

APLICAÇÃO DE “MULCH” APÓS FOGO: UM MÉTODO EFECTIVO PARA A REDUÇÃO DA ESCORRÊNCIA E DA EROSÃO.

S. A. Prats

CESAM - Centro de Estudos do Ambiente e do Mar & Departamento de Ambiente e e Ordenamento. Universidade de Aveiro
sergio.alegre@ua.pt

M. A. S. Martins

CESAM - Centro de Estudos do Ambiente e do Mar & Departamento de Ambiente e e Ordenamento. Universidade de Aveiro

M. C. Malvar

CESAM - Centro de Estudos do Ambiente e do Mar & Departamento de Ambiente e e Ordenamento. Universidade de Aveiro

Diana C.S. Vieira

CESAM - Centro de Estudos do Ambiente e do Mar & Departamento de Ambiente e e Ordenamento. Universidade de Aveiro

C. O. A. Coelho

CESAM - Centro de Estudos do Ambiente e do Mar & Departamento de Ambiente e e Ordenamento. Universidade de Aveiro

Artemi B. Cerdà

Universidade de Valencia

Lee MacDonald

Antonio J. D. Ferreira

Instituto Politecnico de Coimbra

J. J. Keizer

CESAM - Centro de Estudos do Ambiente e do Mar & Departamento de Ambiente e e Ordenamento. Universidade de Aveiro

RESUMO

Aplicação de “mulch” após fogo: um método efetivo para a redução da escorrência e da erosão a re-considerar.

O presente trabalho avalia a efetividade de vários “mulchings” para o controlo da escorrência e da erosão pós-fogo, adaptadas para o caso de povoamentos florestais no centro-norte de Portugal. O mulch de casca de eucalipto triturada foi um tratamento pioneiro e foi altamente efetivo.

Palavras-chave: incêndios florestais, erosão, escorrência, repelência, mulch.

ABSTRACT

Post-fire mulching: revisiting an effective method for reducing runoff and erosion.

This study aims to measure the effectiveness of several post-fire mulch-based techniques for reducing overland flow and soil erosion on north-central Portugal. The

eucalypt chopped bark mulch, a new treatment never tested before, was highly effective in reducing runoff and soil erosion in recently burnt forest.

Keywords: wildfires, soil erosion, runoff, soil water repellence, mulch.

INTRODUÇÃO

1. Incêndios florestais e os seus efeitos nos processos hidro-geomorfológicos.

As alterações que se produziram na sociedade portuguesa a partir dos anos 60 na estrutura socio-económica, muito em especial nas populações rurais, produziu um deslocamento da população para o litoral ou estrangeiro. Este facto diminuiu a população residente nas áreas florestais, juntamente com a progressiva menor utilização da lenha e do carvão como combustível e dos estrumes animais como fertilizante e teve como consequência deixar nas matas e florestas muito material combustível que até então era retirado, o que aumentou o perigo de incêndio (Carvalho *et al.* 2002). A consequência de uma longa história de intervenções florestais é um mosaico de parcelas florestais lavradas e sem lavar, com terraços e sem eles, povoadas de pinhais, eucaliptais, matos, povoamentos mistos, e ainda acaciais e outros povoamentos de espécies exóticas (Figura 1). Em opinião de Shakesby *et al.* (1996), nas últimas décadas os incêndios têm aumentado em frequência e extensão em Portugal e em toda a bacia do Mediterrâneo principalmente devido às seguintes razões: (i) plantado de espécies florestais altamente inflamáveis (principalmente eucaliptos e pinheiro), (ii) abandono de práticas tradicionais tais como pastagens e corte da vegetação que anteriormente reduzia a acumulação de material inflamável (manta morta, mato), (iii) incremento do uso recreativo das florestas, (iv) uma sucessão de anos excepcionalmente secos.



Figura 1. Fotografia duma área florestal da Serra do Caramulo, caracterizada por um “mosaico” de usos do solo, com povoamentos de eucaliptos ardidos e sem arder de várias idades, terraços florestais, áreas agrícolas, povoamentos e uma densa rede de caminhos.

1.1. Erosão do solo após os incêndios florestais

Na década do 2000, os incêndios florestais em Portugal tem afectado cada verão milhares de hectares de mato, pinheirais e eucaliptais. Um dos problemas derivados é o da erosão do solo imediatamente após o fogo. Os incêndios florestais no centro e norte de Portugal afectam sobretudo às povoações de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Ait.), que costumam ter ciclos de cultura e extracção muito curtos (5-7 anos, Leygton-Boyce *et al.* 2007; Malvar *et al.*, 2011; Keizer *et al.* 2008). Os incêndios, quando são de moderada e alta intensidade, acabam com todo o coberto vegetal, a camada superficial de manta morta e às vezes também a parte superficial orgânica do solo, levando a umas mudanças físicas nos componentes do solo (Figura 2). Reduções na matéria orgânica e diminuição na estabilidade dos agregados (Giovannini *et al.*, 1988), incremento da erodibilidade do solo (Imeson and Vis, 1984) e o aumento da repelência à água (DeBano, 2000) são alguns dos processos que resultam em um decréscimo na capacidade de infiltração. Para além disso, a desaparecimento do coberto vegetal supõe uma diminuição drástica da interceptação da precipitação por parte da floresta, o que intensifica o aumento da escorrência superficial e as perdas de solo, sendo estas máximas logo após o incêndio e decrescendo com os anos (Soto *et al.*, 1998; Diaz-Fierros *et al.*, 1987; Morris and Moses, 1987; Sevink *et al.*, 1989; Imeson *et al.*, 1992, Inbar *et al.*, 1998).



