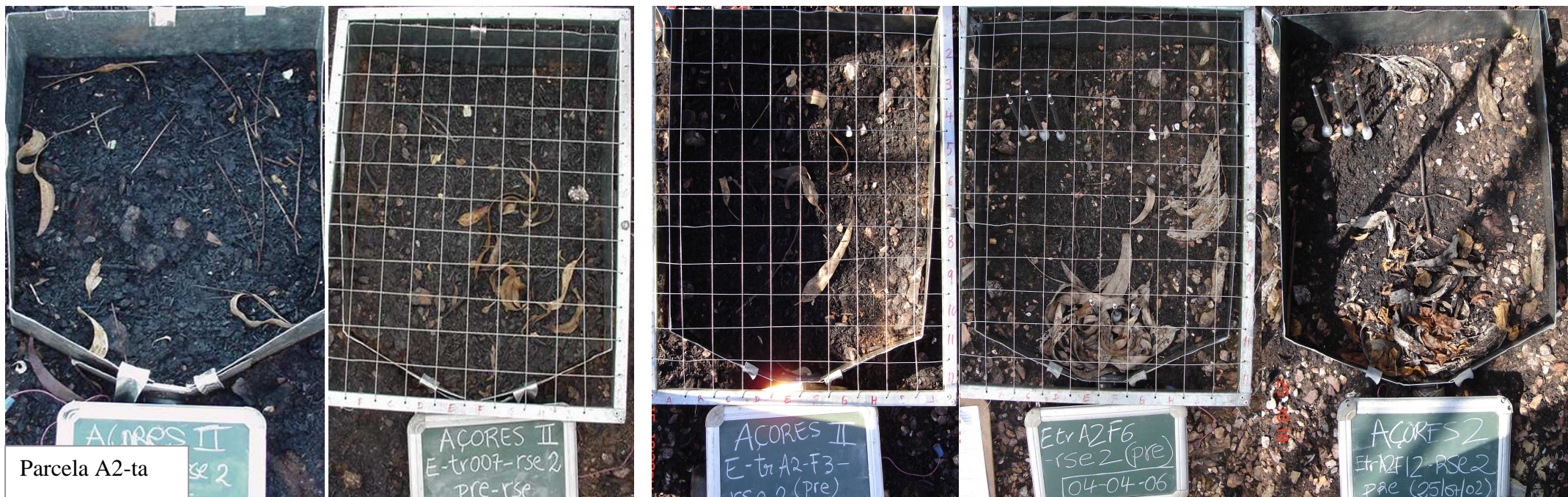


Parcela A1-bb



Parcela A1-ba





Parcela A2-bb



Parcela A2-ba





Açores 1
(10/11/05)



Açores 1
(20/07/06)



Açores 2
(15/11/05)



Açores21
(25/07/06)

Anexo 3: Gráficos.

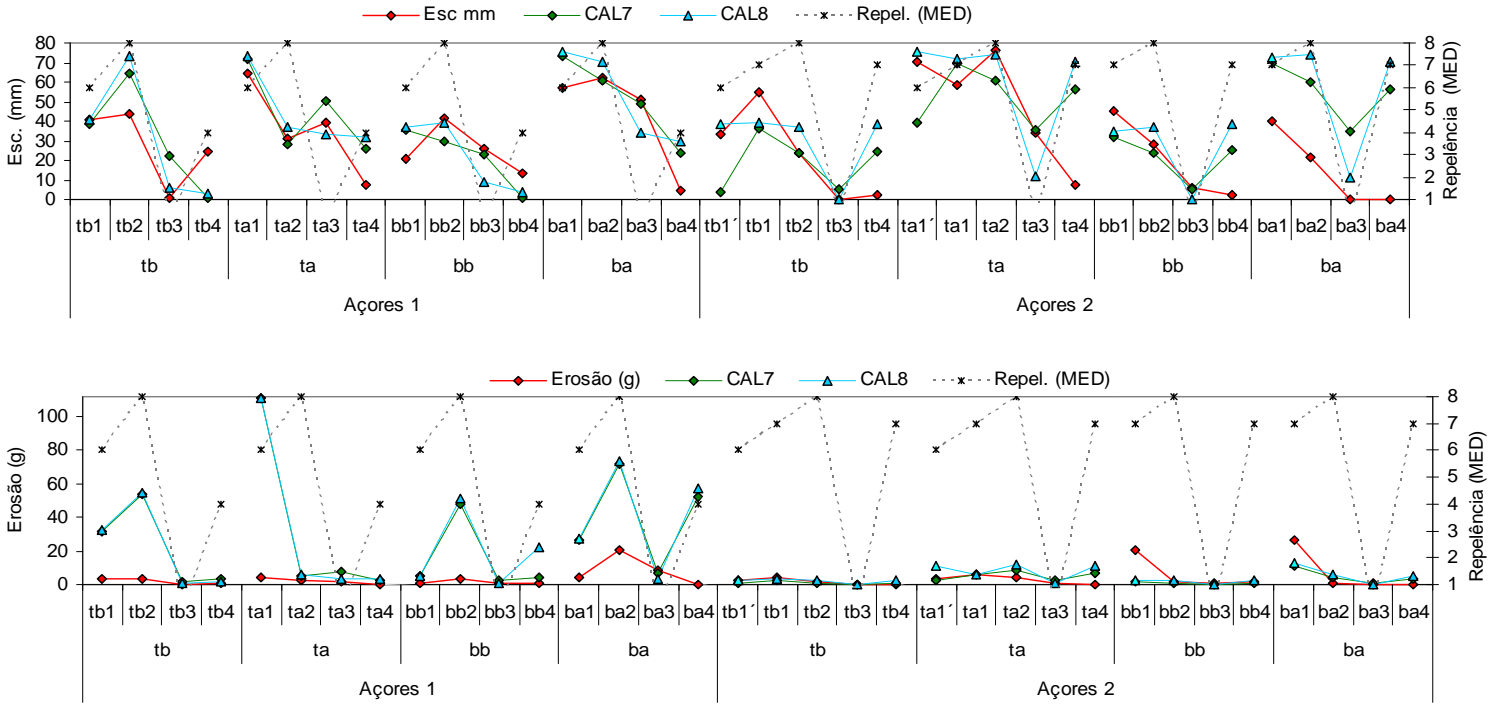


Figura A3-1 Calibração e validação das parcelas.

