

Contaminação de água subterrânea por substâncias de limpeza da neve em estradas: o caso do sector de Nave de Santo António – Covão do Curral (Serra da Estrela, Centro de Portugal)

Groundwater contamination by road deicing chemicals: the case of Serra da Estrela (Central Portugal)

A. Carvalho^{1*}, J. Espinha Marques¹, J. M. Marques², P. M. Carreira³, R. Moura¹, A. Guerner Dias¹, H. I. Chaminé⁴, F. Rocha⁵, R. Saraiva⁶, M. Tavares⁶, C. Mansilha⁷

Recebido em 18/05/2011 / Aceite em 28/10/2011

Disponível online em Janeiro de 2012 / Publicado em Junho de 2012

© 2012 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

Artigo original
Original article

Resumo: Num momento em que a gestão sustentável dos recursos hídricos se assume como uma das maiores preocupações à escala mundial, as regiões de montanha têm vindo a ser reconhecidas como Reservatórios de Água (PROGRAMA UNESCO IHP-VI). O facto de muitas destas áreas se localizarem a altitudes elevadas e serem recortadas por rodovias obriga a frequentes operações de limpeza de neve, especialmente no inverno. A aplicação de substâncias químicas como cloreto de sódio e cloreto de cálcio na promoção da fusão do gelo e na limpeza da neve das estradas constitui um problema ambiental de elevado interesse científico, social e económico. Devido às suas características geológicas, geomorfológicas e climáticas, a Serra da Estrela é considerada estratégica para a gestão da água em Portugal. No presente trabalho apresentam-se alguns resultados hidrogeoquímicos que indicam que a utilização dos referidos sais na limpeza do gelo e da neve das rodovias contribui para a contaminação dos recursos hídricos.

Palavras-chave: água subterrânea, contaminação, substâncias químicas para limpeza da neve, preservação dos recursos hídricos, hidrologia de montanha.

Abstract: In the present moment, the sustainable water management is a major concern throughout the world. Mountain areas are more and more recognized as the world's water towers (UNESCO IHP-VI PROGRAMME). Since a large number of mountains are located at high altitude and are crossed by roads, deicing operations are inevitable. The use of deicing chemicals such as sodium chloride and calcium chloride to promote snow and ice melting in roads is an environmental problem of scientific, economic and social relevance. Due to its geological, geomorphological and climate characteristics, the Serra da Estrela mountain plays a strategic role in the water management in Portugal. This paper presents hydrogeochemical results that illustrate the process of groundwater contamination by road deicing salts in this mountain area.

Keywords: groundwater, contamination, deicing chemicals, water resources protection, mountain hydrology.

¹Centro de Geologia (CGUP), Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre, 687, 4169-007 Porto, Portugal.

²Centro de Petrologia e Geoquímica (CEPGIST), Instituto Superior Técnico (IST), Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal.

³Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN), Estrada Nacional nº 10, 2686-953 Sacavém, Portugal.

⁴Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP), Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto e Centro GEBIOTEC|UA, Portugal.

⁵Centro GEBIOTEC|UA e Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal.

⁶Estradas de Portugal, SA. Av. Dr. Francisco Sá Carneiro, 62, 6300-559 Guarda, Portugal.

⁷Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge, Rua Alexandre Herculano, 321, 4000-055 Porto, Portugal.

*Autor correspondente / Corresponding author: up030304002@alunos.fc.up.pt

1. Introdução

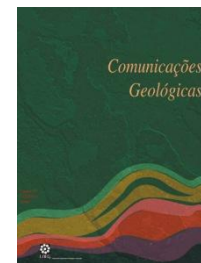
A qualidade dos recursos hídricos mundiais constitui uma das grandes preocupações da humanidade, uma vez que a contaminação tem tornado a manutenção da sustentabilidade das reservas de água potável um enorme desafio, sobretudo nas últimas décadas, Guo & Wang (2009).

As regiões de montanha são atualmente reconhecidas como áreas estratégicas, do ponto de vista sócio-económico, dado serem fonte de recursos hídricos de elevada qualidade e em apreciável quantidade para a população mundial. A sua importância, reconhecida pela UNESCO no International Hydrological Programme (IHP), tem reforçado a necessidade de preservação daqueles recursos (e.g., Aureli, 2002).

À escala global, estas regiões contribuem para uma melhor distribuição geográfica dos recursos hídricos, permitindo uma redistribuição do escoamento originado pela precipitação de inverno, que passa, em parte, a decorrer na primavera e no verão, reduzindo a variabilidade dos fluxos nas planícies adjacentes, e.g., Viviroli *et al.* (2003), Viviroli & Weingartner (2008). Assim, os recursos hídricos de montanha são indispensáveis para o abastecimento de água às populações, à agricultura e à indústria das áreas envolventes, e.g., Viviroli *et al.* (2010), Espinha Marques *et al.* (2011a,b). Uma vez que uma parte substancial da água potável disponível tem origem nas montanhas, a gestão ambiental dessas regiões tem-se revelado cada vez mais crucial, e.g., Viviroli & Weingartner (2008), Espinha Marques *et al.* (2009).

