

PERDAS DE NUTRIENTES POR ESCORRÊNCIA SUPERFICIAL EM TRÊS ENCOSTAS FLORESTAIS RECENTEMENTE ARDIDAS

NUTRIENT LOSSES BY OVERLAND FLOW AT THREE RECENTLY BURNT FORESTED HILLSLOPES

Ana Machado

Mestre em Engenharia do Ambiente // Bolseira de Investigação do Centro de Estudos do Ambiente e do MAR (CESAM) e do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Isabel Nunes

PhD, Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e colaboradora do Centro de Estudos do Ambiente e do MAR (CESAM)

Mário Cerqueira

PhD, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e membro do Centro de Estudos do Ambiente e do MAR (CESAM)

Renata Pinto

Mestre em Engenharia do Ambiente // Bolseira de Investigação do Centro de Estudos do Ambiente e do MAR (CESAM) e do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Martinho Martins

Mestre em Engenharia do Ambiente // Bolseiro de Investigação do Centro de Estudos do Ambiente e do MAR (CESAM) e do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Diana Patoilo

PhD, Técnica Superior do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Jacob Keizer

PhD, Investigador Auxiliar do Centro de Estudos do Ambiente e do MAR (CESAM)

RESUMO: Numa área ardida do concelho de Sever do Vouga, foi estudada as perdas de quatro nutrientes (cálcio, magnésio, potássio, sódio) por escorrência superficial à escala de microparcela. Foram selecionadas três encostas queimadas, com dois tipos de floresta (plantações de eucalipto e pinheiro bravo) e dois tipos de geologia (granito e xisto). Foram analisadas amostras de escorrência referentes aos primeiros 6 meses após incêndio e, ainda, amostras de cinza e solo (camada de 0-2cm de profundidade). As concentrações de nutrientes foram determinadas por espectroscopia atômica.

As amostras de cinza apresentaram maiores concentrações de cálcio, enquanto as do solo apresentaram maiores concentrações de potássio. Porém, nem as amostras de cinza nem as amostras do solo revelaram diferenças relevantes entre as três encostas queimadas. O potássio também foi o elemento que registrou maiores perdas por escorrência em todas as encostas. Quanto às diferenças entre as encostas, o pinhal teve menores perdas que os dois eucaliptais, e o eucaliptal em xisto menores perdas que o eucaliptal em granito. Estas diferenças estavam sobretudo relacionadas com diferenças nas quantidades de escorrência superficial e não com diferenças nas concentrações dos nutrientes.

Palavras-chave: escorrência, erosão, incêndios florestais, nutrientes.

ABSTRACT: In a recently burnt area in the municipality of Sever do Vouga, north-central Portugal, the losses of four soil nutrients (potassium, calcium, sodium, magnesium) by overland flow were studied at the micro-plot scale. Three hillslope slopes were selected with two types of tree plantations (Eucalyptus Globulus and Maritime Pine) and two types of parent material (granite and schist). This study analyzed the overland flow samples collected during the first six months after the wildfire as well as samples of the ash layer and upper soil layer (0-2cm depth) collected immediately after the fire. The laboratory analysis of the samples involved digestion with acids and determination of nutrient concentrations by atomic spectroscopy.

Calcium attained the highest concentrations in the ash samples as opposed to potassium in the soil samples. Nutrient concentrations in neither ash nor soil samples differed markedly between the three hillslopes. Potassium was also the nutrient that revealed the highest losses by overland flow at all three sites. Nutrient losses were markedly lower for the pine than eucalypt slopes and for the eucalypt slope on schist than on granite. These differences were primarily due to differences in runoff amounts.

Keywords: erosion, nutrients, overland flow, forest wildfire.

1. INTRODUÇÃO

Em Portugal, na última década assistiu-se a um elevado número de incêndios florestais e de área ardida (DUDF, 2011). São vários os trabalhos (Trabaud, 1994; Thomas *et al.*, 1999; Johnson *et al.*, 2007) que indicam que os incêndios florestais provocam perdas de nutrientes, através de um conjunto de processos: volatilização, lixiviação para camadas mais profundas, e erosão tanto eólica como hídrica. A combustão da vegetação e da manta morta provoca a perda de nutrientes diretamente para a atmosfera por volatilização (Trabaud, 1994, Yildiz *et al.*, 2010). Dependendo sobretudo da severidade do fogo, pode ainda levar à formação de uma camada superficial de cinzas rica em nutrientes e facilmente erodível (Thomas *et al.*, 1999; Malvar *et al.*, 2011). O fogo pode ainda provocar várias alterações nas propriedades do solo, que resultam numa diminuição da capacidade de infiltração da água e, conseqüentemente, num aumento de escorrência superficial e da sua capacidade de transporte de sedimentos e nutrientes (Thomas *et al.*, 2000b; Ferreira *et al.*, 2005; Shakesby, 2011).

A mobilização de nutrientes após incêndio tem sido quantificada por vários autores em todo o mundo. Exemplos são Yildiz *et al.* (2010) na Turquia, Kutiel e Naveh (1987) em Israel, Trabaud (1994) em França, e Johnson *et al.* (2007) nos Estados Unidos da América. Em Portugal, apenas Thomas *et al.* (2000b) e Ferreira *et al.* (2005) estudaram as perdas de nutrientes, sob forma permutável e dissolvida, por escorrência ao longo de um curto período contínuo de monitorização. O presente trabalho tem como principal objetivo a quantificação das perdas, por escorrência superficial, dos nutrientes sódio, potássio, cálcio e magnésio (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}). O estudo foca nas perdas totais durante os primeiros 6 meses à escala de microparcela e pretende comparar as perdas para os dois principais tipos de floresta na Região Centro (plantações de eucalipto e pinheiro bravo) e os dois principais tipos de rocha (granito e xisto).

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na Ermida, concelho de Sever do Vouga (Figura 1), onde ocorreu um incêndio a 26 de Julho de 2010, que consumiu 295 hectares de floresta (DUDF, 2011). Este incêndio apresenta características visíveis de severidade moderada, com as copas das árvores parcial a totalmente afectadas,

cinzas de cor preta e a camada orgânica do solo amplamente consumida (Keeley, 2009). A área está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Vouga, situando-se a Norte do rio Vouga, ($40^{\circ}43'N$, $8^{\circ}20'O$). O clima é mesotérmico (temperado) húmido, com estação seca no Verão, a qual é moderadamente quente mas extensa (classificado como CSb, Köppen (1936)) (DRA – CENTRO, 2002). A temperatura média anual é de $14,9^{\circ}C$ (estação de Barragem de Castelo Burgães, 13km a Norte da área de estudo, a 306 m de altitude), e a precipitação média anual é de 1609 mm (estação udométrica de Ribeiradio, a 228m de altitude e a 4,5km a Este da área de estudo) (SNIRH, 2011). A vegetação arbórea predominante é constituída por eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e pinheiro bravo (*Pinus pinaster*). Os solos são predominantemente Cambissolos e Leptosolos Húmicos (WRB, 2006), possuindo uma textura variável (SSS, 1975) e com a rocha mãe de granito ou xisto (Tabela 1).