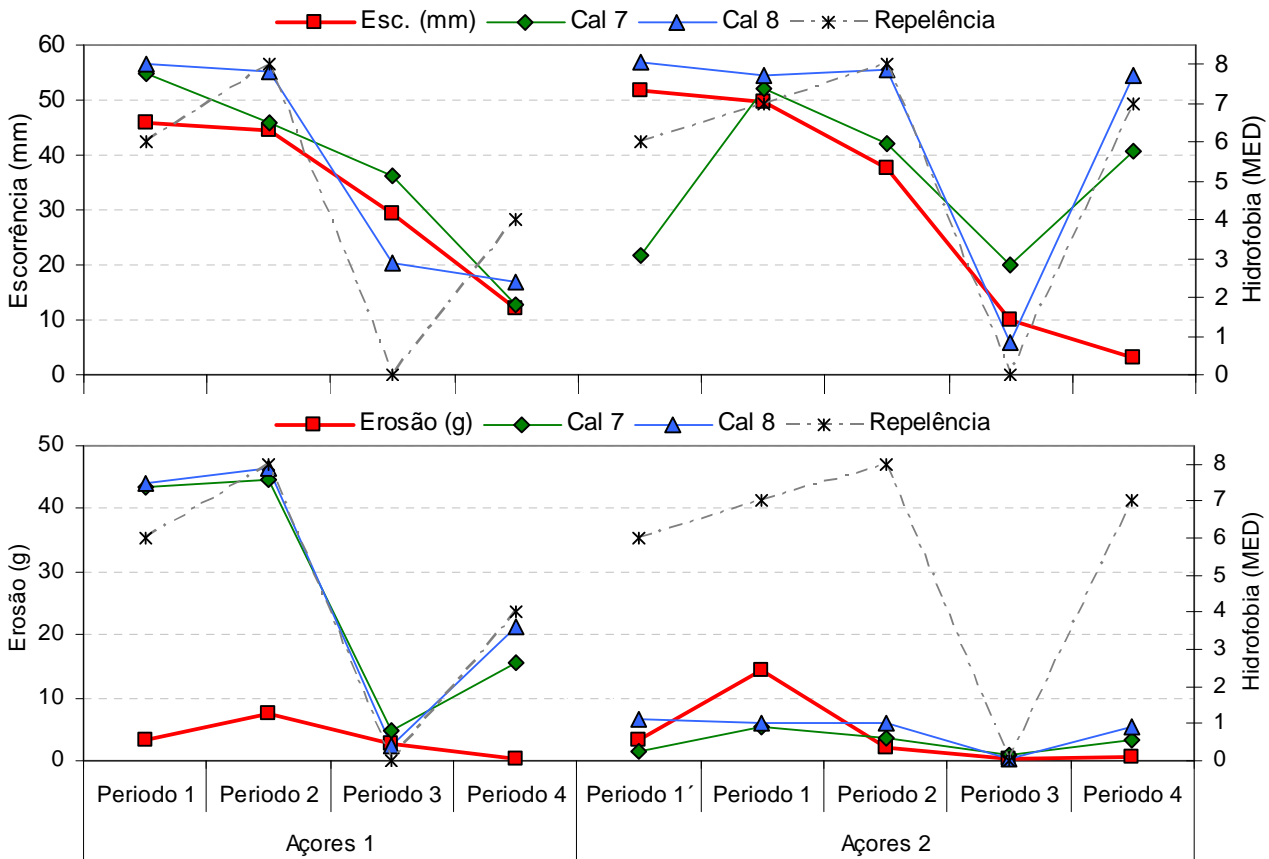


Figura A3-2 Calibração e validação por eventos

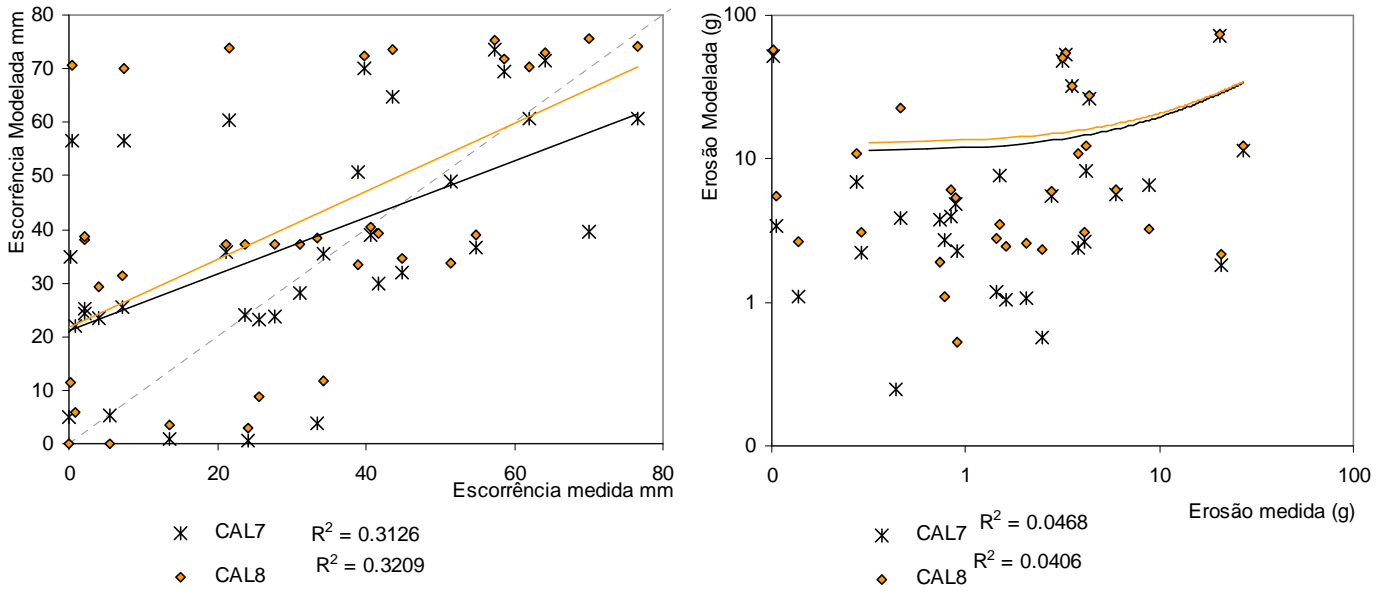
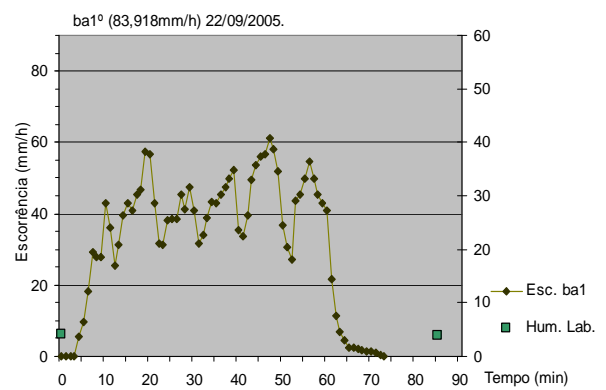
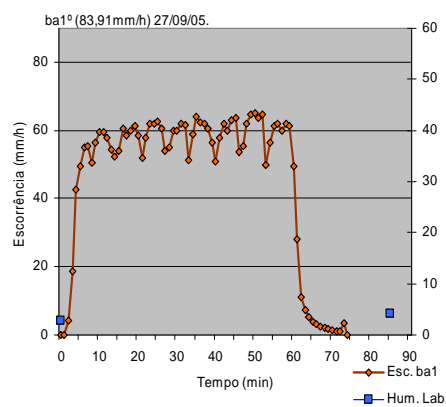
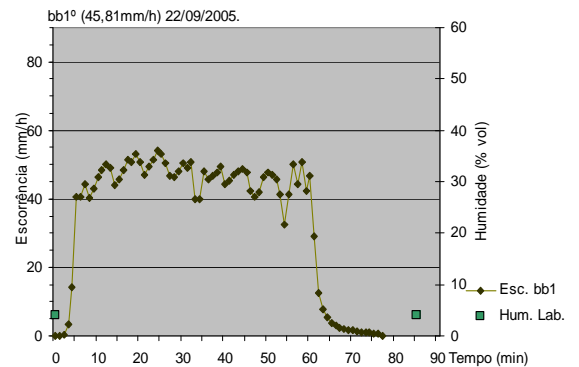