Atualmente, o problema da contaminação das águas subterrâneas apresenta-se como um dos temas de toxicologia ambiental que mais tem preocupado a comunidade científica e as autoridades governamentais, e.g. Ojeu (2006), Afonso *et al.* (2010). A utilização de sais, como o cloreto de sódio (NaCl) e o cloreto de cálcio (CaCl₂), na limpeza da neve e gelo nas rodovias, é uma prática comum em regiões afectadas pela precipitação em forma de neve. Esta utilização de sais representa uma potencial fonte de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais, e.g. Hawkins & Judd (1973), Epa (2002), Espinha Marques *et al.* (2005), Rodrigues *et al.* (2010).

Na região em estudo, o cume do maciço montanhoso da Serra da Estrela, a Torre, é um dos mais importantes pontos turísticos de Portugal. De acordo com o Turismo de Portugal (2011), o Pólo de Desenvolvimento Turístico da Serra da Estrela atingiu 416 000 dormidas em 2009. Uma vez que uma parte



substantial dos turistas não pernoita na região, estima-se que o número anual de visitantes seja bastante superior a 1 000 000. Destes, uma percentagem significativa corresponde ao turismo de inverno, incluindo o dos utilizadores das pistas de esqui existentes na Torre.

Dado que o acesso à zona mais elevada da Serra da Estrela é feito com recurso exclusivo a uma rodovia, é de extrema importância mantê-la transitável, tanto para os turistas como para os habitantes locais que necessitam dela para atravessar a serra diariamente. Assim, o presente estudo de hidrogeologia ambiental pretendeu avaliar o impacto da utilização de NaCl e CaCl₂ sobre a qualidade da água subterrânea.

As características geológicas, geomorfológicas e climatológicas desempenham um importante papel no funcionamento do ciclo da água na Serra da Estrela. Esta região montanhosa é origem de recursos hídricos estratégicos de elevada qualidade para Portugal, não só para o uso doméstico, mas também para a agricultura e para a indústria do engarrafamento, Espinha Marques *et al.* (2009). Neste sentido, importa averiguar se a qualidade destes recursos se encontra ameaçada pela limpeza das rodovias através da aplicação dos referidos sais (Fig.1).



Fig.1. Alguns aspectos da Serra da Estrela: (a) Nave de Santo António, em primeiro plano, e Cântaro Magro e encostas contíguas, ao fundo; (b) gelo na Torre; (c) medição de pH, condutividade eléctrica e temperatura da água.

Fig.1. Some views from Serra da Estrela: (a) Nave de Santo António, in first plan, and Cântaro Magro and contiguous slopes, in the background; (b) ice at Torre; (c) water pH, electric conductivity and temperature measurement.

2. Enquadramento hidrogeológico

Situada na zona Centro-Ibérica do Maciço Ibérico, a Serra da Estrela constitui o sector mais ocidental da Cordilheira Centro-Ibérica, e.g. Ribeiro (1954), Ribeiro *et al.* (1990). Este maciço montanhoso, situado entre a cidade da Guarda e a Serra da Lousã, corresponde a uma elevação com cerca de 115 km de comprimento e 25 km de largura, apresenta direcção NE-SW e altitude máxima de 1993 m na Torre.

As principais litologias que formam a Serra da Estrela são (Fig. 2): (i) Rochas graníticas de idade Varisca; (ii) Rochas metassedimentares de idade Precâmbrica-Câmbrica; (iii) depósitos aluvionares e glaciários do Quaternário, e.g. Teixeira *et al.* (1974), Ferreira e Vieira (1999). As megaestruturas regionais correspondem a zonas de falha profundas que tomam as designações, Falha de Bragança-Vilarica-Manteigas, de direcção NNE-SSW, e a Falha de Seia-Lousã, de direcção NE-SW (Ribeiro *et al.*, 1990).

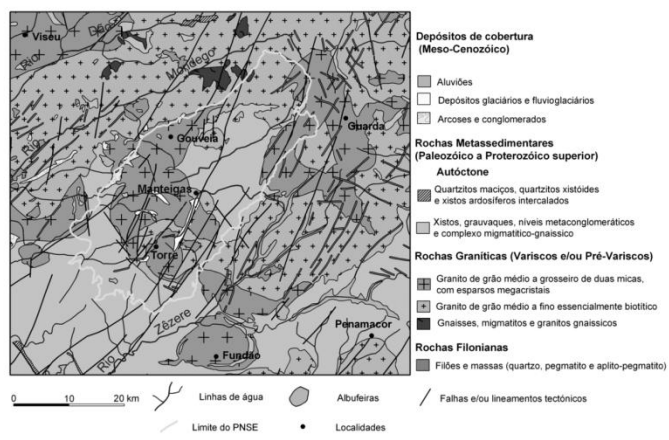


Fig.2. Mapa geológico da região da Serra da Estrela (adaptado da Carta Geológica de Portugal na escala 1/500 000, Oliveira *et al.*, 1992).

Fig.2. Geological map of Serra da Estrela region (adapted from the Geological Map of Portugal, scale 1/500 000, Oliveira *et al.*, 1992).