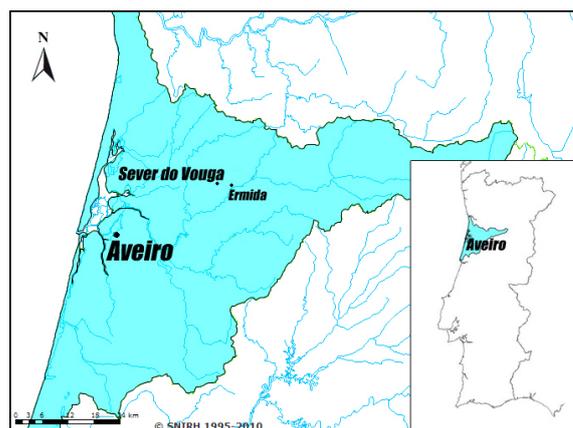


Figura 1 - Área de estudo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Desenho experimental

Na área de estudo foram escolhidas três encostas de declives acentuados, de acordo com o tipo de vegetação florestal predominante e geologia: (i) a encosta *Eucaliptal granito*, (ii) a encosta *Eucaliptal xisto*, e (iii) a encosta *Pinhal xisto*, na base da bacia (Figura 1).

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em Março de 2012, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em Abril de 2012. Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 33, Nº 1, 47-59, Maio de 2012.
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh33n1-4

Tabela 1 - Características gerais das encostas estudadas.

	Eucaliptal granito	Eucaliptal xisto	Pinhal xisto
Vegetação florestal predominante	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Pinus pinaster</i>
Coordenadas	40°43'N 8°21'O	40°43'N 8°20'O	40°43'N 8°20'O
Altitude (m)	222	223	151
Declive das microparcelas	20°	17°	26.7°
Densidade aparente (g/cm ³)	0.71 ± 0.11	0.78 ± 0.19	0.73 ± 0.13
Textura [0-2] cm	Franco-arenoso	Franco	Franco-argilo-arenoso
Areia (%)	61.3	44.7	53.6
Limo (%)	24.3	33.8	25.1
Argila (%)	14.4	21.5	21.3
Área das encostas (m ²)	154	96	83.8

As perdas de nutrientes, associadas à escorrência superficial, foram avaliadas através de três microparcelas, em cada uma das três encostas. Cada microparcela possui uma área projetada de 0,5m x 0,5m (0,25m²), com declives semelhantes entre si (Figura 2a e Figura 2b). Todas as parcelas estão conectadas por mangueiras a tanques de 30L, para recolha da escorrência.

A área de estudo foi monitorizada durante os primeiros seis meses, logo após o incêndio. O período de amostragem, que decorreu entre 08/09/2010 e 23/02/2011, foi condicionado pela reflorestação de algumas encostas, tendo sido construídos terraços, o que por sua vez implicou a remoção das microparcelas e interrupção do estudo.



Figura 2 - Parcelas da área de estudo. (a) microparcela e tanque de recolha de água de escorrência; (b) pormenor da microparcela.

3.2. Recolha de amostras

A precipitação total e a sua intensidade foram monitorizadas através de quatro pluviómetros totalizadores, e três pluviómetros automáticos distribuídos pela área de estudo. Ao longo do período de amostragem, a precipitação cumulativa foi de 1217mm, correspondendo a 84% do total do respetivo ano hidrológico (1445mm). Desde a data do incêndio até à primeira amostragem não ocorreram eventos de chuva relevantes. Durante o período de amostragem, devido a problemas logísticos, não foi possível monitorizar o segundo maior evento de precipitação (162mm), que ocorreu a 03/11/2010.

As medições de precipitação acumulada e recolha das amostras de escorrência tiveram início a 25/08/2010, e foram efetuadas periodicamente, em intervalos de 1 a 2 semanas, dependendo da ocorrência de precipitação, através de udómetros totalizadores e da escorrência retida nos tanques, respetivamente.

As amostras de escorrência foram recolhidas em garrafas de 0,5L de polietileno, previamente lavadas com HCl (20%), e transportadas em arcas térmicas para o laboratório, onde foram armazenadas a 4°C. Para análise laboratorial foram selecionadas as amostras correspondentes aos dois maiores eventos de precipitação de cada mês. A totalidade das amostras analisadas neste trabalho tem associada uma precipitação total de 962mm (79% do total de precipitação do período de monitorização).

As amostragens de cinza e solo foram efetuadas ao longo de um transeto representativo da encosta, com cinco pontos equidistantes, desde a base até ao topo. As amostras de cinza foram recolhidas a 10/08/2010, em cada ponto do transeto, em parcelas de 0,5m². A amostragem de solo foi efetuada após o fogo, a 10/08/2010, e repetida no final do estudo, a 23/02/2011, tendo sido recolhidas numa parcela de 0,25m². As amostras de cinza e solo foram secas ao ar.

3.3. Amostras de escorrência

Para a determinação de nutrientes nas amostras de escorrência, transferiu-se 0,1L de cada amostra recolhida no campo, para frascos de polietileno previamente lavados com HNO₃ (20%). As amostras foram acidificadas com HNO₃ concentrado para pH<2 e armazenadas a 4°C, segundo o protocolo 1060 APHA (1998), tendo uma validade de 6 meses. Posteriormente, as amostras foram digeridas com HNO₃ e H₂SO₄, segundo o protocolo 3030 G de APHA (1998), usando material de *teflon*, em banho de areia a 250°C. Para analisar o Na⁺ e K⁺ utilizou-se o método de Fotometria de Emissão de Chama (FEC), e para o Ca²⁺ e Mg²⁺ o método de Espectroscopia de Absorção

Atômica (EAA). A perda de sedimentos foi determinada pelo método de gravimetria 2540 D- Sólidos Suspensos Totais (SST) (APHA, 1998).

3.4. Amostras de cinza e solo

A caracterização das cinzas foi realizada com uma amostra composta dos cinco pontos do trasejo, com três réplicas por encosta. As amostras de cinza e solo foram digeridas, segundo o protocolo 3030 G de APHA (1998), e analisadas pelos mesmos métodos indicados nas amostras de escorrência.

Para a caracterização do solo das diferentes encostas, quanto à textura e densidade, recolheram-se amostras ao longo três pontos de cada encosta. A textura foi determinada através do método internacional da análise mecânica e avaliada segundo os critérios da "United States Department of Agriculture" (USDA). Os valores de densidade de cada encosta foram determinados através da utilização de anéis de densidade, com um volume de 250 cm³.