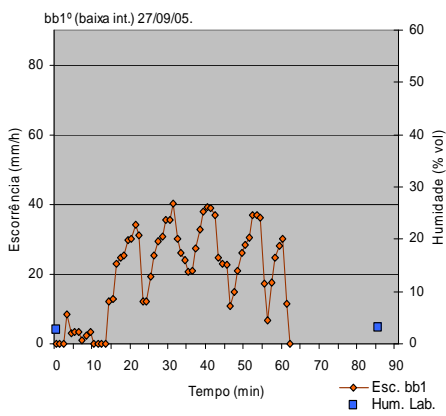
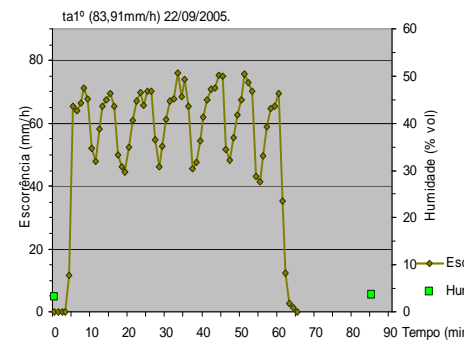
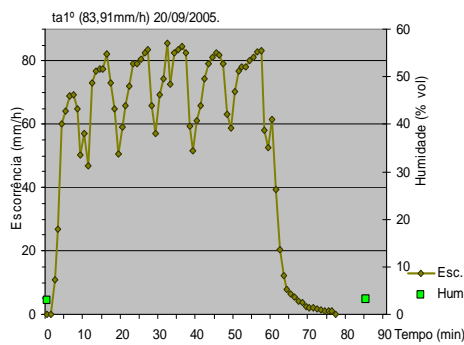
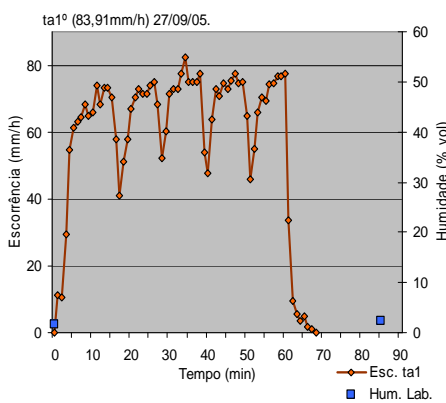
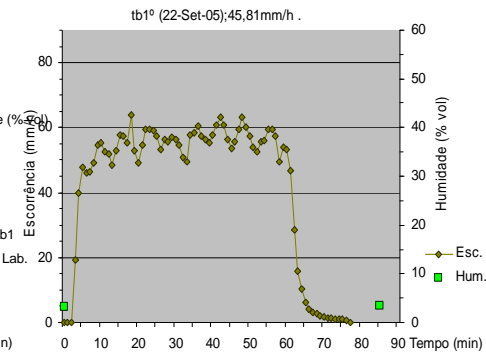
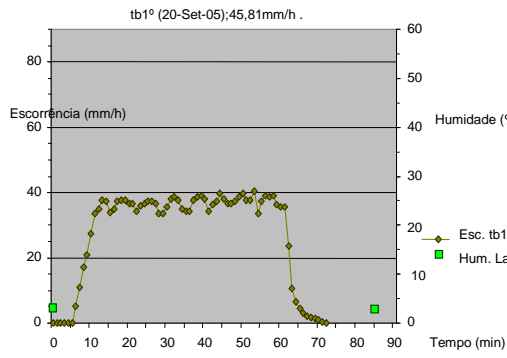
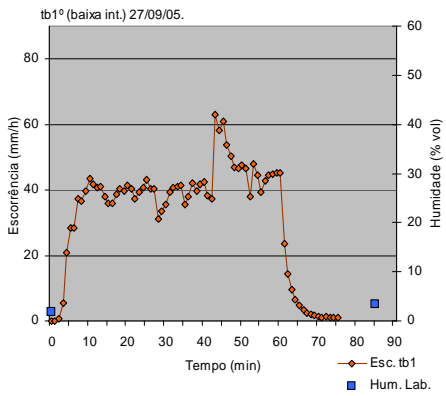