Figura 2. Exemplos de incêndio de moderada intensidade (esquerda) onde as copas das árvores estão totalmente calcinadas e de baixa intensidade, onde as copas arderam só parcialmente e o solo possui uma camada de caruma que cai das copas das árvores depois do incêndio (direita).

Robichaud (2009) refere que os incêndios de alta intensidade aumentam o risco de cheias, erosão e sedimentação, podem pôr em risco as vidas humanas, os bens materiais, a qualidade das águas que abastecem a população e o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos a jusante das bacias ardidas. Robichaud *et al.* (2013) aponta para perdas de até 22 Mg ha⁻¹ para o primeiro ano após um incêndio de alta intensidade. 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 outras perturbações, e por tanto a influência do fogo pode ser considerada insignificante (Kutiel & Inbar, 1993; Kutiel *et al.*, 1995; Lane *et al.*, 2004), somente importante logo após o incêndio (Diaz-Fierros *et al.*, 1990) ou ter efeitos prolongados entre 7 e 14 anos (Robichaud 2009).

No caso de Portugal, os factores determinantes da erosão pós-fogo em plantações de eucalipto típicas do centro e norte do País, caracterizadas por terem complexos ciclos de hidrofília e repelência extrema ainda antes da ocorrência dos incêndios (Keizer *et al.*, 2008), foram avaliados mediante a realização de simulações de chuva em um dos grandes incêndios que teve lugar no ano 2005 no concelho de Albergaria-a-Velha (Malvar *et al.*, 2011; 2013). A realização destas experiências permitiu a avaliação dos factores chave da erosão em solos arditos lavrados e sem lavar. Desta forma, constatou-se que o efeito da repelência à água do solo sobre a geração de escorrência não é directo, e que o coberto do solo é um factor de maior importância. Por outro lado, foi constatado que as áreas lavradas vários anos antes do incêndio quase não produziram erosão, e os autores atribuíram este facto à exaustão dos solos entre a lavragem e a ocorrência do incêndio.

1.2. Mitigação da erosão após os incêndios florestais em Portugal

Até a data, quatro estudos (Prats *et al.*, 2012; 2013; 2014; Shakesby *et al.*, 1996) tem avaliado as repercussões e os possíveis tratamentos que podem ser aplicados nos povoamentos florestais arditos de Portugal. Apesar de mostrar uma boa análise da realidade pós-incêndio em pinhais e eucaliptais típicos do centro-norte do país, no contexto Português existe um grande desconhecimento acerca da magnitude, variação espacial e temporal da escorrência e da erosão pós-incêndio assim como dos seus factores desencadeantes. O governo Português abriu um concurso específico para a atribuição de ajudas com a tipologia “Estabilização de Emergência Pós-Incêndio”, enquadrada na subacção “Recuperação do Potencial Produtivo”, com um apoio PRODER aprovado de 2,8 milhões de euros e alavanca um investimento total de 4,9 milhões de euros. Estes montantes são os primeiros que se utilizam directamente para mitigar os efeitos negativos dos incêndios, mas a identificação das áreas prioritárias de aplicação, a selecção e efectividade das técnicas, o momento em que devem ser aplicadas e por quanto tempo devem ser efectivas continua ainda a ser uma grande incógnita.

De um ponto de vista prático, as áreas a estabilizar podem-se dividir em encostas, caminhos e linhas de água (Figura 3). O tratamento das linhas de água e dos caminhos constituem uma parte importante das actividades de controlo da erosão, não só após o incêndio, mas também num sentido mais amplo de controlo da erosão. As melhores técnicas para os tratar tem de ser adaptadas de outros estudos científicos (Jordán *et al.*, 2008) e também de manuais de “boas práticas” de engenharia como as “BMP” nos Estados Unidos (BMP-finger Lake Forests Best Management Practices, 2004) e do manual WOCAT (2007). De qualquer forma, a primeira linha de intervenção pós-incêndio é o controlo da erosão na fonte: ao nível das encostas. A selecção das técnicas mais efectivas segundo os trabalhos científicos em áreas arditas por todo o mundo (Bautista *et al.*, 1996; Badía and Martí 2000; Fernández *et al.*, 2011; Hubbert *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2008; Robichaud *et al.*, 2013a; Wagenbrenner *et al.*, 2006) assim como em Portugal (Prats *et al.*, 2012; 2013; 2014; Shakesby *et al.*, 1996) e em áreas não arditas (Albaladejo *et al.*, 2000; Adams 1964) apontam para os tratamentos de superfície das encostas com a técnica do mulching. A literatura não é escassa enquanto aos benefícios desta técnica (Bautista *et al.* 2009; Groen and Woods, 2008; Harris 1980; Robichaud 2009).