A Serra da Estrela apresenta um clima de influência Mediterrânea e Atlântica, com precipitação média anual a rondar os 2500 mm nas áreas mais elevadas, sendo controlado pela circulação de ar vinda predominantemente do Atlântico Norte e pela altitude, Daveau *et al.* (1997), Mora (2006). A temperatura média anual do ar pode atingir valores inferiores a 4°C na Torre e inferiores a 7°C nas regiões mais aplanadas, Vieira & Mora (1998).

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da Serra da Estrela é do tipo Csb, ou seja, de temperaturas amenas, com verões amenos e secos, e.g. Kottek *et al.* (2006), Peel *et al.* (2007). Para sul da região estudada o clima é do tipo Csa, o qual corresponde a temperaturas amenas, com verões quentes e secos. Consequentemente, esta classificação climática reforça a ideia de que o clima da Serra da Estrela não é tipicamente Mediterrâneo uma vez que se localiza numa região de transição entre a influência do Oceano Atlântico e a do Mar Mediterrâneo.

A geologia da Serra da Estrela é o principal elemento do sistema hidrogeológico regional, uma vez que condiciona algumas das suas principais características, tais como a infiltração e a recarga dos aquíferos, o tipo de meio de circulação (poroso vs. fissurado), os trajectos do fluxo subterrâneo ou a hidrogeoquímica, Espinha Marques (2007), Espinha Marques *et al.* (2011a). Devido ao predomínio de rochas graníticas e metassedimentares na região, a circulação de água subterrânea ocorre, principalmente, em meio fissurado e, em menor medida, em meio poroso.

A área em estudo estende-se desde a portela aplanada da Nave de Santo António, a cerca de 1400 m de altitude, passando pela Torre, até ao Covão do Curral situado, igualmente, a cerca de 1400 m de altitude (Fig. 3).

3. Contaminação da água subterrânea por NaCl e CaCl₂ no sector da nave de Santo António-Covão do Curral

A limpeza do gelo e neve das rodovias pode ser realizada através de processos mecânicos e/ou químicos. Existem diversas substâncias químicas — inorgânicas e orgânicas — que podem ser utilizadas nas operações de limpeza de neve, tais como o cloreto de sódio (NaCl), o cloreto de magnésio (MgCl₂), o cloreto de cálcio (CaCl₂), o cloreto de potássio (KCl), o acetato de

potássio ($K_2C_2H_3O_2$), o acetato de cálcio ($Ca(C_2H_3O_2)_2$) e magnésio $Mg(C_2H_3O_2)_2$, o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), o carbonato de magnésio ($MgCO_3$), o ácido acético (CH_3COOH), o propionato de cálcio ($Ca(CH_3CH_2COO)_2$) e magnésio ($Mg(CH_3CH_2COO)_2$), e o formato de potássio ($HCOOK$) — *e.g.* Trb (1991), Granato (1996), Epa (2002), Rasa *et al.* (2006).

A adição de substâncias químicas ao gelo e neve tem como intuito baixar o seu ponto de fusão facilitando, desta forma, a limpeza das rodovias tornando-a mais rápida, eficaz e económica. Em regiões em que a queda de neve influencia o dia-a-dia e perturba o normal funcionamento da economia, a utilização de cloreto de sódio é frequente, sobretudo devido à sua fácil aplicação e eficiência e ao seu baixo custo económico.

Deste modo, a prática de limpeza de neve e gelo apresenta potenciais consequências ambientais, nomeadamente, a contaminação da água subterrânea e superficial, a contaminação do solo e a degradação da flora situada nas bermas das estradas, *e.g.* Hawkins & Judd (1973), Trb (1991), Epa (2002), Godwin *et al.* (2003), Espinha Marques *et al.* (2005), Rodrigues *et al.* (2010). Uma vez que os sais utilizados são facilmente dissolvidos, a sua presença pode afectar a qualidade e sabor da água para consumo humano bem como tornar inabitáveis os ecossistemas de água doce para plantas e para animais. A acumulação dos sais nas bermas das estradas pode afectar o solo e a vegetação locais por contacto directo, *e.g.* Wtc (1997), Et (2010).

O problema da contaminação de água subterrânea na Serra da Estrela (sector de Manteigas-Nave de Santo António-Torre) por cloreto de sódio e, em menor medida, por cloreto de cálcio, tem sido alvo de estudos desde o início de 2003, *e.g.*, Espinha Marques *et al.* (2005, 2011a,b), Carreira *et al.* (2011). A partir de 2010, os estudos passaram a incidir sobre o sector da Nave de Santo António-Covão do Curral, tendo sido realizadas campanhas para amostragem de água subterrânea para análise química e monitorização, *in situ*, de parâmetros físico-químicos: temperatura, pH e condutividade eléctrica (CE).

A entidade Estradas de Portugal, SA, através do Centro de Limpeza de Neve, disponibiliza e organiza os meios mecânicos e humanos necessários para minimizar os efeitos sobre a circulação rodoviária resultantes da queda de neve e da formação de gelo que têm lugar, especialmente, no Outono e no Inverno, assegurando o acesso ao Maciço Central da Serra da Estrela em condições de segurança.