Figura A3-3: Calibração da escorrência e da erosão.

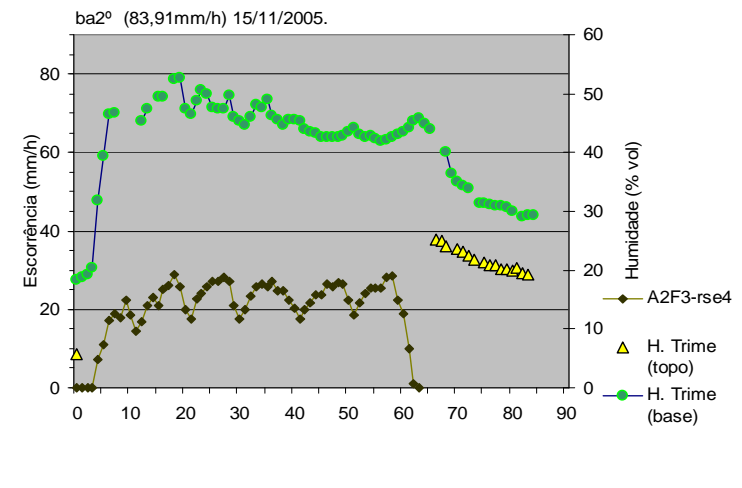
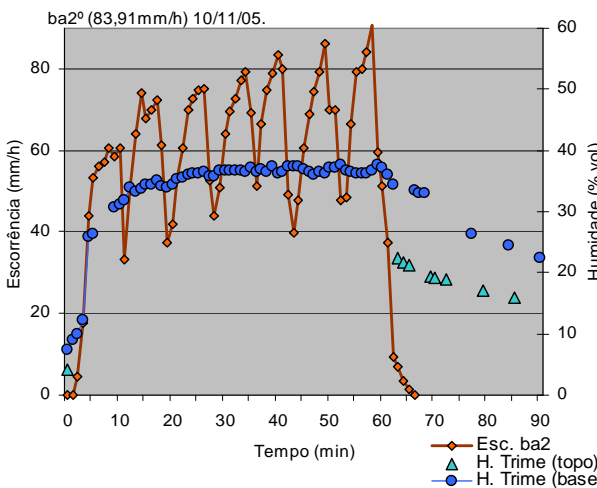
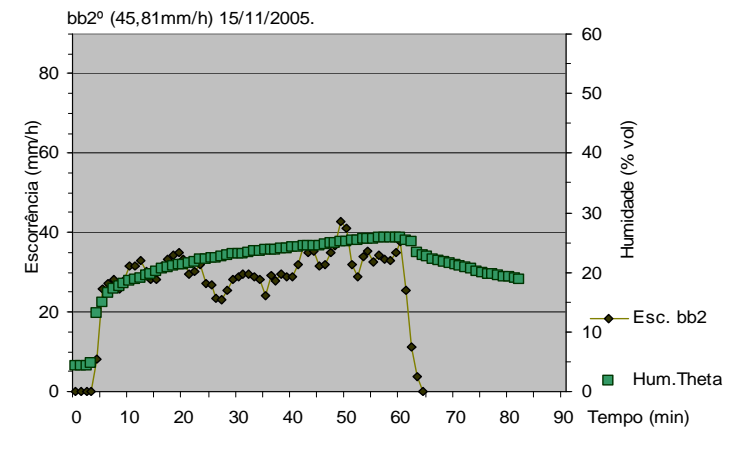
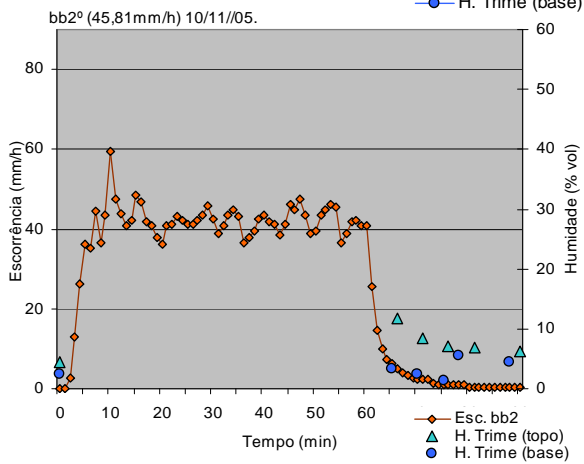
