

10º Congresso da Água

## DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS QUALITATIVOS DOS FOGOS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: Aplicação aos casos de estudo do Vale de Manteigas e de Mação

**João Paulo LOBO FERREIRA**

*Dr. Engenharia Civil, Investigador-Coordenador do LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, tel: 21 844 3609, email: lferreira@lnec.pt*

**Maria Emília NOVO**

*Geóloga, Dr. Engenharia do Ambiente, Investigadora Auxiliar no LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, tel: 21 844 3623, email: enovo@lnec.pt*

**Maria Helena LOPES**

*Investigadora no INETI, Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa, tel: 21 092 4790, email: helenalopes@ineti.pt*

**Luís QUINTA-NOVA**

*Escola Superior Agrária do IPCB, Quinta da Senhora de Mércules, Apartado 119, 6001-909 Castelo Branco, tel: 272 339 900, email: lnova@esa.ipcb.pt*

**Paulo FERNANDEZ**

*Escola Superior Agrária do IPCB, Quinta da Senhora de Mércules, Apartado 119, 6001-909 Castelo Branco, tel: 272 339 900, email: palex@esa.ipcb.pt*

**Teresa LEITÃO**

*Investigadora Principal com Habilitação do LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, tel: 21 8443 802, email: tleitao@lnec.pt*

**Isabel LARANJEIRA**

*Eng.ª Agrónoma, ex.-bolsista no LNEC*

**Manuel Mendes OLIVEIRA**

*Geólogo, Dr. Hidrogeologia, Investigador Auxiliar no LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, email: moliveira@lnec.pt*

**Eduardo PARALTA**

*Geólogo, Dr. Hidrogeologia, Investigador do INETI, Estrada da Portela, Zambujal – Alfragide, Apartado 7586, 2720-866 Amadora email: eduardo.paralta@ineti.pt*

### RESUMO

No Projecto POCI/AGR/59180/2004, concluído em 2009 (*cf. Lobo-Ferreira et al., 2009*), apresenta-se uma metodologia para avaliação quantitativa dos impactos dos fogos florestais na quantidade e qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

Nesta metodologia procura-se avaliar as alterações que possam ter ocorrido após o fogo: (A) em volumes de recarga, (B) volumes de escoamento superficial, (C) qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Esta metodologia considera: (1) tipo e densidade de coberto vegetal à data do incêndio; (2) tipos de poluentes que podem ser libertados pelas diferentes comunidades vegetais afectadas pelo fogo; (3) extensão e volume do aquífero e sua porosidade eficaz, para aferir dos volumes de reservas de água; (4) recarga média anual; (5) tempo de permanência das águas no sistema subterrâneo.

Para a avaliação do tipo e densidade de coberto vegetal e conseqüente biomassa combustível à data do incêndio usou-se a inventariação fitossociológica, cartografia da vegetação, análise estatística multivariada e estimativa da biomassa florestal ardida, realizada pelo Instituto Politécnico de Castelo

Branco-Escola Superior Agrária. Os tipos e cargas poluentes libertados calcularam-se com base nos valores de biomassa ardida e estudos (realizados por INETI – Departamento de Engenharia Energética e Controlo Ambiental) de cinzas de ensaios de combustão de espécies florestais e arbustivas representativas do coberto vegetal ardido, e ensaios de lixiviação de solos e cinzas.

A avaliação das variações na recarga baseou-se na informação recolhida nos estudos quantitativos realizados na bacia de Manteigas, associada a modelos hidrológicos conceptuais e cenários de variação de escoamento e evapotranspiração quando a informação não era suficiente para colmatar as lacunas de conhecimento.

Com base na biomassa ardida, características composicionais das suas cinzas e potenciais de lixiviação, calculou-se a quantidade e tipo de poluentes em fase sólida e dissolvida passíveis de entrar nas águas superficiais e subterrânea.

As características hidráulicas dos meios geológicos afectados deram os volumes de armazenamento e as prováveis velocidades de circulação nestes materiais, o que serviu para prever espaços temporais de contaminação da área.

Da avaliação dos volumes de carga poluente calculados e dos dados de campo de decaimento destas cargas poluentes nas águas superficiais e subterrâneas em zonas de coberto vegetal similar estabeleceram-se cenários possíveis do tempo de desaparecimento do poluente na área ardida.

Nesta comunicação realçam-se os aspectos relacionados com a qualidade das águas subterrâneas.

**Palavras-Chave:** fogos, águas superficiais, águas subterrâneas, recarga, coberto vegetal, cinzas, carga poluente sólida, lixiviados.

## 1 INTRODUÇÃO

Este artigo ilustra uma metodologia de análise e resultados do impacto da poluição dum fogo florestal no vale do Zêzere, ocorrido no ano de 2005 e que se estendeu desde a região de cabeceira até às vizinhanças de Caldas de Manteigas, afectando 65% (cerca de 18 km<sup>2</sup>) desta área. O desenvolvimento desta metodologia resulta da aplicação dos conhecimentos adquiridos no projecto POCI/AGR/59180/2004 “Avaliação do Impacto de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos”, concluído em 2009 (cf. Lobo-Ferreira *et al.*, 2009).

Para avaliar o impacto da poluição considerou-se: (1) tipo e densidade de coberto vegetal existente à data do fogo; (2) tipos de poluentes que podem de ser libertados pelas diferentes comunidades vegetais afectadas pelo fogo; (3) extensão e volume do aquífero, sua porosidade eficaz respectivos os volumes de reservas de água; (4) recarga média anual; (5) tempo de permanência das águas no sistema subterrâneo. A metodologia desenvolvida define o volume de poluente entrado no meio hídrico, o seu tempo de transporte dentro do sistema subterrâneo (e respectiva velocidade de depuração ou tempo de permanência). Para uma correcta avaliação destes processos consideraram-se as interacções entre os sistemas superficial e subterrâneo, e de que modo estas interacções interferem nos processos de depuração (e portanto na resiliência) do sistema hídrico no seu todo.

Os aspectos relacionados com a quantidade das águas subterrâneas foram desenvolvidos no âmbito do projecto, nomeadamente por Martinho e Oliveira (2008), e divulgados no Seminário sobre Águas Subterrâneas da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, realizado em Março de 2007, por Lobo-Ferreira *et al.* (2007). Os resultados finais foram apresentados à FCT em Lobo-Ferreira *et al.* (2009).

Nesta comunicação realçam-se os aspectos relacionados com a qualidade das águas subterrâneas.