Para o efeito, são levadas a cabo, com o mesmo equipamento — o qual consta de um veículo especialmente apetrechado para o efeito — duas actividades distintas: a limpeza da neve e a prevenção da formação de gelo. Tal veículo é, habitualmente, designado por “limpa-neves” (Fig. 4), o qual consta de um camião ao qual é acoplado um espalhador de sais bem como uma lâmina do tipo “bulldozer”. Desta forma é possível efectuar, simultaneamente, a limpeza de neve e o espalhamento de sais.

A remoção da neve é efectuada através de passagens sucessivas do limpa-neves até se atingir a cota do pavimento. Em simultâneo efectua-se o espalhamento de sais, os quais baixam o ponto de fusão da neve, provocando a fusão da neve e gelo existente e prevenindo a formação de nova película de gelo na rodovia. A prevenção da formação de gelo é, também, efectuada espalhando previamente NaCl (sob forma de sal-gema) em locais pré-definidos, sendo o espalhamento efectuado normalmente ao final do dia e ao amanhecer.

Normalmente, a substância utilizada nestas operações é o cloreto de sódio; sob condições meteorológicas extremamente adversas, das quais resulta a formação de maiores quantidades de gelo, aplicam-se excepcionalmente pequenas quantidades de cloreto de cálcio. Para a execução destas actividades são

aplicadas no troço, com cerca de 16 km de extensão, entre a Nave de Santo António e o Covão do Curral cerca de 500 toneladas de sal-gema por ano.

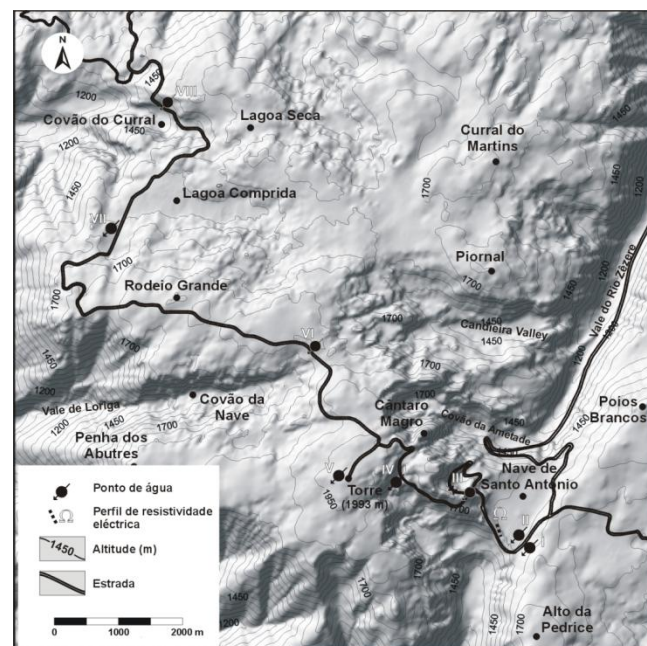


Fig.3. Relevo e rodovias do sector da Nave de Santo António-Covão do Curral.

(I - Fonte da Saibreira; II - Fonte da Nave de Santo António Sul; III - Fonte do Espinhaço de Cão; IV - Fonte do Covão do Boi; V - Mina da Torre; VI - Fonte dos Perús; VII - Nascente da Lagoa Comprida; VIII - Fonte do Covão do Curral).

Fig.3. Relief and roads from the Nave de Santo António-Covão do Curral sector.

(I - Saibreira Spring; II - Nave de Santo António Sul Spring; III - Espinhaço de Cão Spring; IV - Covão do Boi Spring; V - Torre Gallery; VI - Perús Spring; VII - Lagoa Comprida Spring; VIII - Covão do Curral Spring).



Fig.4. Veículos de limpeza de neve utilizados na Serra da Estrela (cortesia: Centro de Limpeza de Neve das Estradas de Portugal, SA).

Fig.4. Deicing vehicles used in Serra da Estrela (courtesy: Centro de Limpeza de Neve das Estradas de Portugal, SA).

Uma vez que a determinação da condutividade eléctrica permite identificar, rápida e economicamente, tendências regionais e potenciais anomalias no que respeita à mineralização da água, esta propriedade tem assumido um papel relevante no referido estudo, *e.g.* Espinha Marques *et al.* (2007, 2011a).

Considerando os valores medidos em Dezembro de 2010 (ver Tabela 1), é possível verificar que os valores de condutividade eléctrica das águas das nascentes nas imediações

do troço de estrada considerado variam entre 3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, na Fonte da Saibreira e na Fonte dos Perús, e 302 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na Mina da Torre. O valor médio de condutividade eléctrica registado foi de 89,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e o desvio padrão 123,44 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de onde resulta um coeficiente de variação de 138,3%, o que denota uma dispersão significativa de valores.