3.5. Análise Estatística

A normalidade dos dados foi avaliada através do teste de Shapiro-Wilk, resultando na sua rejeição. Porém, após a transformação dos dados, testou-se a significância das diferenças entre os dois tipos de floresta e entre os dois tipos de geologia, tanto no que diz respeito às concentrações das amostras de cinza e solo como às perdas por escorrência superficial. Utilizou-se o teste t de Student e o teste de Mann-Whitney ($\alpha \leq 0,05$). Testou-se ainda as relações entre as perdas de nutrientes nas três encostas e as suas relações com as quantidades de escorrência superficial, precipitação, intensidade da precipitação e perdas de sedimentos através de coeficiente de correlação de Spearman.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Nutrientes no solo e nas cinzas

Logo após o incêndio, os primeiros dois centímetros dos solos das três encostas apresentaram teores bastante semelhantes dos quatro nutrientes (Figura 3). Na comparação por tipo de geologia, os dados relativos à primeira amostragem não apresentaram diferenças significativas para os quatro catiões, já na segunda amostragem existiram diferenças significativas para o Na⁺. Na comparação por tipo de vegetação florestal verificou-se diferenças significativas para o K⁺, na primeira amostragem, enquanto que na segunda não existiram diferenças. Concluindo-se assim, que a diferente geologia e tipo de vegetação florestal não induzem diferenças notórias no teor dos quatro

nutrientes na camada superficial de solo. Estes resultados são concordantes com os obtidos por Neary *et al.* (2005), e eram de certa forma expectáveis atendendo à severidade moderada do incêndio e às elevadas temperaturas de volatilização dos nutrientes ($K^+ > 760^\circ C$; $Na^+ > 880^\circ C$; $Mg^{2+} > 1107^\circ C$ e $Ca^{2+} > 1240^\circ C$) (Ferreira *et al.*, 2009).

Dos quatro catiões analisados no solo, o K^+ é o mais abundante, sendo o Na^+ o minoritário. Entre os dois momentos de amostragem ao solo, não houve uma variação significativa nas concentrações dos nutrientes analisados, exceto o Ca^{2+} , cujo teor aumentou ligeiramente em todas as encostas. Uma possível justificação para este incremento de Ca^{2+} , nas encostas queimadas, poderá ser a sua migração da camada de cinzas, rica neste nutriente, para a camada de solo.

Na Figura 3 observa-se que, comparativamente ao solo, as cinzas possuem concentrações mais elevadas de nutrientes, exceto de K^+ , cujo valor é cerca de 20% inferior ao registado no solo. O Ca^{2+} é o nutriente mais abundante nas cinzas e, na encosta Pinhal xisto a sua concentração chega a ser 10 e 18 vezes superior ao encontrado no solo, na amostragem final e inicial, respetivamente. Comparativamente a esta encosta, as encostas de Eucaliptal granito e Eucaliptal xisto apresentam valores de Ca^{2+} 1,5 e 1,8 vezes inferiores, respetivamente. No entanto, estatisticamente não se encontra diferenças significativas para este nutriente, entre as cinzas do eucaliptal e do pinhal.

Na camada superficial de cinza de eucaliptal, Khanna *et al.* (1994) encontraram elevadas concentrações totais dos quatro catiões, sendo o Ca^{2+} predominante. Ferreira *et al.* (2005) obtiveram resultados semelhantes nas cinzas de pinhal, para a fração permutável. Todavia, enquanto no presente estudo a ordem de abundância de nutrientes nas cinzas é $Ca^{2+} > K^+ > Mg^{2+} > Na^+$, em ambos os estudos anteriormente citados as quantidades de Mg^{2+} foram superiores às de K^+ .

De modo geral, a encosta de Pinhal xisto revelou as maiores concentrações de nutrientes nas cinzas. O Na^+ , no entanto, foi uma exceção com maiores concentrações nas cinzas da encosta Eucaliptal granito (1,96g/kg cinza bs).

Ribeiro *et al.* (2002) estudaram a decomposição da manta morta de *Eucalyptus globulus*, na região centro de Portugal. Os referidos autores obtiveram uma concentração de Ca^{2+} (16,5 mg.g⁻¹) semelhante às encontradas neste trabalho, para as cinzas dos dois eucaliptais. Esta similaridade sugeriu que as quantidades elevadas de Ca^{2+} observadas nas cinzas possam ter origem na manta morta existente antes do incêndio. Já Nunes *et al.* (2010) quantificaram os teores de vários elementos na caruma de pinheiro bravo, encontrando também elevados valores de Ca^{2+} .

A comparação dos teores de Ca^{2+} nos estudos Nunes *et al.* (2010) e Ribeiro *et al.* (2002), sugeriu que os teores de Ca^{2+} sejam mais elevados nas folhas de eucalipto do que nas agulhas do Pinheiro Bravo. Contudo, neste trabalho observa-se uma concentração Ca^{2+}

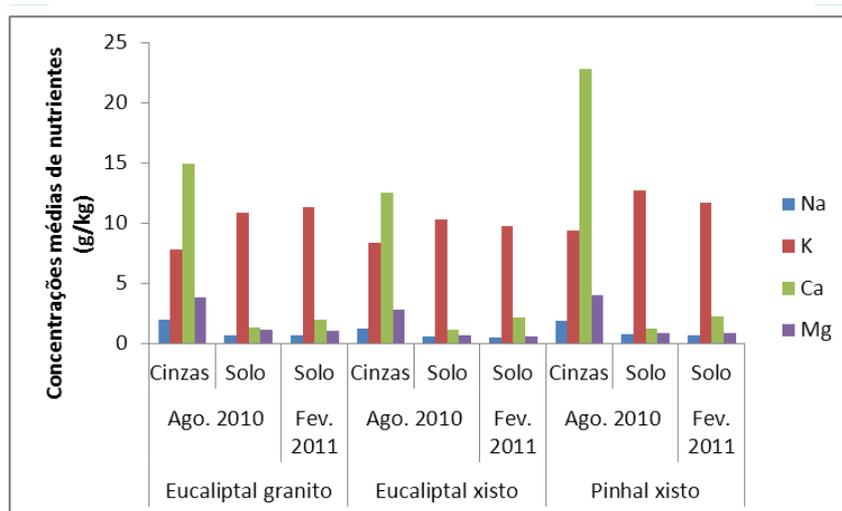


Figura 3 - Concentrações médias de nutrientes nas cinzas (g/kg cinza bs) e no solo superficial (0-2 cm: g/kg solo bs) no primeiro e sexto mês pós-fogo.

mais elevada (22,78 g/kg) nas cinzas da encosta de pinhal, comparativamente às cinzas das encostas de eucaliptal.

Relativamente aos restantes nutrientes, os resultados obtidos por Nunes *et al.* (2010) e Ribeiro *et al.* (2002) diferem, a nível quantitativo dos valores registados neste trabalho, mas assumem a mesma ordem de teores, com $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$.