## 2 PRECIPITAÇÃO E COBERTO VEGETAL

As precipitações médias anuais da região do Vale de Manteigas são superiores a 2 000 mm nas zonas planálticas, diminuindo para as zonas de menor altitude. SNIRH, para o período de 1/10/1939 a 1/10/2005, no posto udométrico da Covilhã, assinalara uma precipitação média anual de 1 564 mm. Os fogos tendem a modificar a precipitação nos anos imediatos à sua ocorrência, pelo que a análise do seu impacto no meio hídrico deve considerar os valores de precipitação pós-fogo, seguindo a sua evolução até às condições existentes pré-fogo (caso estas venham a ser atingidas). A ocupação vegetal na área ardida em 2005, de acordo com Quinta-Nova *et al.* (2008) apresenta-se no Quadro 1 e Fig. 1:

Quadro 1 – Ocupação do solo na área ardida da bacia do Zêzere em 2005

Vegetação / Ocupação do solo	Área ardida (ha)
Matos	2200
Área ardida antes de 2005	208
Área agrícola	25
Pinho bravo	201
Povoamento de carvalhos	11
Povoamentos mistos de resinosas	211
Povoamentos mistos de folhosas e resinosas	149
Povoamentos mistos de folhosas	14
Outras resinosas	65
Outras folhosas	17

## 3 GEOLOGIA

A área de estudo é um vale glaciário de perfil em U, traçado rectilíneo e orientação NNE-SSW, sito ao longo dum troço da falha activa do Zêzere (que é o extremo sul do sistema activo da falha da Vilaríça). Regista ainda fracturas de direcção dominante NE-SW (Marques *et al.*, 2007) e fracturas transversais ou sub-paralelas à falha activa do Zêzere-Vilaríça, que funcionam como canais preferenciais de ascensão e descarga de água, a que se associam nascentes. Estas fracturas estão com frequência associadas a faixas de granitos não porfíroides (ex.: Caldas de Manteigas) e fendas de tracção (Ribeiro e Almeida, 1981, in ACavaco, 1991). O vale é circundado por dois importantes planaltos e alguns vales suspensos (ex.: vale da Candeeira). As formações geológicas existentes na região dividem-se em (Marques *et al.*, 2007):

**1. Rochas cristalinas pré-câmbricas e hercínicas** – granitos, xistos e grauvaques. Os granitos incluem (ACavaco, 1991): (1) Granito porfíroide de grão grosseiro – o mais comum na região, com zonas de maior alteração, mais friáveis; (2) Granito não porfíroide, de grão médio ou fino a médio – o mais antigo e deformado. Aflora em faixas alongadas de direcções WNW-ESE ou NW-SE, com poucas dezenas de metros de largura, encaixadas nos granitos porfíroides.

**2. Cobertura sedimentar quaternária** – aluviões, depósitos de vertente e depósitos fluvio-glaciares (ex.: moreias, blocos erráticos). Os depósitos fluvio-glaciares são sedimentos de dimensões variáveis, predominando os elementos graníticos; têm uma grande variabilidade tanto granulométrica como no índice de rolamento dos elementos.

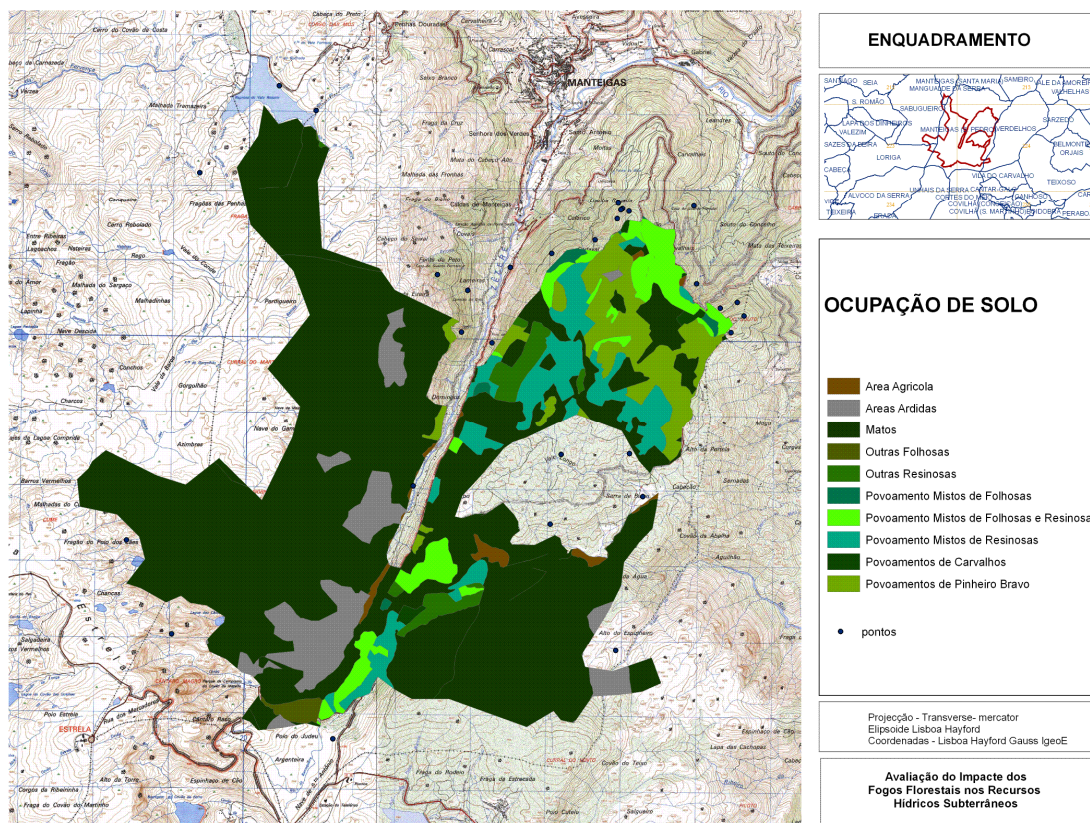


Fig. 1 – Ocupação vegetal da área ardida da bacia do Zêzere em 2005 (Tujeira *et al.*, 2007)

#### 4 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Em função das litologias e respectivos comportamentos hidráulicos, considerou-se que na zona ocorrem dois tipos de aquíferos:

**Aquíferos fracturados** – desenvolvidos nos granitos e rochas metassedimentares (xistos, grauvaques e metaconglomerados);

**Aquíferos porosos** – desenvolvidos nas formações de cobertura (aluviões, moreias e outros depósitos fluvio-glaciares).

Especialmente estes aquíferos estão distribuídos em 3 sistemas (Marques *et al.*, 2007) com características e padrões de circulação distintos:

**1. Superficial** – aquíferos livres, desenvolvidos nos depósitos de cobertura e são tipicamente aquíferos porosos. A sua espessura é relativamente pequena. Para os depósitos fluvio-glaciares admite-se um volume de armazenamento relativamente limitado. São contudo importantes porque se situam em áreas de possível recarga, por drenância, para o aquífero termal profundo e aquíferos sub-superficiais. A recarga é local e as suas águas, recentes, têm percursos de circulação subterrânea relativamente curtos.



**2. Sub-superficial** – aquíferos semi-confinados, pouco profundos, correspondendo no geral aos níveis produtivos associados a diaclases entre as profundidades de 20 a 40 m. A circulação ocorre nos granitos ao longo do sistema de fracturas sendo a sua circulação relativamente curta. Descarregam para o fundo do vale, parecendo fazer a ligação hidráulica entre este e as áreas planáticas de recarga.

**3. Profundo** – aquífero fissurado, desenvolvido em profundidade, cuja circulação se faz ao longo de fracturas profundas, pode atingir uma profundidade máxima de cerca 3,8 km. Dá origem às águas termais de Caldas de Manteigas. Estas águas têm tempos de residência da cerca 10 000 anos. Na zona de descarga (Caldas de Manteigas) as águas surgiam em nascentes à superfície do depósito fluvio-glaciar, sendo hoje captadas por furos (AC1, AC2 e AC3), cujas zonas preferenciais de escoamento se situam abaixo dos 40 m de profundidade. Estes furos podem captar várias zonas preferenciais de circulação, correspondentes a fracturas produtivas, separadas entre si por zonas improdutivas (Calado, 2001).