Particularmente ilustrativo do contraste entre nascentes com e sem indícios de contaminação é a comparação entre o valor medido na Fonte da Saibreira (3 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e o medido na Fonte da Nave de Santo António Sul (37 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Estas emergências distam entre si cerca de 50 m, situando-se a primeira cerca de 5 m a montante da estrada que bordeja a Nave de Santo António (Fig. 3) e a segunda a cerca de 35 m a jusante da referida via. A diferença de condutividade eléctrica, juntamente com teores relativamente elevados de Na e de Cl (Tabela 1), pode ser interpretada como indício de contaminação das águas subterrâneas amostradas na Fonte da Nave de Santo António Sul por NaCl proveniente da limpeza da neve.

Outros pontos de amostragem como a Fonte do Espinheiro de Cão, a Mina da Torre e a Nascente da Lagoa Comprida (Fig. 3) apresentam valores de condutividade eléctrica bastante elevados, quando comparados com os restantes: 302 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 265 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 86 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Uma vez que tais valores de condutividade eléctrica são acompanhados de teores elevados de Na^+ , Cl^- e Ca^{2+} (Tabela 1), podem ser igualmente interpretados como indicadores de contaminação das águas subterrâneas, pois situam-se a jusante de estradas frequentemente cobertas por neve e gelo os quais necessitam, recorrentemente, de ser removidos.

Relativamente aos resultados das análises químicas realizadas (Tabela 1), observando a projecção desses resultados nos diagramas hidrogeoquímicos das Figuras 5 e 6, verifica-se que predomina a fácies hidrogeoquímica cloretada-sódica. A Mina da Torre, no entanto, apresenta fácies cloretada-cálcica. Tal como foi notado anteriormente, estas fácies estão, invariavelmente, associadas a concentrações relativamente elevadas de Na^+ , Cl^- e Ca^{2+} em todos os casos em que a emergência se situa a jusante de estradas, evidenciando contaminação da água subterrânea como consequência da aplicação de NaCl e, em menor medida, CaCl_2 .

Tabela 1. Resultados físico-químicos da campanha de Dezembro de 2010.

Table 1. Physico-chemical results from the December 2010 campaign.

Ponto de água	T (°C)	pH	Cond. eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Localização*	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Fonte da Saibreira	7,7	5,49	3	5 m a montante	2,2	0,8	1,2	0,4	2	3,3	0	3,2	7
Fonte da Nave de Santo António Sul	8,2	5,80	37	35 m a jusante	8,2	0,7	0,8	0,3	4	3,1	0	12,8	7,4
Fonte do Espinheiro de Cão	6,0	5,86	265	50 m a jusante	26	1,1	18	2,3	5	3,4	0	82	16,8
Fonte do Covão do Boi	5,3	5,85	6	10 m a montante	2,3	0,8	1,2	0,3	5	6,1	0	3,7	9,2
Mina da Torre	3,1	6,42	302	40 m a jusante	94	1,5	94	1,4	19	7,7	0	172	5,4
Fonte dos Perús	7,0	5,29	3	4 m a montante	1,6	0,7	0,4	0,3	2	3,4	0	2,8	4,3
Nascente da Lagoa Comprida	6,3	5,25	86	10 m a jusante	14,8	0,8	1,8	0,5	2	4,1	0	26,2	4,5
Fonte do Covão do Curral	6,1	6,02	12	1 m a montante	2	0,8	1,2	0,4	3	4,7	0	3,9	7

O gráfico da Figura 7 mostra a relação existente entre os teores de sódio e de cloreto das águas subterrâneas analisadas (n=8). Mediante a observação do gráfico da Figura 7 e da análise da Tabela 2 é possível verificar que a dispersão dos valores representados é reduzida, da qual resulta um valor de R² de 0,96 e uma correlação de 0,98. De referir que parte significativa das águas amostradas se encontra projectada muito próxima da

origem dos eixos, função da sua baixa concentração em Cl e Na. No caso da água proveniente da nascente do Espinheiro de Cão, o teor em Cl parece indicar uma fonte adicional para o Cl (para além do NaCl utilizado no degelo) que importa investigar em trabalhos futuros.

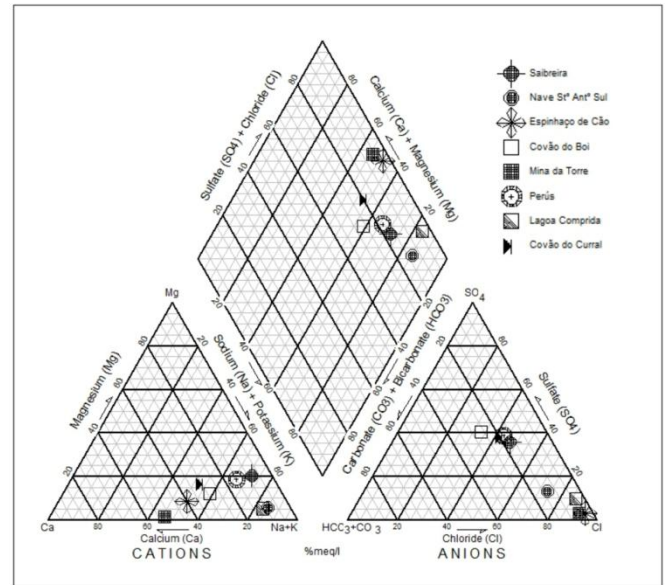


Fig.5. Diagrama de Piper para as águas subterrâneas amostradas no decorrer da campanha de Dezembro de 2010.