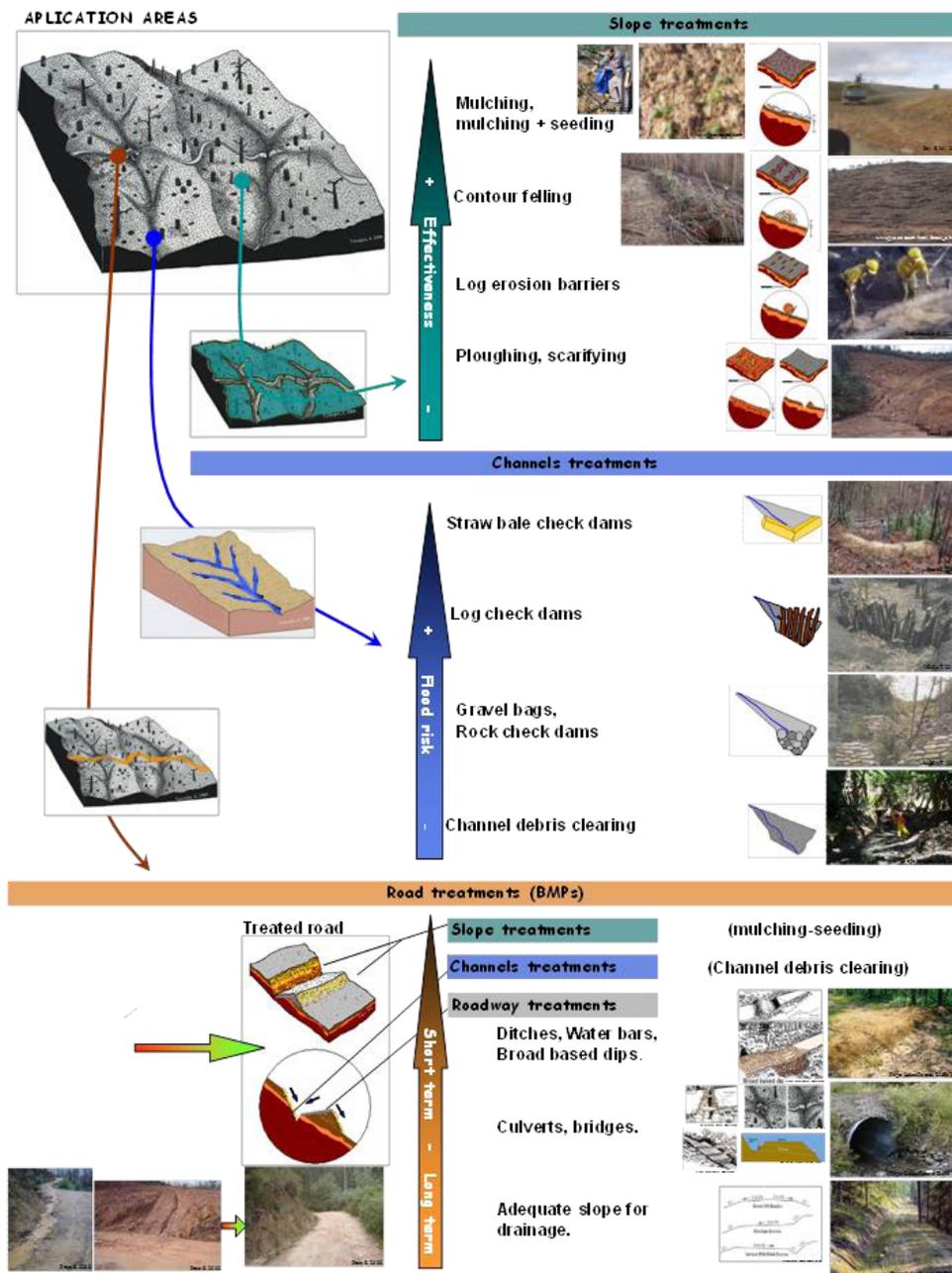


Figura 3. Comparação das diferentes técnicas de controlo da erosão e escorrência pós-incêndio baseado em referências científicas.