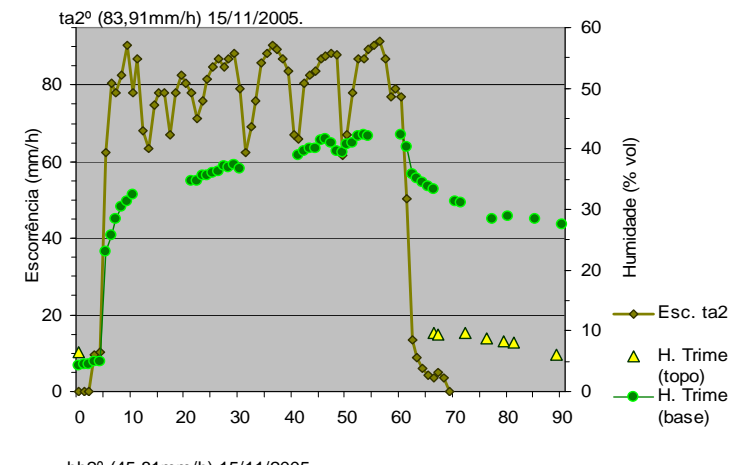
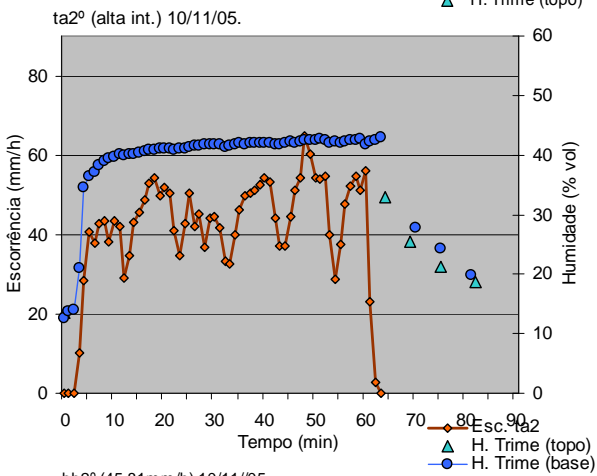
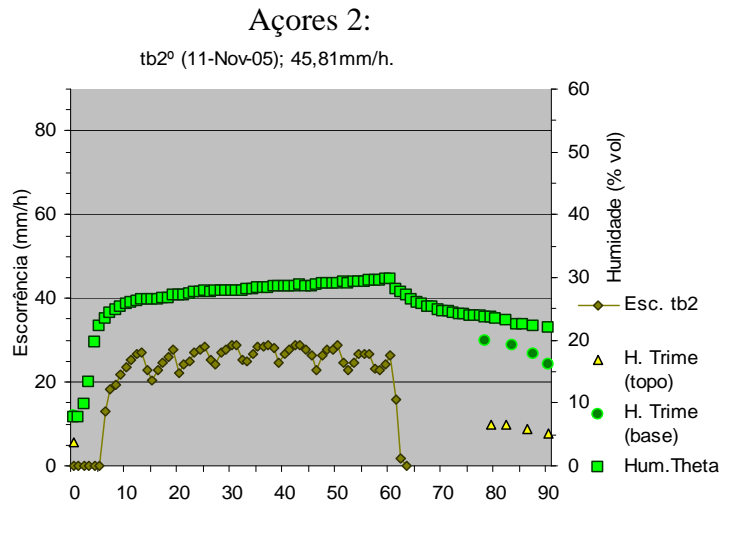
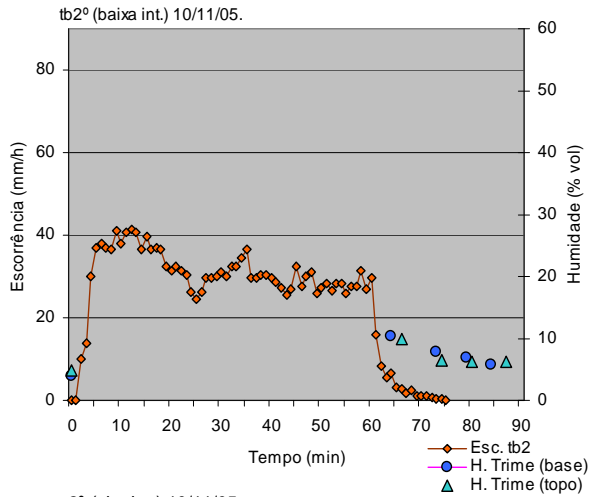
Anexo 5: Hidrogramas.