4.2. Valores globais de escorrência e perdas de nutrientes e sedimentos

A encosta Eucaliptal xisto é a que possui o maior coeficiente de escorrência médio (33%). É também nesta encosta que se verifica a maior mobilização de nutrientes (vide Tabela 2). Na comparação da encosta Eucaliptal xisto com a Eucaliptal granito verifica-se que as perdas de nutrientes, entre as duas encostas são significativamente diferentes, para todos os catiões, exceto o Mg^{2+} ($p_value=0,67$). Por tipo de vegetação florestal as perdas de nutrientes ocorrem de modo similar para o Ca^{2+} ($p_value=0,10$) e o Mg^{2+} ($p_value=0,51$), enquanto que para os restantes catiões as perdas destes entre as encostas de Eucaliptal xisto e a de Pinhal xisto apresentam diferenças significativas. A menor mobilização registada do K^+ e do Ca^{2+} é na encosta de Eucaliptal granito, enquanto que para o Na^+ e Mg^{2+} tal acontece na encosta de Pinhal.

Dos quatro nutrientes analisados, o K^+ é o mais mobilizado em todas as encostas. Em oposição o Mg^{2+} é o que menos perdas, por escorrência, apresentou. Este resultado contradiz o que Thomas *et al.* (1999) verificara em sedimentos, e Thomas *et al.* (2000b) e Ferreira *et al.* (2005) observaram em escorrências, os quais reportam maiores perdas associadas ao Ca^{2+} . As diferenças podem ser atribuídas ao fato de, nestes casos, terem sido determinadas as concentrações da fracção solúvel e permutável dos nutrientes, enquanto no presente estudo se determinaram as totais. Sendo assim, e segundo refere Costa (2004), o K^+ encontra-se no solo numa percentagem mínima na forma permutável (1 a 2%), enquanto o Mg^{2+} e principalmente o Ca^{2+} , estão em maiores quantidades nesta forma, logo as amostras de escorrência terão um teor mais elevado de K^+ na forma total, uma vez que o solo deste estudo é rico neste nutriente.

Embora exista no solo de 0-2 cm um maior teor de Mg^{2+} em comparação com o Na^+ , o Mg^{2+} possui menores perdas, indicando que é um nutriente pouco mobilizado, o que está de acordo com Soto e Diaz-Fierros (1993), que obtiveram uma rápida mobilização para os nutrientes monovalentes, Na^+ e K^+ , em comparação aos bivalentes, Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Quanto à influência do tipo de geologia na perda de sedimentos e nutrientes, verifica-se que os valores

mais elevados registam-se na encosta Eucaliptal xisto. As diferenças mais expressivas entre as encostas de Eucaliptal xisto e Eucaliptal granito estão associadas ao volume de escorrência.

Os solos graníticos possuem percentagens significativas de areia na sua textura, o que lhes confere maior vulnerabilidade à erosão, e conseqüentemente, à perda nutrientes sob a forma particulada. Estes efeitos devem ser mais notórios à escala de encosta, do que à pequena escala, em que se focou este estudo. Presume-se que, à escala da microparcela (0,25m²), a elevada percentagem de areia (61,3%) no solo da encosta Eucaliptal granito, deverá ter conferido uma maior capacidade de infiltração da água no solo, comparativamente à encosta Eucaliptal xisto. Este fato traduz-se numa diminuição do coeficiente de escorrência, explicando assim a diferença observada deste parâmetro entre as duas encostas.

No que concerne à influência do tipo de vegetação florestal na perda de nutrientes e sedimentos, observa-se que, a encosta de Eucalipto xisto apresenta valores mais elevados quando comparada com a de Pinhal xisto. Este facto foi também constatado por Thomas *et al.* (2000b), que determinaram os nutrientes, em amostras de escorrência, de ambos tipos de espécie florestal, em parcelas de 16 m². No referido estudo, os maiores valores de escorrência registaram-se no pinhal; em oposição, neste trabalho verificou-se que tal acontecia na encosta de eucalipto.

Associam-se as menores perdas de sedimentos registadas na encosta Pinhal xisto, ao menor coeficiente de escorrência, e também ao importante papel desempenhado pela caruma de pinheiro, que caiu da copa das árvores após o incêndio. Esta camada de caruma poderá ter funcionado como mitigadora da erosão, retendo os sedimentos perdidos por escorrência superficial e minimizando assim os efeitos do impacto da chuva no solo, i.e. terá atuado como uma manta protetora. Este efeito foi observado anteriormente por Thomas *et al.* (2000a), que observaram um incremento na perda de sedimentos, quando se retirava a camada de caruma de pinheiro que revestia o solo.

4.3. Variação temporal da mobilização de nutrientes

4.3.1. Concentração de nutrientes nas amostras de escorrência

As concentrações de nutrientes nas amostras de escorrência são mais elevadas na primeira amostragem (Figura 4). Posteriormente, observa-se uma drástica diminuição das referidas concentrações, mantendo-se em níveis reduzidos no restante período de amostragem.

A encosta Eucaliptal xisto exibe os valores mais elevados de concentração, apresentando pontualmente

Tabela 2 - Escorrência superficial e perda de nutrientes e sedimentos nas microparcelas das encostas queimadas, durante os primeiros seis meses após o incêndio.

Encosta	Coeficiente de Escorrência [%]	Taxa de perda de sedimentos* [mg/m ² /mm]	Perda de nutrientes [mg/m ²]			
			Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Eucaliptal granito	24	51	1194	1520	724	553
Eucaliptal xisto	33	156	1891	5537	2542	1695
Pinhal xisto	22	107	877	1628	1156	390