1.3. Objectivos

O objetivo deste trabalho foi o de comparar e avaliar a efetividade de quatro técnicas de controlo da erosão baseadas em mulch à escala da parcela durante o primeiro ano após três incêndios florestais no centro-norte de Portugal. Adicionalmente, em base a modelos estatísticos de regressão múltipla, foram também avaliadas as características pluviométricas (quantidade e intensidade da chuva) e as características físicas das encostas - tais como coberto do solo, declive, repelência do solo à água e outras propriedades do solo - como factores-chave da escorrência e a erosão, que possam vir indicar alto risco de erosão e que possam sugerir a

necessidade de tratamento. Porquê, quando, onde e cómo aplicar um tratamento para reduzir a escorrência e a erosão foram as perguntas às quais este trabalho quer dar resposta para vários tipos de mulch seleccionados entre os mais efectivos do mundo em vários povoamentos florestais ardidos. A informação isolada para cada um destes tratamentos encontra-se publicada em Prats *et al.*, (2012), (2013) e (2014)

2. MATERIAL E MÉTODOS

As áreas de estudo encontram-se localizadas no centro e norte de Portugal. No incêndio de Pessegueiro do Vouga (2007) seleccionaram-se duas encostas, uma que ardeu com intensidade moderada, plantada com Eucalitpos e outra que ardeu a baixa intensidade plantada com pinheiros (*Pinus pinaster* Labill.). No Colmeal (2008) ardeu um povoamento de pinheiros, e em Ermida (2010) um de eucaliptos, sendo as intensidades consideradas moderadas (Figura 4). Todas as áreas encontram-se em declives de mais do que 15°, os solos são na sua maioria cambisolos humicos ou leptosolos fracos e pedregosos, de textura limo-areosa desenvolvidos sobre xistos, com altos teores de materia orgânica (maior a 10%). O clima é Mediterrâneo humido, com variações pluviométricas de 800 até 1500 mm ano⁻¹.

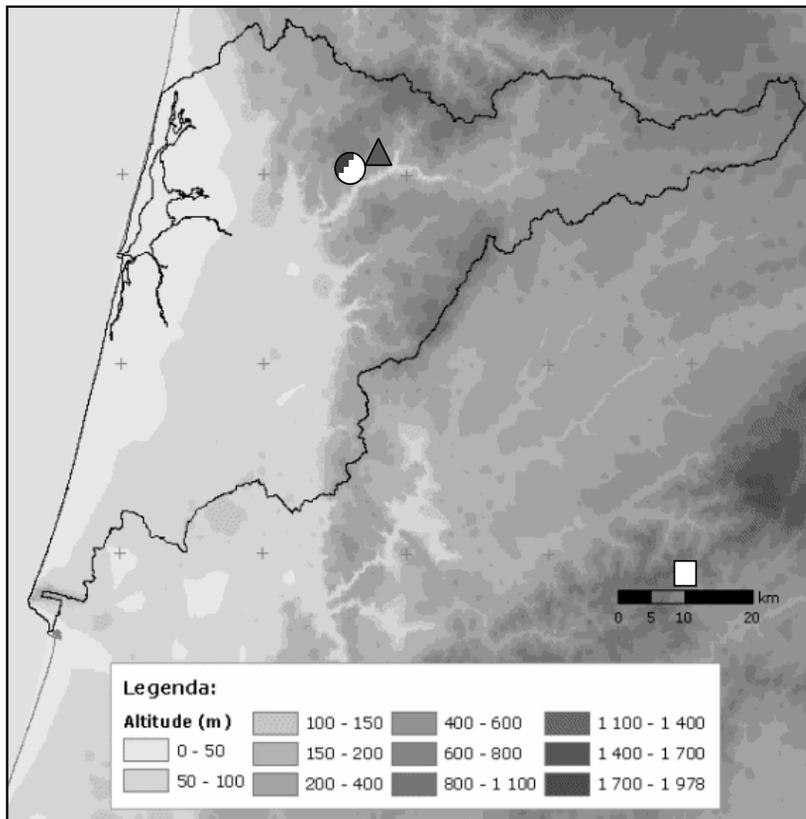


Figura 4. Áreas de estudo seleccionadas nos incêndios de 2007 em Pessegueiro do Vouga, (circulo), de 2008 em Colmeal (quadrado) e de 2010 em Ermida (triângulo). Símbolos pre-enchidos a cinzento correspondem-se com áreas de estudo em eucaliptais, a branco com pinhais, e listados com ambos povoamentos florestais ardidos.

As técnicas de estabilização de encostas avaliadas são inovadoras em Portugal e provavelmente no mundo, uma vez que foram utilizadas versões adaptadas e inéditas tanto do mulch (mulching de cascas de eucalipto trituradas), como do hidromulch (composição propriedade exclusiva da companhia SERRAIC, lda.) e do PAM (aplicação de uma poliacrilamida anionica em granulado seco). Até a data, conjuntamente com Shakesby *et al.* (1996), estes são os únicos