1º Período: Setembro 2005. Açores 1

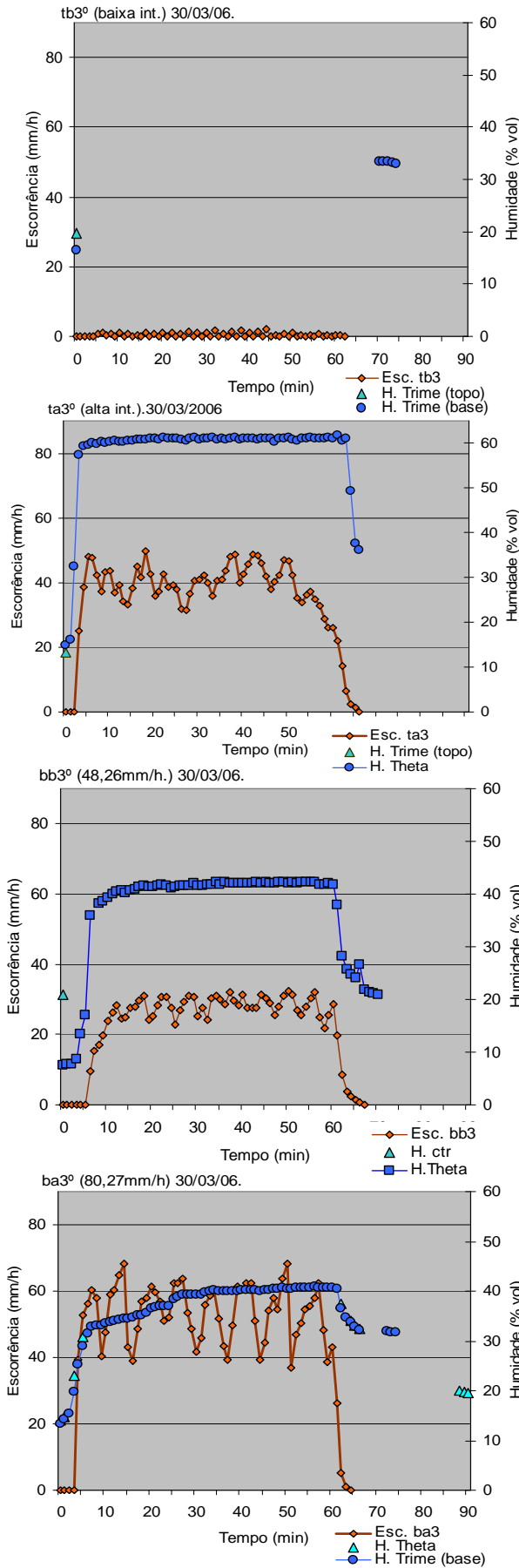
Açores 2



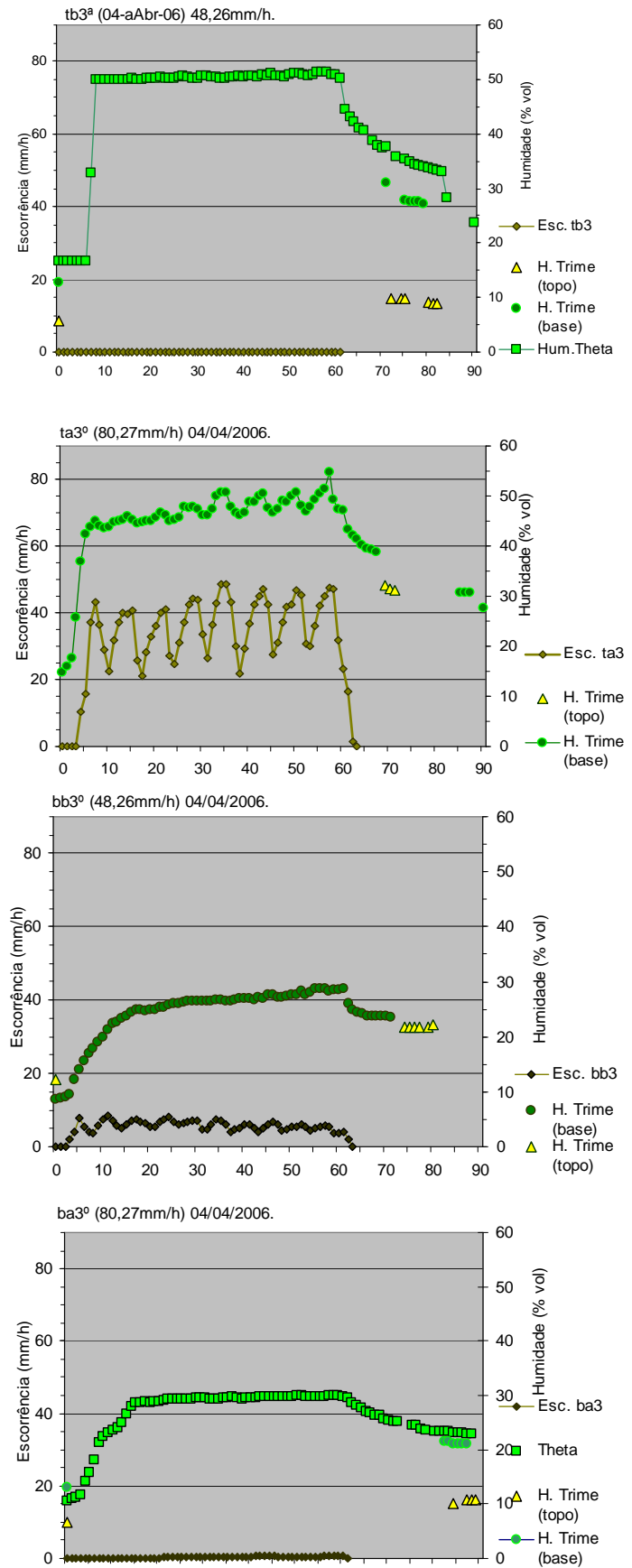
2º Período: Novembro 2005. Açores 1