As zonas de recarga e de descarga destes aquíferos são (Marques *et al.*, 2007):

**1. Sistemas aquíferos superficial e sub-superficial:** (A) *RECARGA* – para o *sistema sub-superficial* ocorre nas áreas planáticas, embora pontualmente possa ocorrer nas vertentes do vale do Zêzere e seus tributários. O *sistema superficial* é recarregado por **drenância lateral** pelo sistema sub-superficial (ou seja em última instância tem áreas de recarga nos planaltos e vertentes) e por **infiltração directa** da precipitação nas formações aluvionares e fluvio-glaciares do fundo do vale. (B) *DESCARGA* – estes dois sistemas descarregam para o fundo do Zêzere e ao longo de nascentes nas vertentes; para os aquíferos superficiais nos planaltos as descargas ocorrem no fundo do vale da Candeeira e na Nave de Santo António (Marques *et al.*, 2007) e por drenância lateral para a cobertura de alteração das vertentes do Zêzere.

**2. Sistema aquífero profundo:** (A) *RECARGA* – ocorre nas zonas mais permeáveis do maciço, associadas às estruturas tectónicas, sendo: (a) sector NNE-SSW do vale do Zêzere, (b) portela da Nave de Santo António, (c) vales do Covão da Ametade e da Candeeira. Há ainda a considerar a hipótese de recarga a partir das falhas do fundo do vale do Zêzere, em ligação com o aquífero poroso superficial. (B) *DESCARGA* – na zona de Caldas de Manteigas, onde a fractura NNE-SSW (falha do Zêzere) se intersecta com fracturas conjugadas WNW-ESE, a que se associam fendas de tracção e contactos de faixas de granitos não porfiróides com o encaixante porfiróide.

A circulação subterrânea está esquematizada na Fig. 2. Admite-se que a infiltração ao longo das vertentes após o fogo possa ser diminuta e a entrada de poluentes para o meio subterrâneo se faça no fundo do vale, pela infiltração das águas de escorrência das vertentes e das águas entradas no planalto, que circulem ao longo da camada de alteração dos granitos. Nas vertentes o escoamento superficial será elevado, carreando rapidamente as cinzas e outros poluentes do fogo para o fundo do vale; no fundo do vale os poluentes entram na rede hídrica mas podem também entrar, por infiltração, no meio subterrâneo.

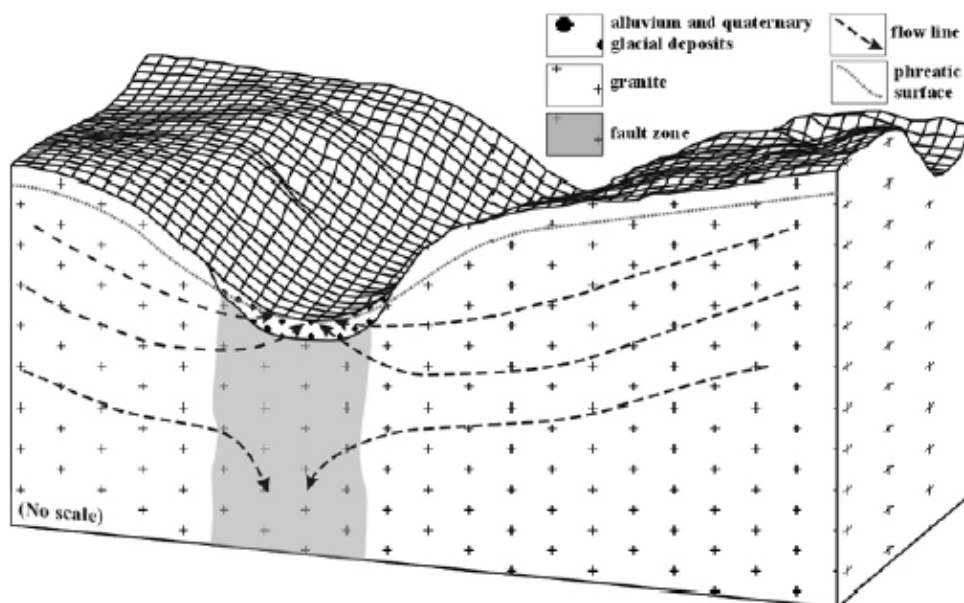


Fig. 2 – Esquema de circulação das águas ao longo dos três sistemas aquíferos (Espinha Marques *et al.*, 2006)

## 5 IMPACTOS QUALITATIVOS DOS FOGOS SOBRE O MEIO HÍDRICO SUBTERRÂNEO

### 5.1. Cobertura vegetal, densidade e biomassa ardida na área do vale do Zêzere e sua carga poluente

Para o cálculo da **massa de poluentes entrada no aquífero** é necessário conhecer: (1) os valores de área ardida por tipo de ocupação do solo e (2) a massa efectiva de material que ardeu, definida para cada tipo de vegetação (ou de partes específicas de vegetação ardida, como ramos, folhas, casca, etc.). Com base nesta massa ardida por tipo de vegetação e na carga poluente gerada por unidade de massa por tipo de vegetação, calcula-se a massa dos diferentes poluentes que entraram no aquífero e nos cursos de água. Os poluentes surgem em duas componentes: (1) **sólida** (cinzas, mais ou menos misturadas com solos alterados pelos fogos), (2) **líquida** (da lixiviação destes materiais sólidos).

A carga poluente das **águas de escoamento superficial** engloba os lixiviados das cinzas da biomassa vegetal + cinzas na fase sólida. Os lixiviados dos solos são ignorados pois estas águas não têm tempo de contacto suficientemente longo com os solos para provocarem a sua lixiviação. As águas de escorrência transportam também uma carga sólida poluente derivada da erosão dos solos mas esta não será considerada, por se desconhecer as taxas de erosão após o fogo. A carga poluente das **águas subterrâneas/fluxo hipodérmico** inclui os lixiviados das cinzas + lixiviados dos solos. Como não existem estudos dos lixiviados dos solos das áreas ardidas do Zêzere, consideraram-se apenas os lixiviados das cinzas da biomassa ardida que restam nos solos após a incorporação da carga poluente no escoamento superficial. Ignora-se qualquer carga poluente sólida porque se admite que o meio serve de filtro às partículas sólidas, pelo que a carga poluente é apenas a devida à dissolução (lixiviados).