trabalhos que existem sobre técnicas de estabilização da erosão pós-incêndio em Portugal. O desenho experimental das técnicas cumpriram os requisitos assinalados por Robichaud (2009): foram aplicadas de um a três meses após os incêndios de Pessegueiro do Vouga (2007), Colmeal (2008) e Ermida (2010), monitorizados entre 1.5 até 3 anos e foram utilizadas de 8 a 14 parcelas tratadas e sem tratar. As diferenças entre os tratamentos e os controlos foram avaliadas com base numa análise da variância de medições repetidas, que no contexto geral foi de frequência semanal em cada uma das parcelas de erosão. A medição direta da escorrência e da erosão nas encostas visou a construção e instalação de parcelas, coleção e armazenagem de um conjunto importante de amostras de escorrência e posterior determinação das concentrações de sedimentos mediante filtração ou evaporação dessas amostras. A realização destas tarefas pode ser muito cara, complexa e costosa, no entanto os dados quantitativos da monitorização dos tratamentos pós-incêndio são de proveito não só para guiar futuras intervenções de estabilização e reabilitação, mas também para desenvolver e melhorar modelos predictivos (Robichaud, 2009).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mulch de cascas de eucalipto trituradas, aplicado a uma taxa de 8 Mg ha^{-1} , (Figura 5) foi tão efetivo quanto o mulch de palha em outras partes do mundo (Fernandez *et al.*, 2011; Wagenbrenner *et al.*, 2006), mas com as vantagens de não serem removidas pelo vento e terem baixas taxas de decomposição. Este novo mulch (Prats *et al.*, 2012; 2014), aplicado no eucaliptal de Pessegueiro do Vouga, que ardeu com uma intensidade média, foi a técnica com melhor balanço custo-benefício, reduzindo por volta do 40% a escorrência e 85% a erosão da encosta (Prats, 2013).

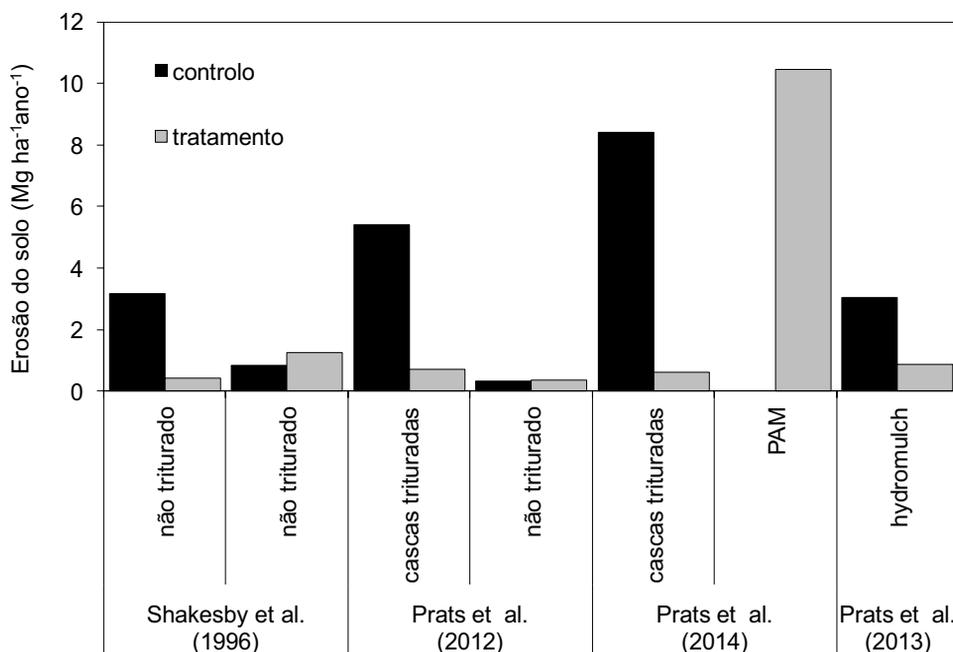


Figura 5. Erosão do solo durante o primeiro ano do incêndio em parcelas controlo e submetidas a tratamento com mulch de restos de eucalipto não triturado (Shakesby *et al.* 1996, Prats *et al.* 2012; 2014) mulch de cascas de eucalipto trituradas (Prats *et al.*, 2012, 2014), Polyacrilamidas (Prats *et al.* 2014) e hydromulch (Prats *et al.* 2013).

A aplicação do mulch de restos florestais sem triturar, aplicado a uma taxa de 17 Mg ha^{-1} , (Prats *et al.*, 2012) num pinhal que ardeu com intensidade baixa no mesmo incêndio foi tão efetivo quanto a caruma de pinheiro, uma vez que não se encontraram diferenças entre este tratamento e o seu controlo, coberto com uma proteção extra de agulhas que as copas dos pinheiros forneceram ao solo logo após o incêndio, e que protegeram efetivamente da erosão

tanto nas parcelas tratadas como nas parcelas sem tratar. Resultados semelhantes foram também observados por Cerdà e Doerr (2008) e Pannkuk e Robichaud (2003), o qual evidencia a importância do coberto do solo para prevenir a ocorrência da erosão pós-fogo.