Fig.5. Piper diagram for groundwaters sampled during the December 2010 campaign.

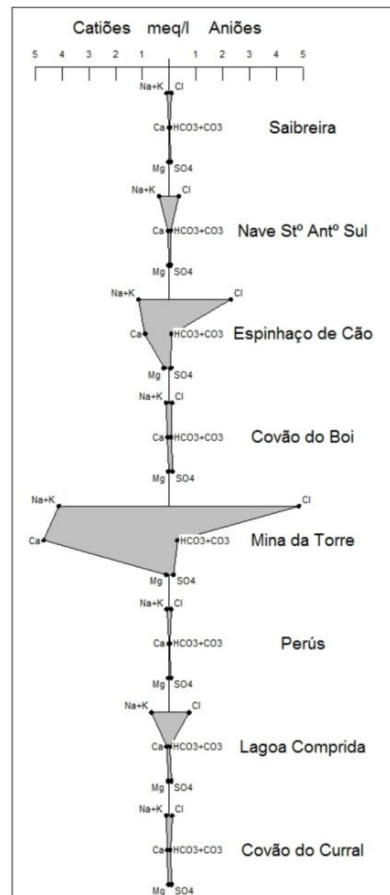


Fig.6. Diagrama de Stiff para as águas subterrâneas amostradas no decorrer da campanha de Dezembro de 2010.

Fig.6. Stiff diagram for groundwaters sampled during the December 2010 campaign.

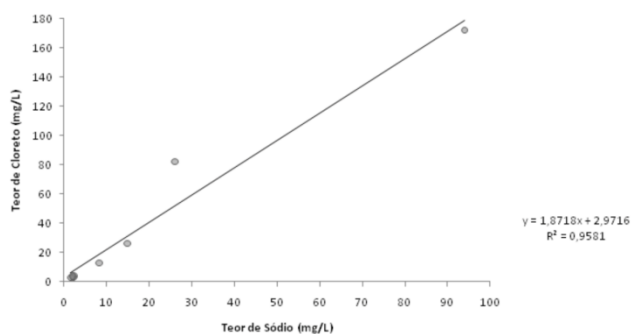


Fig.7. Relação entre o teor de sódio e o teor de cloreto, para as águas subterrâneas amostradas no decorrer da campanha de Dezembro de 2010.

Fig.7. Relation between sodium and chloride contents for groundwaters sampled during the December 2010 campaign.

No que respeita à relação entre o valor de condutividade eléctrica e o teor de cloreto (Fig. 8 e Tabela 2) a relação entre as variáveis apresenta características análogas ao caso anterior, com R^2 de 0,89 e correlação de 0,94, embora a dispersão dos valores representados seja mais significativa.

A análise da Tabela 2 permite destacar outras correlações ilustrativas da contaminação da água subterrânea por sais de limpeza de neve: CE-Na (0,86), CE-Ca (0,81), CE-Cl (0,94). Outras correlações elevadas resultam de processos hidrogeoquímicos naturais, em particular da hidrólise das plagioclases e do feldspato potássico das rochas granitoides: Na-HCO₃ (0,96), Ca-HCO₃ (0,98), K-HCO₃ (0,92), respectivamente. Correlações como K-Ca (0,95) e K-Cl (0,98) poderão eventualmente estar associadas a processos de origem antrópica que interessa confirmar em campanhas futuras.

Tabela 2. Matriz de correlação relativa aos resultados analíticos da campanha de Dezembro de 2010.

Table 2. Correlation matrix from the analysis of the December 2010 campaign.

	Cond. eléctrica (µS/cm)	pH	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
Cond. eléctrica (µS/cm)	1								
pH	0,57	1							
Na ⁺ (mg/L)	0,86	0,68	1						
K ⁺ (mg/L)	0,92	0,73	0,96	1					
Ca ²⁺ (mg/L)	0,81	0,72	0,99	0,95	1				
Mg ²⁺ (mg/L)	0,90	0,43	0,57	0,73	0,53	1			
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	0,75	0,80	0,96	0,92	0,98	0,46	1		
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	0,43	0,71	0,71	0,70	0,76	0,15	0,82	1	
Cl ⁻ (mg/L)	0,94	0,68	0,98	0,98	0,96	0,73	0,92	0,63	1

Em Junho de 2010 efectuou-se um perfil de resistividade eléctrica na Nave de Santo António localizado a cerca de 35 m a jusante da estrada (Fig. 3). O resultado obtido (Fig. 9) permite verificar de que forma a diferença dos valores de resistividade obtidos está relacionada com a proximidade à referida via e, assim, identificar e delimitar uma eventual pluma de contaminação proveniente da mesma.