No cálculo da carga poluente admitiram-se, para similares associações florísticas do vale do Zêzere, as relações definidas por Lopes *et al.* (2007, 2008a, 2008b) entre (1) biomassa ardida e

percentagem de cinzas produzidas, (2) concentrações de elementos maiores e metais pesados nas cinzas, (3) taxas de transferência dos poluentes das cinzas para os lixiviados das biomassas. Os valores de biomassa ardida foram definidos pela Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

## 5.2. Carga poluente gerada pelo fogo na área do vale do Zêzere, disponível para entrar no meio hídrico

A **carga poluente na fase sólida** disponível para entrar no meio hídrico, determinada a partir da massa de cinzas de biomassa ardida e das concentrações dos vários poluentes em cinzas de matos e pinheiros (cf., Lopes et al., 2007, 2008a, 2008b), apresenta-se no Quadro 2. A carga poluente das associações Arbustos I e Arbustos II é um valor aproximado, pois as proporções dos elementos maiores e metais pesados nas cinzas de alguns arbustos (género *Citrus*) não foram determinadas nos ensaios de queima. Embora estas associações vegetais representem a maior parte da área ardida, deve referir-se que algumas zonas ficaram sem caracterização de cinzas; assim, os valores apresentados devem considerar-se valores por defeito da carga poluente na área ardida. Correspondem também a uma carga média pois ao longo da área ardida terão existido diferentes densidades de vegetação (diferentes biomassas) produzindo diferentes massas de cinzas e respectivas cargas poluentes. Basta modificar a composição da vegetação e/ou a sua densidade de ocupação do solo (ou a intensidade do fogo) para que estas cargas poluentes se tornem diferentes.

Quadro 2 - Quantidades de elementos maiores e metais pesados presentes nas cinzas de biomassa ardida no vale do Zêzere

Elementos	Arbustos I		Arbustos II		Pinheiros	
	Concentração nas cinzas	Massa nas cinzas (em kg)	Concentração nas cinzas	Massa nas cinzas (em kg)	Concentração nas cinzas	Massa nas cinzas (em kg)
C	15,5 %	1 047 269	32,6 %	2 880 379	28,1 %	360 571
Al	2,32 %	156 753	0,78 %	68 917	0,84 %	10 779
Ca	9,62 %	649 982	4,94 %	436 475	8,15 %	104 579
Fe	1,08 %	72 971	0,35 %	30 924	0,23 %	2 951
K	1,77 %	119 591	7,98 %	705 074	9,04 %	115 999
Na	1,51 %	102 024	0,6 %	53 013	1,31 %	16 810
Mg	0,51 %	34 459	2,33 %	205 866	3,74 %	47 991
Cd	<5 mg/kg	<35	<5 mg/kg	<35	<5 mg/kg	<5
Cu	209 mg/kg	1 412	80 mg/kg	707	55 mg/kg	71
Cr	81 mg/kg	547	<10 mg/kg	<68	<10 mg/kg	<9
Ni	43 mg/kg	291	12 mg/kg	106	28 mg/kg	36
Pb	29 mg/kg	196	7 mg/kg	62	4 mg/kg	5
Zn	842 mg/kg	5 689	676 mg/kg	5 973	694 mg/kg	891
Mn	1454 mg/kg	9 824	4 225 mg/kg	37 330	3 000 mg/kg	3 850
<b>Total de cinzas (em % biomassa verde)</b>	1,3 %	6 756 572	1,7 %	8 835 515	1,8 %	1 283 171
<b>Biomassa ardida (kg)</b>	519 736 322			71 287 301		

Esta carga sólida está sujeita também a processos de dissolução e lixiviação. Com base nos potenciais de transferência entre cinzas e águas indicados em Lobo-Ferreira *et al.* (2009), para as associações vegetais e valores de biomassa ardida, a **carga poluente dissolvida** por massa total de cinzas, para uma taxa de produção de 10 L de lixiviados/kg de cinzas, para toda a área ardida (que inclui regiões não pertencentes à bacia do Zêzere), apresenta-se no Quadro 3.

Estes são valores globais disponíveis. Porém os valores que entram efectivamente no sistema hídrico podem diferir, em função das condições da sua incorporação no meio hídrico superficial e subterrâneo.

Quadro 3 – Carga poluente potencial em kg, transmissível à fase líquida considerando a lixiviação das cinzas da biomassa ardida para a totalidade da área ardida

Tipo de carga poluente	Arbustos I	Arbustos II	Pinheiros
	Massa nos lixiviados	Massa nos lixiviados	Massa nos lixiviados
Al	< 6,8	< 8,8	< 1,3
Ca	556,1	2027,8	310,8
Fe	< 6,8	< 8,8	< 1,3
K	68 038,7	586 413,3	87 550,8
Na	64 727,9	37 073,8	10 922,4
Mg	8,8	219,1	13,2
Cd	0 – 2,0	0 – 2,0	0 – 0,4
Cu	0 – 3,4	0 – 4,4	0 – 0,6
Cr	0 – 3,4	0 – 4,4	0 – 6
Ni	0 – 3,4	0 – 4,4	0 – 0,6
Pb	0 – 3,4	4,4	0 – 0,6
Zn	0 – 3,4	0 – 4,4	0 – 0,6
Mn	0 – 3,4	0 – 4,4	0 – 0,6
<b>Biomassa ardida (kg)</b>	519 736 322		71 287 301

\*os valores expressos em intervalo de massa assinalam os casos em que o contaminante ocorre nas cinzas mas surge em quantidades suficientemente baixas no lixiviado para poder estar abaixo dos limiares de detecção mas não é decisivamente assinalado com concentração nula.

### 5.3. Evolução temporal das cargas poluentes no meio hídrico superficial

As cargas poluentes, tanto em fase sólida como líquida, entram no meio hídrico em vários momentos pós-fogo e a cada novo evento de precipitação a quantidade de poluente disponível para entrar no meio hídrico diminui. A poluição tem assim uma **extensão temporal descontínua**, pois só entra no meio a cada episódio de precipitação suficientemente intenso para causar escoamento superficial e/ou recarga dos aquíferos. A poluição devida aos fogos é um fenómeno espacial e temporalmente alargado e descontínuo com variações das concentrações ao longo do tempo na fonte de poluição; ou seja há um **“decaimento temporal da poluição”**.

O primeiro evento de precipitação após o fogo, com capacidade para gerar escoamento superficial directo, transportará uma carga poluente que é uma fracção da *carga poluente disponível* e é função da intensidade da precipitação (para as mesmas condições pedológicas e topográficas, a intensidade da erosão depende da intensidade do evento de precipitação). Os eventos seguintes de precipitação, com intensidade suficiente para gerarem escoamento superficial, transportarão fracções da carga poluente disponível remanescente após o evento anterior. Para determinar a redução progressiva da carga poluente, é necessário conhecer: (1) *carga disponível de poluição* (carga sólida e lixiviados) pós-fogo e antes do primeiro evento de precipitação, (2) eventos de precipitação pós-fogo capazes de gerar escoamento superficial, (3) quantidade de precipitação em cada evento gerador de escoamento superficial,



(4) volumes de água precipitados nos planaltos e vertentes por cada evento de precipitação com capacidade de gerar escoamento superficial, (5) taxa de erosão (carga sólida transportada) por evento de precipitação, (6) massa de cinzas arrastadas em função desta taxa de erosão por evento de precipitação, (7) carga poluente associada a tal massa de cinzas.

Analisando os dados de campo relativos a alguns elementos poluentes, verificou-se que:

1. **No Zêzere** – para o  $C_{\text{orgânico}}$  e uma escala temporal de alguns dias o decréscimo das concentrações segue um comportamento exponencial negativo (Fig. 3).
2. **Em Penhascoso** – durante a época húmida, num intervalo de tempo de mais de 200 dias, a redução de concentrações segue um comportamento exponencial negativo para o cálcio (Fig. 4) e um comportamento linear para o potássio (Fig. 5). Há um aumento da concentração dos poluentes no final da época seca de 2007, o que pode indicar aumento da concentração dos elementos no solo, na época seca, por processos não associados aos fogos.