O hydromulching (Prats *et al.*, 2013) foi ainda mais efetivo do que o mulch de restos florestais triturados na redução da escorrência (60%) e igualmente efetivo no caso da erosão (85%) num pinhal durante os dois primeiros anos após um incêndio de moderada intensidade. Isto foi devido a que, além da proteção das fibras orgânicas projetadas, a mistura continha sementes de plantas que contribuíram positivamente para um maior coberto do solo. A sua formulação pode ser adaptada para conter sementes de plantas nativas e contribuir para um aumento da resiliência e reabilitação das funções dos ecossistemas. No entanto, o seu alto custo irá limitar a sua utilização às áreas especialmente vulneráveis (vidas humanas, qualidade das águas, e áreas culturais ou arqueológicas protegidas) e sensíveis (áreas naturais protegidas). Por outro lado, Hubbert *et al.* (2012) e Robichaud *et al.* (2013) não encontraram resultados satisfatórios, e reportaram que os seus hidromulches não conseguiram reduzir significativamente a erosão devido a não fornecerem a cobertura suficiente ao solo.

Apesar do seu baixo custo e dos bons resultados no controlo da erosão em terrenos agrícolas e taludes de caminhos e estradas, a aplicação de poliácridamidas deve ser ainda aprofundada e melhorada, uma vez que as cinzas e certas características do solo podem neutralizar os efeitos coesivos destes polímeros (Prats *et al.*, 2014). A maior vantagem na utilização do PAM granulado vinha da sua baixa taxa de aplicação, e da não necessidade de maquinaria para a sua aplicação. Se bem que a incorporação de aditivos ou a sua solução em água podia potencialmente melhorar a efetividade da técnica, estas modificações irão também aumentar os custos do tratamento, aproximando-se no final com os custos do mulch de cascas trituradas. A maioria de exemplos encontrados na literatura reportam a mesma situação. O PAM parece interagir com as cinzas em vez de com o solo (Rough, 2007), e não consegue protegê-lo perante a energia cinética das gotas da chuva. De facto, Inbar (2011) obteve bons resultados com PAM provavelmente porque retiraram as cinzas antes de aplicar o produto, e Davidson *et al.* (2009) obtiveram bons resultados com uma combinação de PAM e pellets de palha comprimida, o qual aumentou o coberto do solo fornecido pelo tratamento, e com ele, a sua efetividade.

Com base em modelos estatísticos de regressão múltipla, Prats *et al.* (2012, 2013 e 2014) isolaram as características físicas indicadoras de alto risco de erosão em cada uma das experiências de campo. A primeira delas, e sem possibilidade de intervenção sobre ela, foi sempre a intensidade da chuva. A segunda mais representativa foi o coberto do solo. A repelência do solo à água só foi importante para a escorrência, e de qualquer forma, sempre subordinada ao coberto. Estes autores concluíram que em encostas do centro-norte de Portugal as seguintes condições após incêndio indicam alto risco de erosão e podem ser esperadas taxas de erosão da ordem das 5 Mg ha⁻¹ durante o primeiro ano após o fogo:

- copas das árvores sem folhas, totalmente calcinadas,
- declive da encosta igual ou superior a 20°,
- cobertura de folhas e manta morta no solo imediatamente após o incêndio inferior ao 10%,

Como circunstancia agravante, a presença de cinzas de cor branca ou cinzenta superior a 10% da superfície do solo (Figura 6), que são indicadoras de uma alta intensidade do incêndio, podem indicar taxas de erosão extremas (11-14 Mg ha⁻¹), como foi constatado nas micro-parcelas do incêndio da Ermida (Prats *et al.*, 2014). Quando estas situações coincidem com a existência de bens susceptíveis de proteção a jusante de encostas ardidas, será preciso intervir imediatamente, antes da ocorrência de eventos chuvosos para evitar a erosão. A gestão das áreas ardidas constitui um delicado compromisso entre os custos dos tratamentos e a efetividade potencial que a técnica aplicada possa ter sobre uma área sob risco potencial de erosão. Muitas das vezes não é recomendável tratar. A “opção zero” pode ser a melhor técnica para locais que não cumpram os requisitos anteriores, como os eucaliptais lavrados vários anos antes do incêndio de Açores (Malvar *et al.*, 2011), com solos com alto teor em pedras e o pinhal de Pessegueiro, áreas com as copas das árvores só parcialmente calcinadas e com mais de 10% de manta morta na superfície do solo imediatamente após o incêndio.