* Perda de sedimentos por mm de precipitação

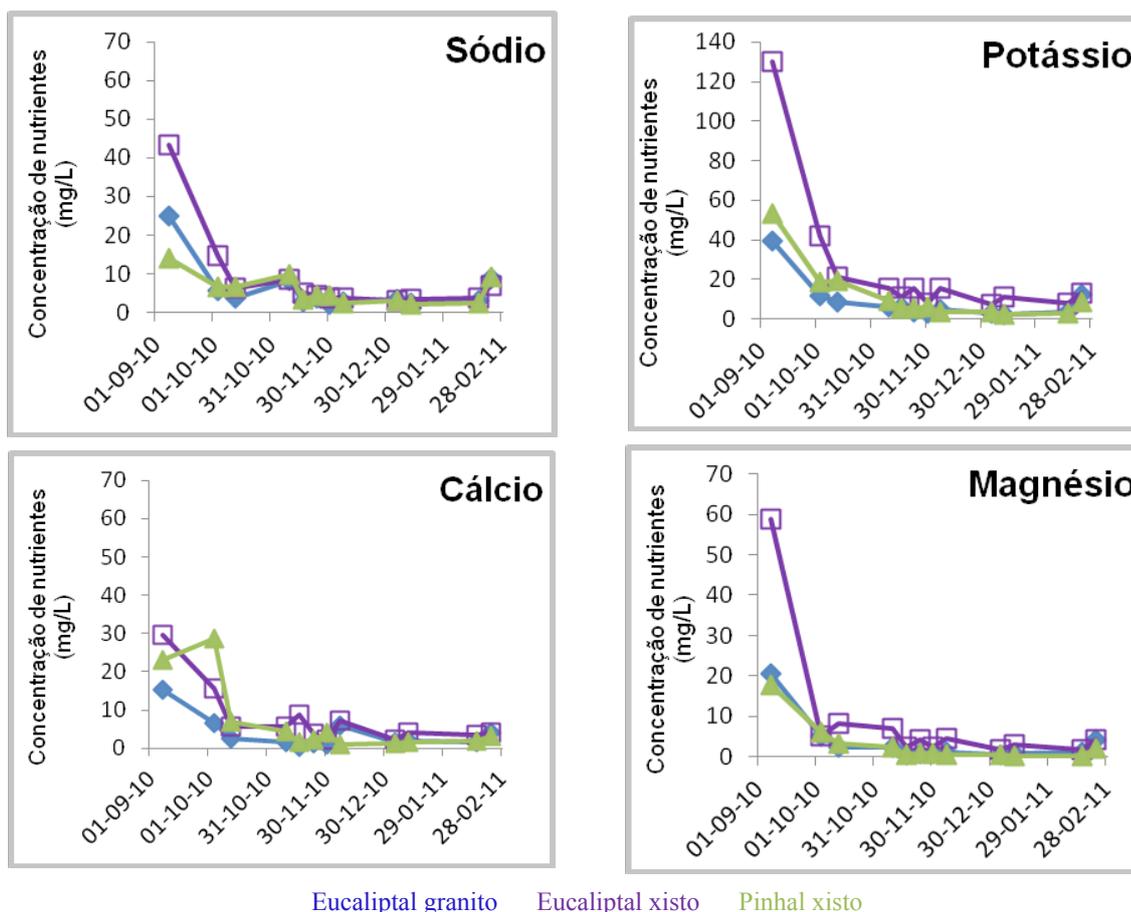


Figura 4 - Concentração de nutrientes em amostras de escorrência recolhidas nas microparcelas das diferentes encostas.

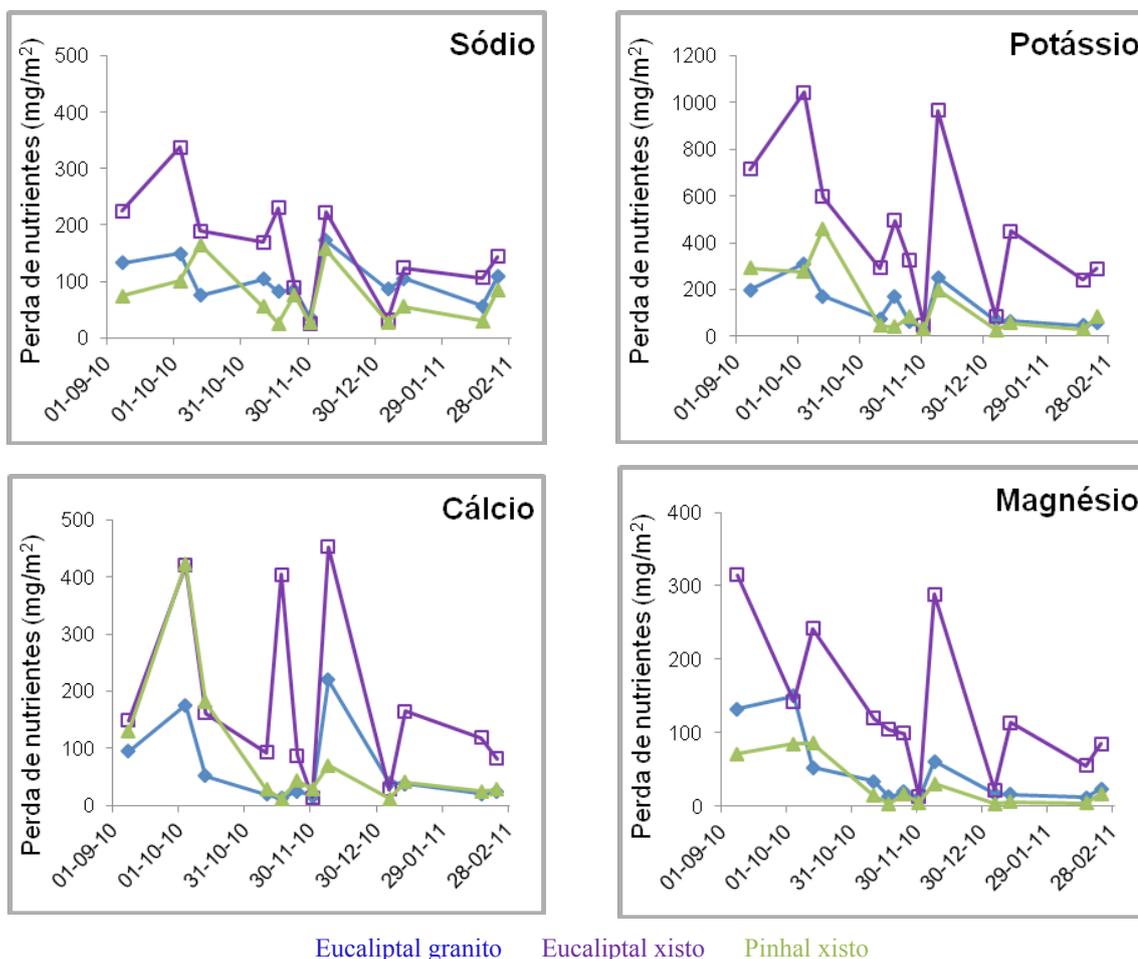


Figura 5 - Mobilização de nutrientes em amostras de escorrência recolhidas nas microparcelas das diferentes encostas.

pequenos picos, mas nunca da mesma ordem de grandeza dos valores da primeira amostragem. A evolução temporal (qualitativa) dos nutrientes na escorrência das encostas Eucaliptal granito e Pinhal xisto é, regra geral, semelhante, exceto o Ca^{2+} .

As curvas referentes ao Na^+ apresentam uma tendência similar nas três encostas. Após o evento de 10/11/2010, as referidas curvas aproximam-se. Na última amostragem observa-se um novo pico de concentração.

O K^+ é o nutriente que apresenta os valores mais elevados de concentração, sendo assim o nutriente mais mobilizado no decorrer desta monitorização. Nas três encostas, o Ca^{2+} apresenta concentrações temporalmente irregulares, entre 13/10/2010

e 5/1/2011, assumindo depois uma tendência semelhante entre elas. Na encosta Pinhal xisto o valor mais elevado de Ca^{2+} ocorre na segunda data de amostragem, sendo de 28,7mg/L. A curva relativa à evolução temporal da concentração de Mg^{2+} apresenta um comportamento semelhante à do K^+ . Todavia, do ponto de vista quantitativo, as concentrações do cátion monovalente são inferiores.