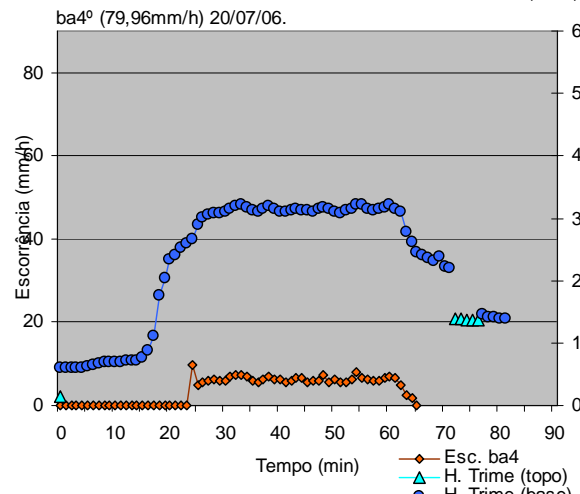
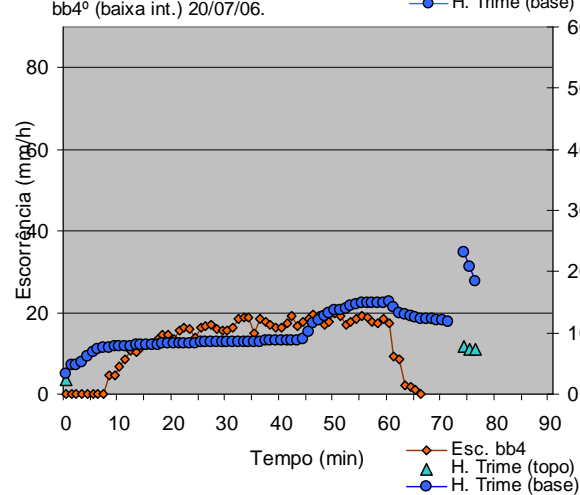
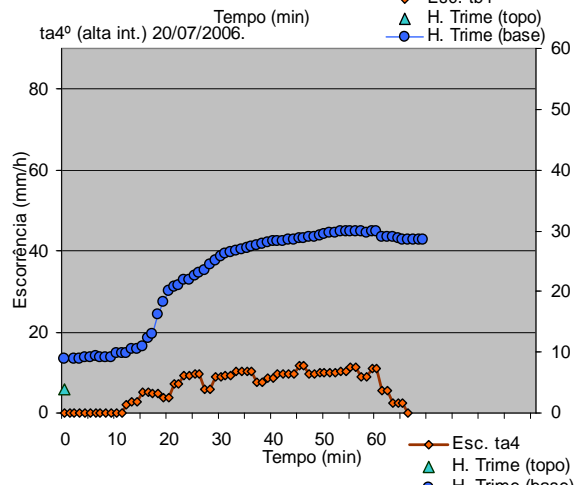
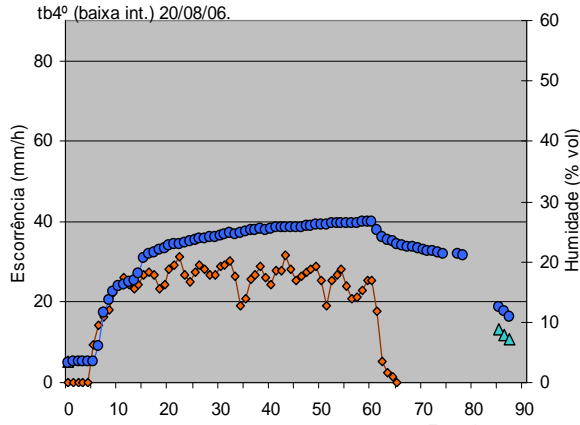
3º Período: Março-Abril 2006. Açores 1