Conforme se pode verificar na tomografia eléctrica (Fig. 9), obtiveram-se assimetrias na distribuição dos valores de resistividade sendo inferiores para norte, sensivelmente a 145 m, atingindo valores abaixo de 900 Ωm logo abaixo de 5 m de profundidade. Os valores registados são claramente inferiores aos valores obtidos em

perfis de resistividade efectuados em locais da Nave de Santo António mais afastados da estrada, Espinha Marques (2007), Espinha Marques *et al.* (2011a). Desta forma, pode-se inferir que a baixa resistividade registada pode ser consequência da existência de uma pluma de contaminação da água subterrânea proveniente da utilização de sais na limpeza da rodovia.

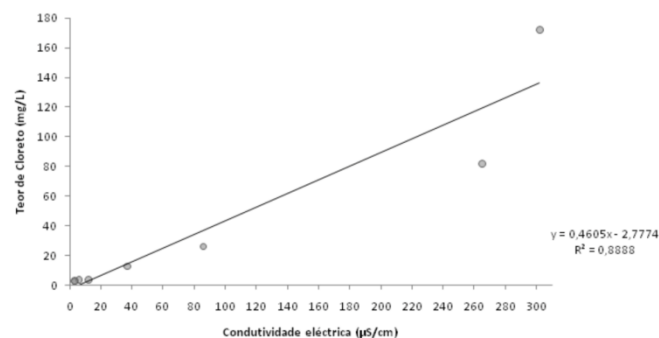


Fig.8. Relação entre a condutividade eléctrica e o teor de cloreto, para as águas subterrâneas amostradas no decorrer da campanha de Dezembro de 2010.

Fig.8. Relation between electric conductivity and chloride contents for groundwaters sampled during the December 2010 campaign.

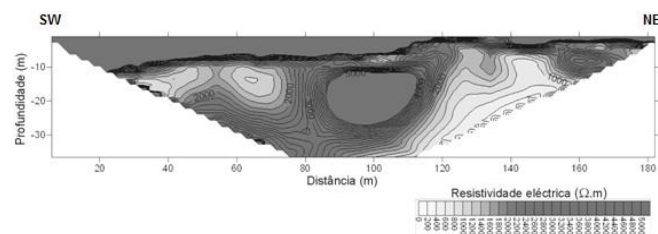


Fig.9. Perfil de resistividade eléctrica.

Fig.9. Electrical resistivity profile.

Na actual fase do estudo, é possível esboçar um modelo conceptual preliminar do processo de contaminação da água subterrânea pelas substâncias de limpeza da neve nas estradas (Fig. 10). Nas faixas adjacentes às bermas, normalmente com largura até 5 m, ocorre a influência dos sais introduzidos antropicamente, os quais induzem a fusão do manto de neve. Deste modo, nas encostas ao longo das estradas promove-se a infiltração da água proveniente da fusão da neve a qual pode estar contaminada (na faixa adjacente à estrada) ou não contaminada (nas áreas mais afastadas). Dada a natureza impermeável do piso da estrada não é de esperar infiltração significativa sob o mesmo.

Daqui resulta que a água contaminada entra na zona não saturada a montante e a jusante da estrada (a qual se comporta como fonte de contaminação linear), passando a circular, aproximadamente, na vertical (salvo quando houver condições favoráveis à ocorrência de fluxo hipodérmico). Ao entrar no aquífero livre, esta água dá origem a uma pluma de contaminação (Fig. 10) a qual, devido ao sentido do fluxo subterrâneo, se estende para jusante.

Finalmente, parte da água contaminada circula, rapidamente, até à superfície, emergindo em nascentes ou sob o leito de linhas de água, enquanto a restante sofre circulação mais lenta, atingindo zonas mais profundas do sistema aquífero. É, igualmente, de esperar que, à medida que a água contaminada se afasta da origem da contaminação, a concentração de NaCl e CaCl₂ diminua por diluição.

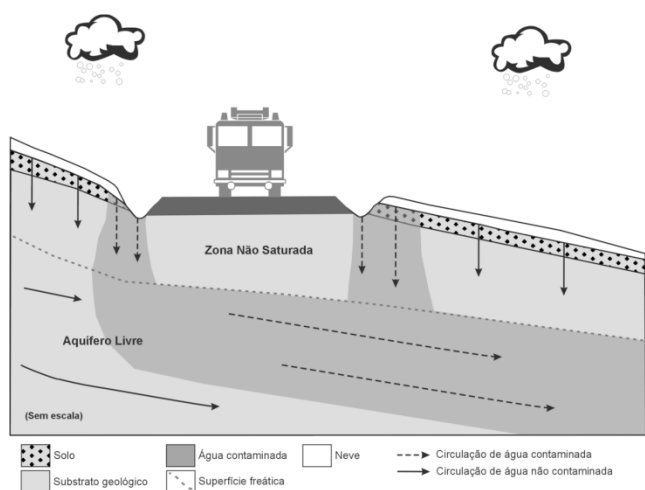


Fig.10. Modelo conceptual preliminar do processo de contaminação da água subterrânea por substâncias de limpeza da neve em estradas na Serra da Estrela.