As observações de campo mostram que: (1) nas áreas ardidadas as concentrações destes elementos tendem a ser superiores às da área não ardidada, embora essa diferença se atenuie, especialmente para o potássio, em áreas ardidadas há mais de 3 anos; (2) os decréscimos de concentração ao longo do tempo tendem a seguir leis algo diferentes para os diferentes elementos; (3) excluindo a região do Zêzere que não foi amostrada neste período, em todas as áreas analisadas há uma subida das concentrações dos elementos no final de Setembro de 2007 (ex.: Fig. 6), com a excepção do potássio na área não ardidada, que se mantém constante ao longo de todo o período de amostragem. A diferença de comportamentos no decréscimo dos diferentes elementos pode dever-se às características destes, às características químicas do solo e do meio hídrico, às características topográficas da zona ardidada mas pode também ser devida a uma escassez de dados durante a época de decréscimo.

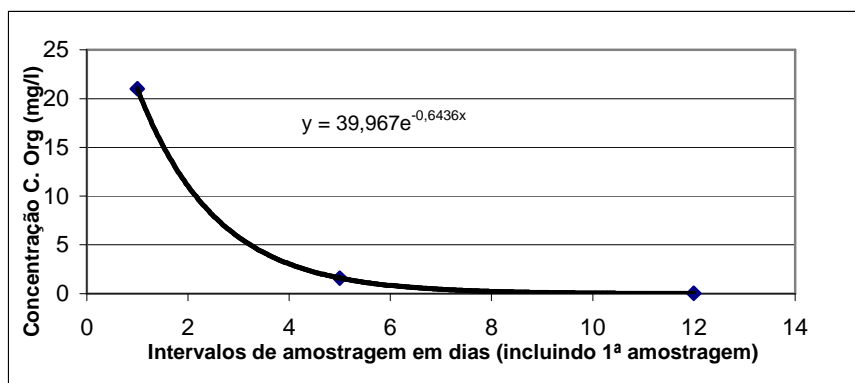


Fig. 3 – Evolução das concentrações de carbono orgânico no rio Zêzere após fogo 2005

#### 5.4. Evolução temporal das cargas poluentes no meio hídrico subterrâneo

O primeiro evento de precipitação após o fogo com capacidade para gerar recarga transportará uma carga poluente que é uma fracção da carga poluente disponível e dependerá da intensidade da precipitação e das condições de mobilidade dos poluentes no solo (o que por sua vez depende das condições químicas e biológicas desse solo e respectivo grau de alteração após o fogo). Os eventos seguintes de precipitação com intensidade suficiente para gerarem recarga transportarão fracções da carga poluente disponível remanescente no solo após o evento anterior. A chegada dos poluentes ao meio

subterrâneo saturado ocorrerá mais tarde, relativamente ao meio superficial, devido à maior lentidão dos processos de transporte no meio subterrâneo.

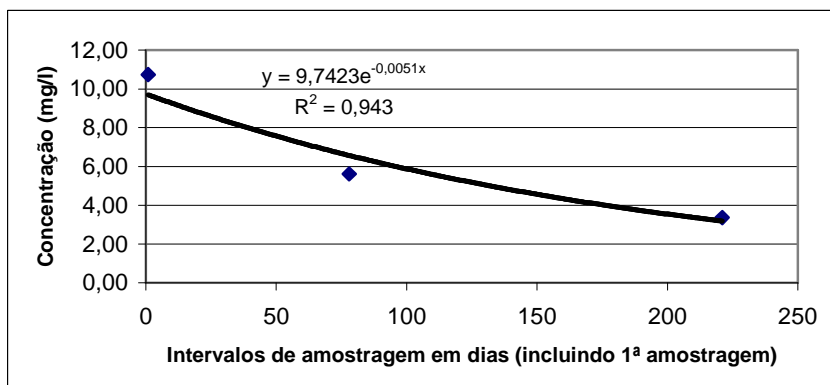


Fig. 4 – Evolução das concentrações de cálcio na ribeira da Barba Pouca (Penhascoso) após fogo 2006, antes da época seca de 2007

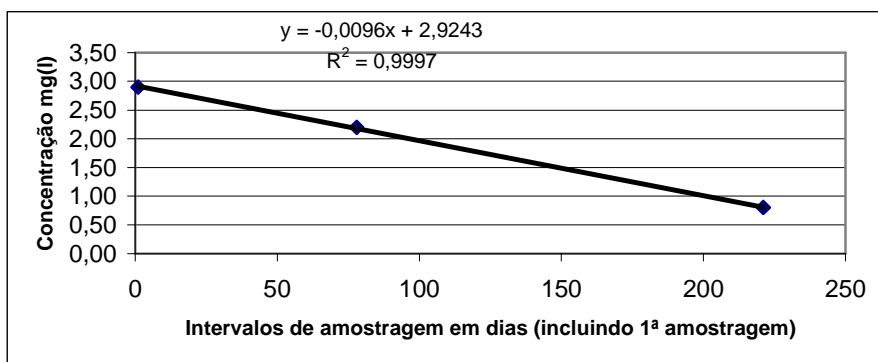


Fig. 5 – Evolução das concentrações de potássio na ribeira da Barba Pouca (Penhascoso) após fogo 2006, antes da época seca de 2007

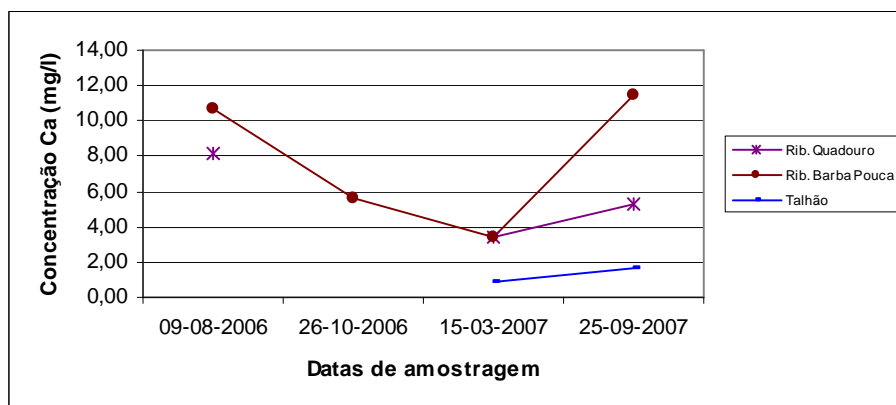


Fig. 6 – Evolução da concentração do cálcio nas águas superficiais em Penhascoso durante um ano após o fogo

Tal atraso temporal poderá levar a que, quando o meio superficial já tiver recuperado, o meio subterrâneo saturado possa estar a sofrer as primeiras chegadas de poluentes ou os picos de poluição,

dependendo da velocidade de transporte, muito em especial na zona não saturada. A metodologia para determinar a evolução temporal da contaminação no meio subterrâneo considera:

1. A redução da concentração dos poluentes à superfície do solo. Exige que se conheça: (1) *carga disponível de poluição* (lixiviados) para transporte pós-fogo e antes do primeiro evento de precipitação, (2) eventos de precipitação pós-fogo capazes de gerar infiltração (precipitação mínima a partir da qual há infiltração), (3) quantidade de precipitação em cada evento gerador de recarga, (4) volumes de água por cada evento de precipitação, (5) carga poluente arrastada por erosão devida ao escoamento superficial por evento de precipitação.
2. A evolução da concentração dos poluentes no meio subterrâneo saturado. Exige que se conheça: (1) velocidade de circulação no meio não saturado e saturado, (2) alteração da permeabilidade no meio não saturado após o fogo, (3) taxas de retenção dos poluentes na zona vadosa após o fogo, (4) distância da superfície do solo até à zona saturada.