4.3.2. Massa de nutrientes mobilizada

As perdas mássicas de nutrientes resultam da combinação de dois parâmetros: a concentração e a escorrência. Naturalmente que, os valores mais elevados verificados nas perdas mássicas são fruto

de concentrações e de volumes de escorrência igualmente elevados.

As curvas relativas à mobilização mássica de nutrientes apresentam uma maior variação temporal, do que as curvas de concentração. Na Figura 5 observa-se que, ao longo do período de monitorização, as curvas de concentração de nutrientes apresentam um comportamento simples decrescente. Por outro lado, as curvas correspondentes à perda mássica são muito mais irregulares, apresentando diversos máximos e mínimos ao longo do tempo. Este comportamento advém dos volumes de escorrência. Já as concentrações de nutrientes máximas registaram-se nos primeiros eventos, após o incêndio. Uma razão plausível para esta ocorrência é a contribuição da camada superficial de cinzas rica em nutrientes, que é facilmente erodida, e por isso é arrastada de modo preferencial pela escorrência nos primeiros eventos de chuva.

Em cada evento, a perda de nutrientes é maior na encosta de Eucaliptal xisto, sendo mais notória no K^+ . As curvas correspondentes às encostas Eucaliptal granito e Pinhal xisto, exibem uma variação temporal e magnitude semelhantes. As maiores perdas de Na^+ registaram-se entre a primeira e a amostragem de 17/11/2010, na encosta Eucaliptal xisto. Após esta data, as perdas do referido nutriente são semelhantes nas três encostas, à exceção dos dois últimos eventos analisados. A encosta Eucaliptal xisto apresenta a maior mobilização de todos os nutrientes, mas também a maior inconstância temporal das perdas. Nas primeiras três amostragens a perda do Ca^{2+} nesta encosta equipara-se à de Pinhal xisto.

Ferreira *et al.* (2005) indicam que as maiores perdas de nutrientes (fração dissolvida) ocorrem nos primeiros quatro meses depois do incêndio; acrescentam ainda que os picos de perdas que surgem após este período encontram-se associados a grandes eventos de precipitação. Atendendo a que o período de monitorização deste estudo foi de seis meses, não foi possível confirmar as constatações dos referidos autores. No entanto, nas últimas amostragens, para eventos de precipitação mais elevados comparativamente aos das primeiras semanas logo após o incêndio, verificam-se valores semelhantes ou inferiores de perda de nutrientes.

4.3.3. Evolução temporal dos factores que influenciam a perda de nutrientes

A evolução temporal da precipitação e da escorrência, nas microparcels das encostas monitorizadas, pode ser visualizada na Figura 6. Na referida figura observa-se que os picos de escorrência geralmente correspondem aos de precipitação.

Quando comparadas as Figuras 5 e 6, verifica-se uma relação entre variação das perdas mássicas de nutrientes, a escorrência, a precipitação total e a intensidade da precipitação: sendo mais notória nas datas de 17/11/2010, 08/12/2010, 12/01/2011.

Na Figura 7 estão representadas a precipitação e a perda de sedimentos. Verifica-se que as perdas de sedimentos são maiores na encosta Eucaliptal xisto e menores para a encosta Pinhal xisto. Nos dois primeiros eventos registam-se perdas de sedimentos semelhantes nas três encostas. O evento onde se registou a perda máxima de sedimentos, foi o terceiro e na encosta de Pinhal xisto. A este evento está também associado um pico de perda mássica de todos os nutrientes (à exceção do Ca^{2+}) na referida encosta.

Geralmente, a grandes eventos de precipitação estão associados picos de intensidade, principalmente nos primeiros meses de amostragem (Figura 8). O evento em que se registou o valor mais elevado de intensidade (26,7mm/h), corresponde ao valor máximo de precipitação (181mm) e perda de sedimentos (Figura 7 e Figura 8).

As perdas de nutrientes e os valores de intensidade máxima em 30 minutos, apresentam a mesma tendência, apenas na encosta Eucaliptal xisto, e para os nutrientes Na^+ , K^+ e Ca^{2+} (Figura 5 e Figura 8).

Os máximos de escorrência, de intensidade de precipitação e de perda de sedimentos ocorrem no evento de 08/12/2010. Após esta data, os três parâmetros apresentam uma tendência semelhante em qualquer uma das encostas avaliadas, sugerindo ter havido saturação do solo.

4.3.4. Coeficientes de correlação de Spearman ($p < 0.05$) dos factores que influenciam a perda de nutrientes

A escorrência produzida em cada encosta não tem um fator hidrológico associado que domine o seu regime, sendo os valores dos coeficientes de correlação de Spearman (r) ($p < 0.05$) bastante elevados, tanto para a quantidade de precipitação, como para a sua intensidade. Nas encostas Eucaliptal granito e Pinhal xisto, a intensidade da precipitação é a que melhor se relaciona com a escorrência, com $r=0,85$ e $r=0,84$, respectivamente. Na encosta Eucaliptal xisto a escorrência está mais relacionada com a precipitação, do que com a sua intensidade, apresentando um $r=0,84$ para um $r=0,77$, respetivamente.

Nas encostas de eucalipto é a precipitação que influencia a perda de sedimentos: $r=0,629$ para a encosta Eucaliptal granito e $r=0,818$ para a de Eucaliptal xisto. A intensidade da precipitação é a responsável pela variação registada na perda de sedimentos ($r=0,79$) na encosta Pinhal xisto. Este facto

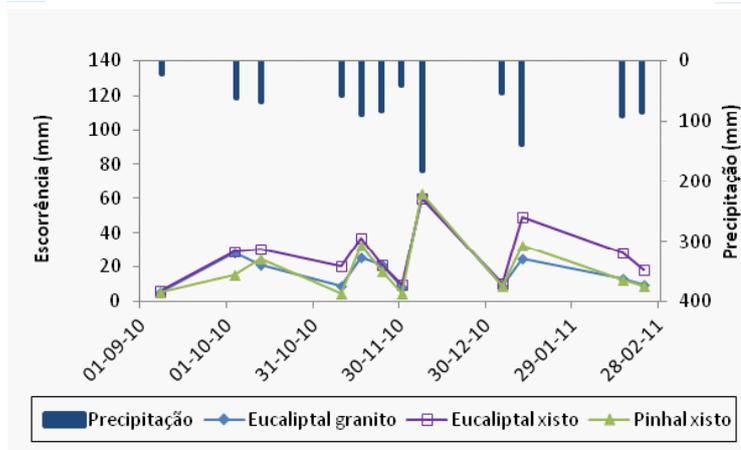


Figura 6 - Evolução temporal da precipitação e escorrência nas microparcelas das encostas estudadas.