Figura 6. A cor das cinzas mais claras na fotografia da esquerda indica uma maior intensidade do incêndio do que na fotografia da direita.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstra que o mulch de cascas de eucalipto trituradas é a técnica mais efetiva para controlar a erosão do solo e perdas de nutrientes associadas após os incêndios florestais em Portugal. A efetividade do mulch de cascas de eucalipto trituradas pode ser comparada a outros estudos com mulch de palha por todo o mundo. A maior desvantagem vem sendo a sua alta taxa de aplicação, mas ao mesmo tempo esta é uma vantagem em áreas de fortes ventos, onde a palha pode ser facilmente removida. Por outro lado, a aplicação de restos florestais sem triturar num pinhal que ardeu com baixa intensidade foi tão efetivo quanto à proteção que as agulhas das copas dos pinheiros deram ao solo ainda depois do incêndio. Verificou-se que o coberto do solo, o principal motor da erosão pós fogo, é muito elevado nessas áreas, e que o seu tratamento revelou-se innecessário. O hidromulch tem um alto potencial como ferramenta de restauração de ecossistemas degradados. Futuras investigações introduzindo sementes nativas da área recentemente ardida poderiam vir melhorar ou ainda recuperar ecossistemas em espaços naturais protegidos. No entanto, o seu elevado preço faz com que só possa ser aplicado em áreas especialmente sensíveis. A utilização de PAM em áreas ardidas precisa ainda de muito desenvolvimento. O sucesso no controlo da erosão com PAM depende do tipo de PAM, do tipo de solo, de se utilizar uma emenda do solo ou não e da quantidade de cinzas no solo. À vista dos resultados encontrados, a utilização de destes polímeros para controlo da erosão após os incêndios não é recomendável.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito dos projectos científicos RECOVER (PTCD/AGR-AAM/73350/2006), EROSFIRE-II (PTDC/AGR-CFL/70968/2006); FIRECNUTS (PTDC/AGRCFL/104559/2008) com o apoio financeiro da FCT/MCTES a través de fundos nacionais (PIDDAC) e com cofinanciamento pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDR) através do COMPETE – Programa Operacional Factores de Competitividade (POFC) e por duas bolsas de Doutoramento SPA (SFRH/BD/33392/2008), MMC (SFRH/BD/ 41320/2007). Os outros querem agradecer especialmente a todas as pessoas que contribuíram com a sua ajuda no trabalho de campo e de laboratório, especialmente aqueles que ajudaram na aplicação dos tratamentos.

BIBLIOGRAFIA

ADAMS, J. E., 1965. Influence of mulches on runoff, erosion, and soil moisture depletion. Soil Science Society American Journal 30, 110–114.

- ALBALADEJO-MONTORO, J., ALVAREZ ROGEL, J., QUEREJETA, J., DÍAZ, E., CASTILLO, V., 2000. Three hydroseeding revegetation techniques for soil erosion control on anthropic steep slopes. *Land Degradation and Development* 11:315-325.
- BADÍA, D., MARTI, C., 2000. Seeding and mulching treatments as conservation measures of two burned soils in the central Ebro valley, NE Spain. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 13, 219–232.
- BAUTISTA, S., BELLOT, J., VALLEJO, V. R., 1996. Mulching treatment for post-fire soil conservation in a semiarid ecosystem. In: *Arid Soil Research and Rehabilitation*. 10:235-242
- BAUTISTA, S., ROBICHAUD, P. R., BLADÉ, C., 2009. Post-fire mulching. In “Fire effects on soils and restoration strategies”. (Eds: A Cerdá, P. R. Robichaud). pp 353-372. (Science Publishers: Enfield, NH, USA).
- BMP’s-Finger Lakes Forests Best Management Practices, 2004. Cornell Cooperative Extension. N. C. Department of Environment and Natural Resources.
- CARVALHO, T. M. M., COELHO, C. O. A., FERREIRA, A. J. D., CHARLTON, C. A., 2002. Land degradation processes in Portugal: farmer’s perceptions of the application of European Agroforestry Programmes. *Land Degradation and Development* 13: 177-188.
- CERDÀ, A., DOERR, S. 2008. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena* 74, 259-263.
- DAVIDSON, R. A., DAVIDSON, C. F., ROA-ESPINOSA, A. 2009. Linear anionic polyacrylamide as an effective post-fire soil treatment: understanding the chemistry and physical science. *Journal of Soil and Water Conservation*. 64, 243-252.
- DEBANO, L. F., 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology* 231–232, 195–206.
- DÍAZ-FIERROS, F., BENITO, E., VEGA, J. A., 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.
- FERNÁNDEZ, C., VEGA, J. A., JIMÉNEZ, E., FONTURBEL, T., 2011. Effectiveness of three post-fire treatments at reducing soil erosion in Galicia (NW Spain). *International Journal of Wildland Fire*, 20(1), 104-114.
- 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.
- GROEN, A. H., WOODS, S. W., 2008. Effectiveness of aerial seeding and straw mulch for reducing post-wildfire erosion, north-western Montana, USA. *International Journal of Wildland Fire* 17, 559–571.
- HARRIS, F. S., YAO, H. H., 1923. Effectiveness of mulches in preserving soil moisture. *Journal of Agricultural Research* 9, 727-742
- HUBBERT, K. R., WOHLGEMUTH, P. B., BEYERS J. B., 2012. Effects of hydromulch on post-fire erosion and plant recovery in chaparral shrublands of southern California. *International Journal of Wildland Fire*, 21,155-167.
- IMESON, A. C. AND 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.
- IMESON, A. C., VERSTRATEN, J. M., VAN MULLINGEN, E. J., SEVINK, J., 1992. The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forests. *Catena* 19, 345-361.
- INBAR, A., 2011. Using synthetic polymers for soil erosion control after forest fires. M. S. Thesis. Tel-Aviv University.
- 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.
- JORDÁN, A., MARTÍNEZ-ZAVALA, L., 2008. Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in southern Spain after simulated rainfall. *Forest Ecology and Management* 255, 913–919.
- KEIZER, J. J., DOERR, S. H., MALVAR, M. C., PRATS, S. A., FERREIRA, R. S. V., OÑATE, M. G., COELHO, C. O. A., FERREIRA, A. J. D., 2008. Temporal variation in topsoil water repellence in two recently burnt eucalypt stands in north-central Portugal. *Catena* 74 (3), 192-204.