Na análise da evolução da poluição no meio saturado os dados de campo indicaram:

1. **Quebrada** (área não ardida) – ocorre leve decréscimo das concentrações em Março de 2007 para todos os elementos, seguido de leve aumento na época seca. É uma variação mínima, podendo corresponder a oscilações naturais: na época húmida haverá diluição por efeito da recarga, no fim da época seca um aumento por processos de concentração dos elementos no meio subterrâneo.
2. **Penhascoso** – a evolução das concentrações varia consoante os elementos e difere do observado em Quebrada, revelando a influência do fogo nas águas subterrâneas no 1º ano pós-fogo. No poço 3 há indícios de que K estava já em fase de depuração, que se prolongou pelo menos até mais de 1 ano após o fogo (Fig. 7). No poço 5 o Mg regista uma subida, não tendo entrado em depuração. No poço 2 o comportamento do Mg, K e Ca sugere que em Outubro estavam em depuração (Figs. 7, 8 e 9).

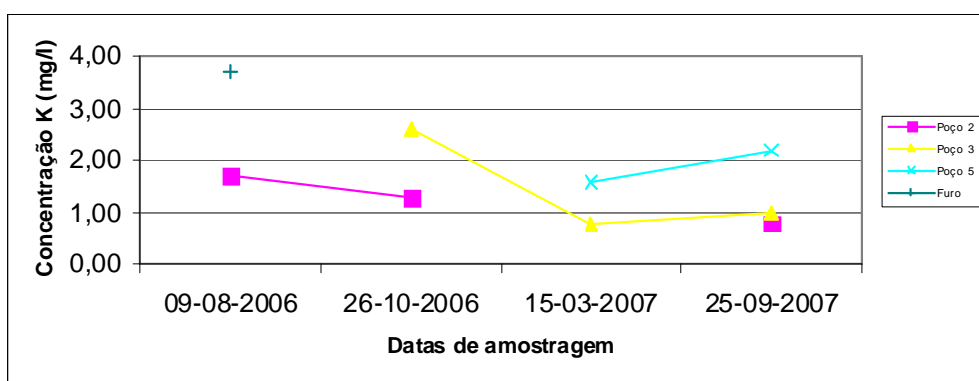


Fig. 7 – Evolução do potássio por pontos de água subterrânea após fogo 2006 na bacia de Penhascoso

Vê-se assim que o meio subterrâneo tem muito maior variabilidade de comportamentos do que o meio superficial e para um mesmo poluente a sua evolução no meio saturado poderá diferir de ponto para ponto da área ardida, em função das condições locais do meio.

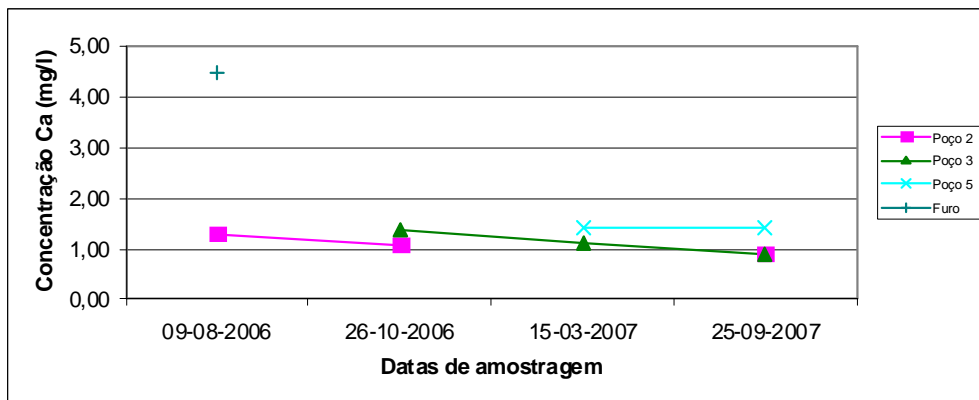


Fig. 8 – Evolução do cálcio por pontos de água subterrânea após fogo 2006 na bacia de Penhascoso

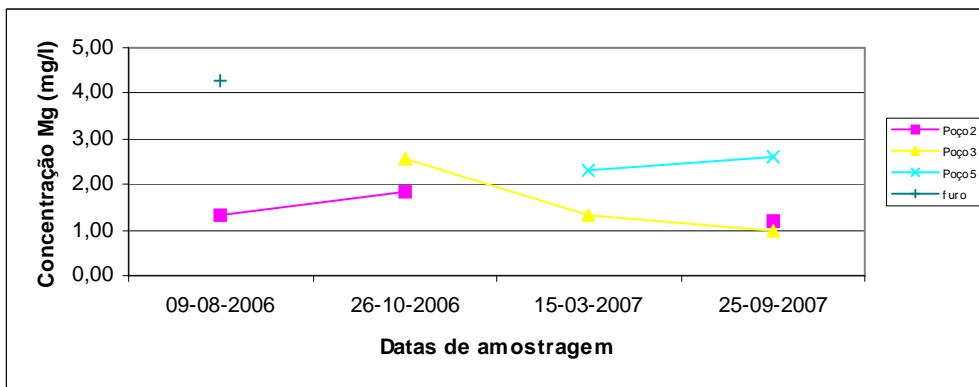


Fig. 9 – Evolução do magnésio por pontos de água subterrânea após fogo 2006 na bacia de Penhascoso

Se a entrada dos poluentes no meio saturado decorre em eventos instantâneos, cada um deles associado a um evento pontual de precipitação, então a evolução da concentração poderá considerar-se como a de sucessivas injeções instantâneas dum soluto. Se ocorrer um evento de precipitação (com transporte de poluentes) quando as concentrações de poluentes em circulação, devido ao episódio anterior, não tenham ainda desaparecido da zona de infiltração ou meio subterrâneo, ocorre uma sobreposição de efeitos de acumulação de concentrações. Há ainda a considerar, na avaliação da evolução temporal da contaminação, as concentrações no sistema antes do fogo, que se adicionam às concentrações variáveis que atingirão o meio ao longo do tempo. Também se deve contar com os processos de aumento de concentração (também registados nas áreas não ardidas), que parecem proceder de fenómenos naturais de aumento das concentrações nas épocas secas; haverá assim, sobreposto à contaminação por arraste de poluentes dos fogos, um efeito sazonal de aumento de concentração na época seca, e de diluição na época húmida. Tal como para o meio hídrico superficial, para uma melhor compreensão da evolução temporal da contaminação no meio saturado, tem de se monitorizar o sistema com registos o mais contínuos possível e num período alargado de tempo, a iniciar logo após o fogo e terminando quando o sistema atingiu condições de estabilidade. Se ocorrer novo fogo antes de se alcançar tais condições, a monitorização deverá prosseguir, para avaliar eventuais efeitos cumulativos de fogos sucessivos.