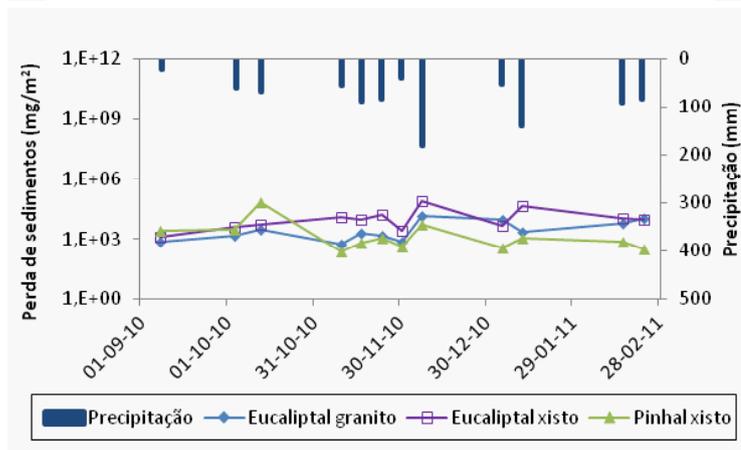


Figura 7 - Evolução temporal da precipitação e perda de sedimentos nas microparcelas das encostas estudadas.

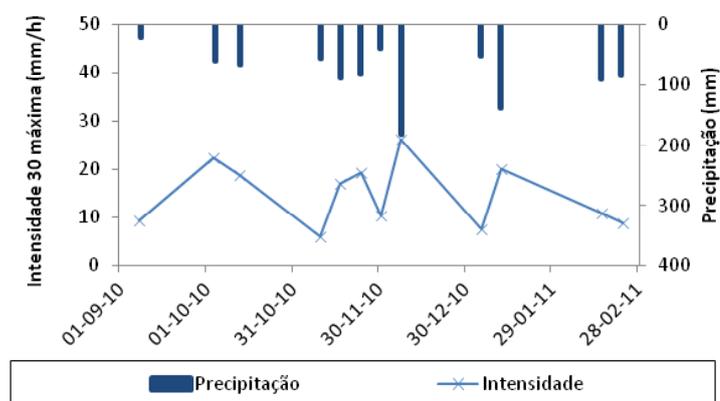


Figura 8 - Evolução temporal da precipitação e intensidade máxima em 30 minutos.

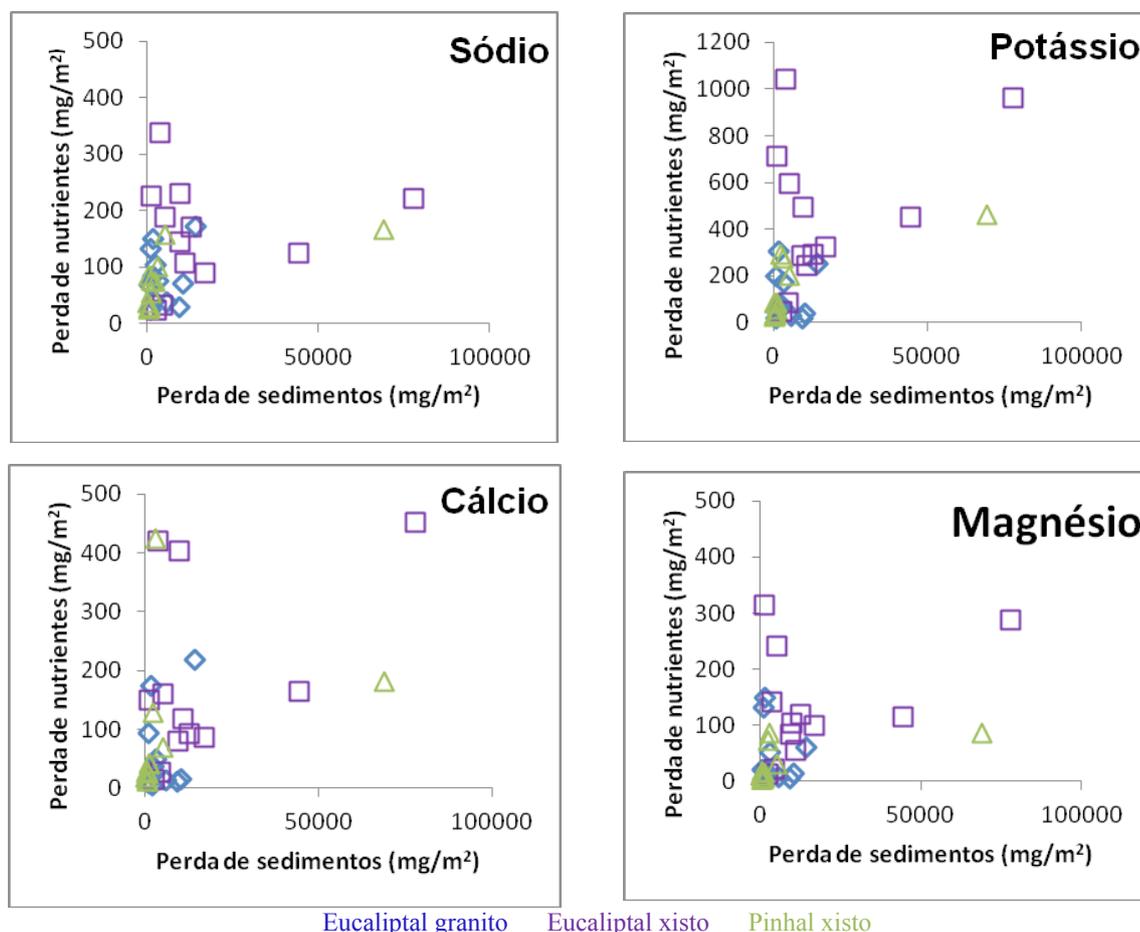


Figura 9 - Correlações da perda mássica de nutrientes com a perda de sedimentos.

pode dever-se à existência da camada protetora de caruma presente nesta encosta.

As melhores correlações entre os vários processos hidrológicos (escorrência, precipitação e I_{30}) e a perda de nutrientes, ocorre na encosta Eucaliptal granito, mais especificamente com o Na^+ e o K^+ . Todavia, para o processo de perda de sedimentos a perda de Ca^{2+} foi que apresentou a melhor relação com este ($r=0,20$). Na encosta Eucaliptal xisto o Ca^{2+} é o nutriente que tem a sua mobilização melhor correlacionada com os diferentes fatores hidrológicos, apresentando a menor correlação para os sedimentos ($r=0,47$) e a maior para o I_{30} ($r=0,87$). O Mg^{2+} possui os menores valores de correlação, sugerindo que sua a mobilização não é influenciada pelos fatores hidrológicos em questão. A perda de nutrientes possui uma relação mais direta com a escorrência e a intensidade da precipitação.

Neste estudo, as melhores correlações entre a perda de nutrientes e a I_{30} observam-se nas encostas de Eucaliptal granito com $r=0,87$ e na encosta Pinhal xisto com $r=0,53$. Na encosta Eucaliptal xisto os valores não diferem muito entre estes dois fatores, com uma diferença máxima de 0,13 para o K^+ .