- KIM, C-G., SHIN, K., JOO, K-Y., LEE K-S., SHIN, S-S., CHOUNG Y., 2008. Effects of soil conservation measures in a partially vegetated area after forest fires. *Science of The Total Environment* 399, 158–164.
- 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, P. N. J., 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.
- LEIGHTON-BOYCE, G., DOERR, S. H., SHAKESBY, R. A., WALSH, R. P. D., 2007. Quantifying the impact of soil water repellency on overland flow generation and erosion: a new approach using rainfall simulation and wetting agent on in situ soil. *Hydrological Processes* 21, 2337–2345.
- MALVAR, M. C., PRATS, S. A., NUNES, J. P., KEIZER, J. J., 2011. Post fire overland flow generation and inter rill erosion under simulated rainfall in two eucalypt stands in north-central Portugal. *Environmental Research* 111, 222–236.
- MALVAR, M. C., MARTINS, M. A. S., NUNES, J. P., ROBICHAUD, P. R., KEIZER, J. J., 2013. Assessing the role of pre-fire ground preparation operations and soil water repellency in post-fire runoff and inter-rill erosion by repeated rainfall simulation experiments in Portuguese eucalypt plantations. *Catena* 108, 69-83 .
- MORRIS, S. E., MOSES, T. A., 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.
- PANNKUK, C. D., ROUBICHAUD, P. R. 2003. Effectiveness of needle cast at reducing erosion after forest fires. *Water Resources Research* 39: 1333.
- PRATS, S. A., MACDONALD, L. H., MONTEIRO, M. S. V., FERREIRA, A. J. D., COELHO, C. O. A., KEIZER, J. J., 2012. Effectiveness of forest residue mulching in reducing post-fire runoff and erosion in a pine and a eucalypt plantation in north-central Portugal. *Geoderma* 191, 115-124.
- PRATS, S. A., MALVAR, M. C., VIEIRA, D. C. S., KEIZER, J. J., 2013. Effectiveness of hydromulching to reduce runoff and erosion in a recently burnt and logged Maritime Pine stand in north-central Portugal. *Land Degradation and Development*. DOI: 10.1002/ldr.2236.
- PRATS, S. A., MARTINS, M. A. S., MALVAR, M. C., BEN-HUR, M., KEIZER, J. J., 2014. Polyacrylamide application versus forest residue mulching for reducing post-fire runoff and soil erosion. *Science of the Total Environment* 468-469, 464-474. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.066>
- PRATS, S. A., 2013. Soil erosion mitigation after forest wildfires. PhD Thesis. Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro – Universidade de Porto; pp. 145.
- ROBICHAUD, P. R., 2009. Post-fire stabilization and rehabilitation. In “Fire effects on soils and restoration strategies”. (Eds: A Cerdá, P. R. Robichaud). pp 299-320. (Science Publishers: Enfield, NH, USA).
- ROBICHAUD, P. R., LEWIS, S. A., WAGENBRENNER, J. W., ASHMUN, L. E., BROWN, R. E. 2013. Post-fire mulching for runoff and erosion mitigation. Part I: effectiveness at reducing hillslope erosion rates. *Catena* 105,75–92.
- ROUGH, D., 2007. Effectiveness of rehabilitation treatments in reducing post-fire erosion after the Hayman and Schoonover Fires, Colorado Front Range. MSc Thesis. Fort Collins, CO: Colorado State University; [177 pp.].
- SEVINK, J., IMESON, A. C., VERSTRATEN, J. M., 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, R. A., BOAKES, D. J., COELHO, C. O. A., GONÇALVES, A. J. B., WALSH, R. P. D., 1996. Limiting the soil degradational impacts of wildfire in pine and eucalyptus forests in Portugal. *Applied Geography* 16, 337-335.
- SOTO, B., 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.
- WAGENBRENNER, J. W., MACDONALD, L. H., ROUGH, D., 2006. Effectiveness of three post-fire rehabilitation treatments in the Colorado Front Range. *Hydrological Processes* 20, 2989–3006.

WOCAT, 2007. Where the Land is greener – case studies and analysis and water conservation initiatives worldwide. Hanspeter Liniger and William Critchley. // www.gva.es/ceam/html/forest_e.htm.