## 6 CONCLUSÕES E ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos para as cargas poluentes das águas superficiais e subterrâneas devem considerar-se apenas indicativos pois basearam-se num conjunto de pressupostos:

1. A percentagem de produção de cinzas, e as concentrações de elementos maiores e metais pesados nas cinzas é idêntica para as associações “Arbustos I”, “Arbustos II” e “Pinheiros” tanto na região do Zêzere como na área de Mação (região onde as cinzas destas associações foram caracterizadas por ensaios laboratoriais). No entanto a taxa de produção de cinzas pode ser um pouco distinta entre os fogos de Mação e do Zêzere, função da sua severidade e das condições do coberto vegetal.
2. Os potenciais de transferência de lixiviados das cinzas destas 3 associações vegetais são similares tanto na zona do Zêzere como na zona de Mação.
3. A associação vegetal “Matos” da bacia do Zêzere é representável pelas associações “Arbustos I” e “Arbustos II”. A realidade pode ser algo diferente porque no Zêzere ocorrem espécies (ex.: género *Cytisus*) cuja concentração de metais pesados e elementos maiores nas respectivas cinzas é desconhecida.

A **recarga pós-fogo**, para o conjunto de cenários LNEC (família de Cenários 3, com variação de evapotranspiração e escoamento superficial), varia de 4,8 a 8,9 hm<sup>3</sup>/ano para os granitos e 0,7 a 1 hm<sup>3</sup>/ano para os depósitos fluvio-glaciares. Comparando com os valores ante-fogo **a recarga decresce sempre, podendo nalguns casos o decréscimo ser muito significativo**. Noutros conjuntos de cenários, também usados neste estudo, há por vezes um aumento da recarga, o que indicia que a alteração da recarga depende dum equilíbrio subtil entre a proporção de precipitação que eficazmente entra no meio subterrâneo e a quantidade de água deslocada da evapotranspiração para o escoamento superficial e para a recarga. Este equilíbrio dependerá das condições hidrofóbicas nos solos e sua eficácia como barreira à entrada da água no solo; há condições para o aumento da recarga apenas se as condições de hidrofobia dos solos forem nulas ou muito fracas.

Os **volumes de armazenamento subterrâneo**, apenas determinados para os meios porosos superficiais (camada de alteração dos granitos e depósitos fluvio-glaciares), são da ordem dos 14,3 hm<sup>3</sup> **para os granitos** e de 4,7 a 28 hm<sup>3</sup> para os **depósitos fluvio-glaciares**, considerando-se o valor de 14 hm<sup>3</sup> como o mais representativo destes depósitos.

No meio subterrâneo, se se admitir a infiltração do poluente num único evento temporal pontual e para a *maior velocidade de circulação*, o **tempo de residência** desde o ponto de entrada até ao rio Zêzere, pode variar entre: (1) **181 dias** se esta ocorre na zona sul da bacia, **4,7 anos** se no bordo do planalto ocidental e **2,8 anos** se no bordo do planalto oriental; (2) **entre cerca de 3 a 6 meses** se no topo da vertente; (3) **8 dias** se na bordadura dos depósitos fluvio-glaciares. Para a *menor velocidade*, o tempo de residência pode variar entre: (1) **11 dias** para a bordadura do fluvio-glaciar; (2) **7 a 10 meses** para o topo das vertentes; (3) até **34 anos** para o planalto oriental e **64 anos** para o planalto ocidental.

Nas **cinzas**, o carbono é o elemento preponderante; seguem-se o cálcio e o potássio, e o magnésio, embora com concentrações significativamente menores, que variam consoante o tipo de vegetação; com a excepção do manganês e do zinco, os restantes metais pesados ocorrem em concentrações relativamente reduzidas. Nos **lixiviados** os metais pesados, ferro e alumínio tendem a surgir em concentrações muito



reduzidas; o potássio e sódio, com potenciais de transferência das cinzas para os lixiviados entre 57 e 83%, têm as maiores concentrações.

No **MEIO HÍDRICO SUBTERRÂNEO** a carga poluente é apenas constituída pelos *lixiviados*. Nestes, a única carga poluente significativa é a do sódio e potássio; os metais pesados quase não ocorrem. Se se considerar apenas as áreas dos planaltos (que não têm áreas de pinhais), a **carga poluente potencial** provém apenas das associações de matos e só o sódio e o potássio são os elementos com carga poluente significativa; em função dos cenários de retenção de cinzas nos solos, esta carga poluente é de 4 a 77 toneladas para o potássio, e 2,5 a 8,5 toneladas para o sódio (as cargas de cálcio variam entre 38 e cerca de 270 kg). Relacionando o total da massa poluente em kg para o total dos **lixiviados** gerados pelo total de massa de cinzas (planaltos + vertentes), para diferentes cenários de arraste de cinzas, as condições mais desfavoráveis de recarga (recarga mínima), obtém-se uma **carga poluente efectiva**, em mg/l. Esta carga poluente efectiva é baixa, sendo dominada pelo potássio e sódio; os metais pesados quase não contribuem para a contaminação. A real carga poluente será porém mais elevada, pois não se incluíram os lixiviados da restante biomassa nem os dos solos ardidos.

A **evolução temporal das concentrações de poluentes no meio hídrico superficial** mostra um muito rápido decréscimo, em particular para elementos de solubilidade baixa como o Mn. Esta rapidez de depuração parece directamente relacionada com a intensidade das chuvas, verificando-se se estas forem continuadas e de alguma intensidade. Admite-se que os **metais pesados de comportamento geoquímico similar ao manganês** são rapidamente removidos, tal como o carbono orgânico. Para os **elementos maiores**, no primeiro período húmido após o fogo há redução das concentrações, mas na época seca seguinte há aumento, mais acentuado nos pontos a jusante da área ardida; o decréscimo das concentrações em todos os elementos na época húmida indica que, num sistema afectado pelo fogo, as chuvas de Inverno são importantes factores de depuração do sistema. Este efeito depurativo é algo minorado pelo aumento das concentrações no final da época seca, sugerindo um período mais prolongado de depuração do sistema. A avaliação da evolução temporal das cargas poluentes transmitidas ao meio hídrico mostra que no cenário de menor remoção (Cenário D = 5%) e para o CARBONO, o sistema recupera ao fim de 3,5 a 4 anos. Para o MANGANÉS o cenário C = 25% de remoção indica recuperação em poucos meses após o fogo; no cenário D = 5% em cerca de 2 anos pós-fogo. Para o POTÁSSIO, no cenário D há recuperação em cerca de 3 anos pós-fogo. Assim, **a recuperação ocorre em tempo relativamente curto**, embora variável em função dos contaminantes, características da área ardida e regime temporal das chuvas.