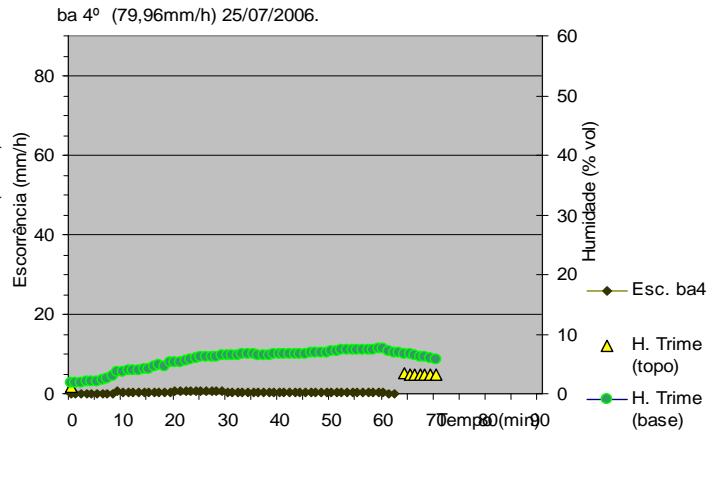
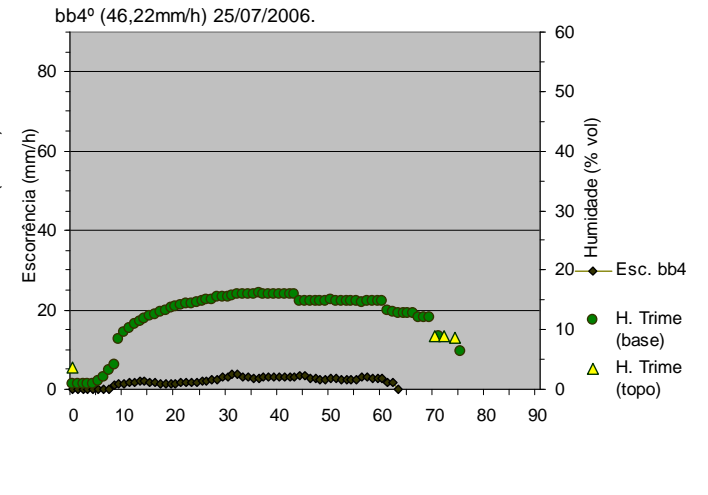
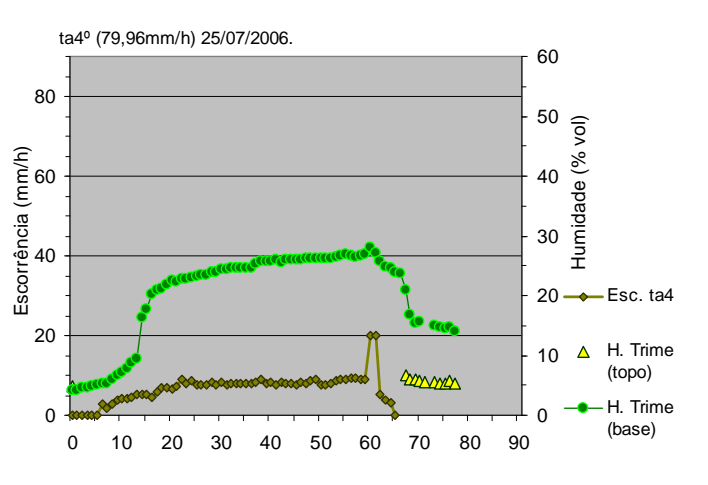
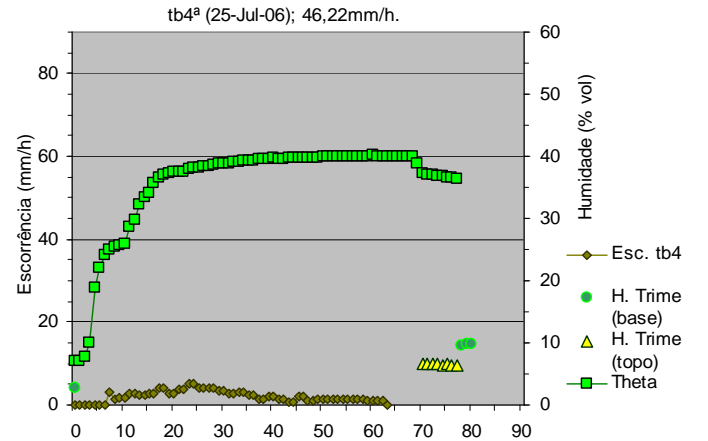
Açores 2:



4º Período: Julho 2006. Açores 1



Açores 2:



Anexo 4: Correlações.

CORRELAÇÕES	Declive	Física do solo	Rugos.	Cobert. Litter	Cobert. Pedras	Cobert. Veget.	Cobert. Cinzas	Cobert.Solo nú	Humid. inicial	Hidrofob.	WRI	Tempo desde incêndio	Intens. chuva	Escorr.	Sedim. totais	Frac. mineral
Física do solo	-0.42															
Rugosidade	0.13	0.16														
Cobert.litter	-0.56	0.24	0.21													
Cobert.Pedras	0.68	-0.44	0.13	-0.54												
Cobert.Veget.	0.09	0.09	0.26	0.04	0.06											
Cobert.Cinzas	-0.45	0.32	-0.35	0.05	-0.81	-0.39										
Cobert.Solo nú	0.19	-0.19	0.19	-0.22	0.41	0.07	-0.55									
Humidade inicial	0.16	0.18	0.11	0.04	0.11	0.02	-0.19	0.23								
Repelência	-0.16	-0.02	-0.08	-0.03	-0.17	-0.24	0.35	-0.40	-0.75							
WRI	0.09	-0.14	-0.21	-0.30	-0.12	-0.32	0.42	-0.24	-0.19	0.42						
Tempo dde incêndio	-0.71	0.61	0.12	0.50	-0.38	-0.01	0.09	0.11	0.03	-0.06	-0.41					
Intensidade da chuva	-0.02	0.00	0.45	0.03	-0.02	0.12	-0.04	0.03	0.02	0.01	0.03	-0.01				
Escorrência	0.08	-0.10	-0.14	-0.36	-0.14	-0.27	0.46	-0.27	-0.15	0.35	0.87	-0.42	0.35			
Sedimentos totais	0.23	0.18	0.24	-0.23	0.06	-0.23	0.13	-0.03	-0.10	0.28	0.49	-0.09	0.21	0.47		
Fração mineral	0.24	0.15	0.22	-0.24	0.07	-0.23	0.13	-0.04	-0.11	0.28	0.50	-0.11	0.21	0.47	0.47	
Fração orgânica	0.22	0.23	0.26	-0.21	0.05	-0.22	0.13	-0.03	-0.07	0.27	0.46	-0.06	0.21	0.46	0.46	0.98