As melhores correlações entre a perda de nutrientes e os sedimentos (Figura 9) ocorrem para a encosta Pinhal xisto, com $r=0,67$, $r=0,78$, $r=0,80$ e $r=0,66$, para o Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , respetivamente. No entanto, estas correlações são dominadas pelo evento de 13/10/2010, no qual existe um pico de perda de sedimentos nesta encosta (Figura 7).

De forma geral, neste estudo é claramente visível a relação entre perda de nutrientes e os fatores escorrência e intensidade da precipitação. Na encosta Eucaliptal xisto as perdas de Ca^{2+} estão fortemente

relacionadas com os diferentes factores estudados. Este resultado sugere que houve uma perda gradual das cinzas em vez de uma grande perda inicial resultando numa exaustão das cinzas.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo sugerem que o tipo de floresta e geologia, num período de 6 meses após um incêndio, não induziram grandes diferenças no teor de nutrientes no solo de 0-2cm de profundidade. De um modo geral, tampouco existiu uma variação temporal notável no teor de nutrientes no solo ao longo do período de monitorização, exceto no caso do Ca^{2+} , que mostrou um ligeiro aumento. Este incremento poderá dever-se à migração do Ca^{2+} da camada de cinzas para a de solo. As cinzas das três encostas, assim como o solo, não apresentaram diferenças relevantes, excepto para o Ca^{2+} , onde a encosta Pinhal xisto possui teores deste elemento bastante mais elevados do que as encostas de eucalipto.

A encosta Eucaliptal xisto evidenciou à escala de microparcela, as maiores perdas de nutrientes que as outras duas encostas. Entre os quatro nutrientes, o K^+ evidenciou as maiores perdas por escorrência superficial e o Mg^{2+} as menores perdas. Sendo assim, na comparação entre os dois tipos de floresta, verificou-se as maiores perdas para os eucaliptais do que para o pinhal. Relativamente à influência do tipo de geologia, as maiores perdas de nutrientes ocorreram na encosta de xisto, do que na de granito. Em ambos os casos, as maiores perdas estão sobretudo associadas a maiores volumes de escorrência superficial.

Para se avaliar melhor a importância das perdas de nutrientes após-fogo por escorrência superficial, recomenda-se estudar também os outros fluxos do balanço de nutrientes, nomeadamente a deposição atmosférica dos nutrientes.

BIBLIOGRAFIA

APHA (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20^a ed. American Public Health Association, Washington D.C.

Costa, J. B. (2004). *Caracterização e Constituição do Solo*. 5^a ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.

DRA-Centro (2002). Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Vouga, 1^a fase, Análise e diagnóstico da situação de referência. Análise biofísica, Anexos. Direcção Regional do Ambiente do Centro, Lisboa, Portugal. [disponível em <http://www.arhcentro.pt/website/LinkClick.aspx?fiLeticket=86UOh6WtK%2bY%3d&tabid=284>]

Direcção de Unidade de Defesa da Floresta (2011). Relatório anual de áreas ardidas e ocorrências em 2010. Autoridade Florestal Nacional. 5p., Lisboa, Portugal. [disponível em <http://www.afn.min-agricultura.pt/portal/dudf/relatorios/resource/ficheiros/2010/relatorio-final-2010>]

Ferreira, A. J. D., Coelho, C. O. A., Boulet, A. K. & Lopes, F. P. (2005). Temporal patterns of solute loss following wildfires in central Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 14, 401-412.

Ferreira, A. J. D., Silva, J. S., Coelho, C. O. A., Boulet, A. K. & Keizer, J. J. (2009). The Portuguese Experience in Managing Fire Effects. In: Robichaud P. & Cerdà A. (eds.) *Fire Effects on soils and restoration strategies*, pp. 401-424, Science Publishers, Enfield, U.S.A. ISBN: 978-1-57808-526-2

Helvey, J. D., Tiedemann, A. R. & Anderson, T. D. (1985). Plant nutrient losses by soil erosion and mass movement after wildfire. *Soil and Water Conservation*, Vol. 40, 168-173.

Johnson, D., Murphy, J. D., Walker, R. F., Glass, D. W. & Miller, W. W. (2007). Wildfire effects on forest carbon and nutrient budgets. *Ecological Engineering*, Vol. 31, 183-192.

Keeley, J. E. (2009) Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 18, 116-126.

Khanna P. K., Raison, R. J. & Falkiner, R. A. (1994). Chemical properties of ash derived from Eucalyptus litter and its effects on forest soils. *Forest Ecology and Management*, Vol. 66, 107-125.

Kutiél, P. & Naveh, Z. (1987). The effect of fire on nutrients in pine forest soil. *Plant and Soil*, Vol. 104, 269-274.

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*, Vol. 111, 222-236.

Neary, D. G., Ryan, K. C. & DeBano, L. F. (2005). Wildland fire in ecosystems: Effects of fire on soil and water. General Technical Report, vol. 4. *Rocky Mountain Research Station*, Forest Service, USDA, Fort Collins, Colorado. RMRS-GTR-42, Washington DC.

Nunes, L., Patrício, M. S., Tomé, J. & Tomé, M. (2010). Carbon stocks in Portuguese maritime pine stands. *Forest Systems*, Vol. 19(3), 434-448.

Ribeiro, C., Madeira, M. & Araújo, M. C. (2002). Decomposition and nutrient release from leaf litter of Eucalyptus globulus grown under different water and nutrient regimes. *Forest Ecology and Management*, Vol. 171, 31-41.

- Soto, B. & Diaz-Fierros, F. (1993). Interactions between plant ash leachates and soil. *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 3, 207-216.
- SSS (Soil Survey Staff) (1975). Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. *U.S. Department of Agriculture*, Washington, D.C.
- Thomas, A. D., Walsh, R. P. D. & Shakesby, R. A. (1999). Nutrient losses in eroded sediment after fire in eucalyptus and pine forests in the wet Mediterranean environment of northern Portugal. *Catena*, Vol. 36, 283-302.
- Thomas, A. D., Walsh, R. P. D. & Shakesby, R. A. (2000a). Post-fire forestry management and nutrient losses in eucalyptus and pine plantations, northern Portugal. *Land Degradation & Development*, Vol. 11, 257-271.
- Thomas, A. D., Walsh, R. P. D. & Shakesby, R. A. (2000b). Solutes in overland flow following fire in eucalyptus and pine forests, northern Portugal. *Hydrological Processes*, Vol. 14, 971-985.
- Trabaud, L. (1994). The effect of fire on nutrient losses and cycling in *Quercus coccifera* garrigue (southern France). *Oecologia*, Vol. 99, 379-386.
- WRB (World Reference Base for soil resources), (2006). World Soil Resources Reports N^o. 103, 2^a ed. FAO, Rome.
- Yildiz, O., Esen, D., Sarginci, M. & Toprak, B. (2010). Effects of forest fire on soil nutrients in Turkish pine (*Pinus brutia*, Ten) Ecosystems. *Journal of Environmental Biology*, Vol. 31, 11-13.