A **evolução temporal das concentrações de poluentes no meio hídrico subterrâneo** mostra uma **maior variabilidade na evolução das concentrações** face ao meio hídrico superficial. Esta evolução pode para um mesmo elemento variar de local para local, sugerindo que as condições locais do meio subterrâneo são determinantes na evolução da depuração do sistema. O CÁLCIO sofre grandes reduções de concentração sugerindo ser muito rapidamente removido do sistema. O POTÁSSIO e o SÓDIO parecem ser removidos *relativamente depressa* e sofrem leve influência da diluição invernal. O MAGNÉSIO parece demonstrar um comportamento mais aleatório. Apesar de variar de local para local, e de elemento para elemento, os dados sugerem a **depuração relativamente rápida do sistema**. Segundo os dados de campo, o atraso da chegada da poluição ao meio subterrâneo tem tempos distintos de ponto para ponto e em consequência tempos de depuração distintos. A avaliação da evolução temporal da carga poluente transmitida a este meio hídrico mostra que, no cenário de menor remoção (Cenário D = 5%), para o SÓDIO e POTÁSSIO, o sistema recupera ao fim de cerca de 2 a 3,5 anos; para o cenário de remoção C = 25%, recupera em pouco menos de 1 ano após o fogo. Para o MANGANÉS o cenário C = 25% sugere o virtual

desaparecimento do sistema em poucos meses após o fogo e o cenário D = 5% cerca de 1 ano após o fogo.

Os tempos calculados atrás referem-se à eliminação no ponto de entrada dos lixiviados no meio subterrâneo. O **tempo total de perturbação do sistema** será o tempo de percurso desde a área de injeção até ao Zêzere + tempo de eliminação do poluente na área de injeção. Para o percurso mais extenso, a velocidade de percolação mais rápida e o poluente que mais tempo demora a desaparecer na área de injeção, o meio subterrâneo contribuir com uma poluição diferida para o meio hídrico superficial por um período entre **3 anos** (poluentes infiltrados no bordo do fluvio-glaciário) e **pelo menos 8 anos** (poluentes infiltrados no planalto); para velocidades de percolação mais lentas o período é de 3 e 66 anos. Estes períodos variam em função dos contaminantes e do regime temporal das chuvas. Outra forma de calcular o tempo de depuração/perturbação do sistema usa as recargas e volumes de armazenamento, e indica que demorará entre 4,2 anos e 7,7 anos até que o sistema seja integralmente preenchido com novas águas após o fogo.

## BIBLIOGRAFIA

ACAVACO (1991) – *Estudo e pesquisa hidrogeológica nas Termas de Manteigas*. Obra n.º 2283. Relatório Final, Lisboa, Maio, pp. 9.

CALADO, C. (2001) – *A ocorrência de água sulfúrea no Maciço Hespérico: quadro hidrogeológico e quimiogénese*. Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, especialidade Hidrogeologia. Lisboa, Julho, pp. 462.

ESPINHA MARQUES, J., MARQUES, J. M., CHAMINÉ, H. I., CARREIRA, P.M., FONSECA, P.E., SAMPER, J., PISANI, B., ALVARES, D., VIEIRA, G. T., MORA, C., TEIXEIRA, J., GOMES, A., CARVALHO, J. M., BORGES, F. S., ROCHA, F.T. (2006) – *A preliminary hydrogeologic conceptual model of the Manteigas – Nave de Santo António – Torre sector (Serra da Estrela Natural Park, Central Portugal)*. In Proceedings of the International Water Conference, IWC2006, Porto, Centro de Estudos de Águas/IDT-ISEP, pp. 179-190.

LOBO FERREIRA, J.P., NOVO, M.E., OLIVEIRA, M.M., LARANJEIRA, I., LEITÃO, T.E., HENRIQUES, M.J., MARTINHO, N., QUINTA-NOVA, L., FERNANDEZ, P., TOJEIRA, R., ROQUE, N., MESTRE, S., DIAS, S., LOPES, M.H., PARALTA, E., FREIRE, M., GALHETAS, M., GOMES, S., MATOS, C. (2009) - "Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos. Relatório Final de Execução Material". Relatório 351/2009-NAS, 555 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P.; OLIVEIRA M.M.; LARANJEIRA I.; LEITÃO T.E.; QUINTA-NOVA L.; FERNANDEZ P.; LOPES M.H.; PARALTA, E. (2007) – "Avaliação do impacte de fogos florestais em recursos hídricos subterrâneos". Comunicação apresentada no Seminário sobre Águas Subterrâneas, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, 1 e 2 de Março de 2007. <http://www.aprh.pt/1e20307/pdf/18.pdf>

LOPES, M. H., FREIRE, M., GOMES, S., GALHETAS (2008) – *Avaliação do impacte de fogos florestais nos recursos hídricos subterrâneos*. POCI/AGR/59180/2004, 3º Relatório de Progresso – Fevereiro de 2008, INETI.

LOPES, M. H., FREIRE, M., GOMES, S., GALHETAS (2008) – *Avaliação do impacte de fogos florestais nos recursos hídricos subterrâneos*. POCI/AGR/59180/2004, Relatório Final – Novembro de 2008, INETI.

LOPES, M. H., FREIRE, M., GOMES, S., GALHETAS, M., MATOS, C. (2007) – *Avaliação do impacto de fogos florestais nos recursos hídricos subterrâneos*. POCI/AGR/59180/2004, 2º Relatório de Progresso – Janeiro de 2007, INETI.

MARQUES, J. M., ARREIRA, P. M., ESPINHA MARQUES, J., CHAMINÉ, H. I., FONSECA, P. E., MONTEIRO SANTOS, F. A., ALMEIDA, E., GONÇALVES, R., MARTINS CARVALHO, J., ALMEIDA, P. G., TEIXEIRA, J. (2007) – *Tracing the dynamics of thermal waters using a multitechnique approach (Serra da Estrela, Central Portugal)*. Seminário sobre Águas Subterrâneas. APRH, Lisboa, 1 e 2 de Março de 2007, pp.14.

MARQUES, J. M., CARREIRA, P. M., ESPINHA MARQUES, J., CHAMINÉ, H. I., FONSECA, P. E., MONTEIRO SANTOS, F. A., ALMEIDA, E., GONÇALVES, R., PIERSZALIK, R., CARVALHO, J. M., ALMEIDA, P. G., CAVALEIRO, V., TEIXEIRA, J. (2006) – *A multitechnique approach to the dynamics of thermal waters ascribed to a granitic hard rock environment (Serra da Estrela, Central Portugal)*. In Extended Abstracts, Volume of the 4th Workshop on Hard Rock Hydrogeology of the Bohemian Massif, (eds. Chudy, K & Marszalek, H), Jugowice, SW Polónia, pp. 36-38.

MARTINHO, N., OLIVEIRA, M. M. (2008) – *POCI/AGR/59180/2004 – Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos: Estudo do impacto dos fogos florestais na parte quantitativa do ciclo hidrológico*. LNEC, Relatório LNEC 429/2008-NAS, pp. 138.

QUINTA-NOVA, L., FERNANDEZ, P., TUJEIRA, R., ROQUE, N., MESTRE, S., DIAS, S. (2008) – *Caracterização e Análise da Vegetação na Zona Envolvente à Área Árida do Vale do Rio Zêzere*. Relatório de Progresso Relativo ao ano de 2007 do Projecto Avaliação do Impacte dos Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos (POCI/AGR/59180/2004), Instituto Superior Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, Novembro de 2008.

TUJEIRA, R. QUINTA-NOVA, L., FERNANDEZ, P. (2007) – *Caracterização e análise do coberto vegetal lenhoso e o seu contributo para a produção de cinzas resultantes de incêndios florestais*. Workshop “Estratégias e Respostas para Minimizar o Efeito do Impacte dos Fogos Florestais na Quantidade e Qualidade da Água”. Dezembro, Lisboa, LNEC.