Fig.10. Preliminary conceptual model of the groundwater contamination process by road deicing chemicals in Serra da Estrela.

4. Considerações finais e perspectivas futuras

Cientes da importância que as regiões de montanha apresentam, actualmente, como origem de recursos hídricos de qualidade e em quantidade para as povoações e ecossistemas, o presente estudo pretende contribuir para a compreensão dos processos ligados à sua contaminação e para a promoção de uma gestão ambientalmente sustentável deste recurso.

Em Portugal, a Serra da Estrela apresenta-se como um reservatório natural de água de boa qualidade e de extrema importância socioeconómica. A realização do presente estudo, no Sector Nave de Santo António – Covão do Curral, mostrou evidências da potencial contaminação dos recursos hídricos por NaCl e CaCl₂ utilizados para a limpeza das rodovias.

A classificação da fácies hidrogeoquímica das águas subterrâneas analisadas como cloretada-sódica e cloretada-cálcica, a elevada mineralização e os valores relativamente elevados de condutividade eléctrica registados em alguns pontos da rede de amostragem indiciam a contaminação de algumas águas subterrâneas da região em estudo devido à prática utilizada para a remoção da neve e gelo das estradas. Os resultados de estudos geofísicos de resistividade eléctrica corroboram igualmente a potencial contaminação da água subterrânea.

De referir no entanto que, parte das águas subterrâneas analisadas apresentam fácies cloretada-sódica, dado tratar-se de águas meteóricas de circulação pouco profunda, apresentando fraca mineralização e amostradas em locais situados fora dos potenciais pontos de remoção da neve e gelo com a ajuda da utilização de NaCl e CaCl₂.

De salientar que a nova Directiva das Águas Subterrâneas — The New Groundwater Directive, EUROPEAN COMMISSION (2008) — estabelece um regime que define os padrões de qualidade das águas subterrâneas e apresenta medidas para evitar ou limitar a introdução de contaminantes e/ou poluentes nas águas subterrâneas. A directiva estabelece igualmente critérios de qualidade que levem em conta as características locais e permitam melhorias a serem feitas com base em dados de monitorização e novos conhecimentos científicos.

Deste modo, com o objectivo de obter mais dados acerca da potencial contaminação dos recursos hídricos e de conhecer a sua extensão e distribuição espacial, estão previstos novos estudos geoquímicos das águas subterrâneas e a análise das águas

superficiais, bem como estudos geológico-estruturais, hidrogeomecânicos e hidrogeofísicos do maciço rochoso em sectores-chave. Está, também, prevista a colocação, em locais estratégicos, de piezómetros equipados com sensores de condutividade eléctrica destinados a realizar a monitorização em contínuo dos processos de contaminação da água subterrânea pelos sais de limpeza da neve, bem como a compreender a atenuação natural resultante de posteriores episódios de precipitação.

Agradecimentos

Este estudo foi suportado pelo Centro de Geologia da Universidade do Porto, no âmbito da linha de I&D “Environment and Society” e pelo Centro de Petrologia e Geoquímica do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, no âmbito da linha de I&D “Waterprotect”. Enquadra-se ainda no PEst-C/CTE/UI4035/2011 (PEst-UI 4035-2011/2012) do Centro GEOBIOTEC|UA.

Referências

- Afonso M.J., Chaminé H.I., Marques J.M., Carreira P.M., Guimarães L., Guilhermino L., Gomes A., Fonseca P.E., Pires A., Rocha F., 2010. Environmental issues in urban groundwater systems: a multidisciplinary study of the Paranhos and Salgueiros spring waters, Porto (NW Portugal). *Environmental Earth Sciences*, **61**, 2, 379-392.
- Aureli A., 2002. What's a head in UNESCO's International Hydrological Programme (IHP VI 2002-2007). *Hydrogeology Journal*, **10**, 3, 349-350.
- Carreira P.M., Marques J.M., Espinha Marques J., Chaminé H.I., Fonseca P.E., Monteiro Santos F., Moura R.M., Carvalho J.M., 2011. Defining the dynamics of groundwater in Serra da Estrela Mountain area, central Portugal: an isotopic and hydrogeochemical approach. *Hydrogeology Journal*, **19**, 1, 117-131.
- Carvalho A., Espinha Marques J., Marques J.M., Carreira P.M., Mansilha C., 2011. Índices de contaminação de água subterrânea por NaCl e CaCl₂ na Região da Serra da Estrela. *Seminário sobre Águas Subterrâneas*, APRH/FLUP, Lisboa.
- Daveau S., Ferreira A.B., Ferreira N., Vieira G., 1997. Novas observações sobre a glaciação da Serra da Estrela. *Estudos do Quaternário*, Lisboa, **1**, 41-51.
- EPA [U.S. Environmental Protection Agency], 2002. Managing highway deicing to prevent contamination of drinking water. *Source Water Protection Practices Bulletin*. EPA 816-F-02-019.
- Espinha Marques J., Marques J.M., Chaminé H.I., Afonso M.J., Carreira P.M., Fonseca P.E., Cabral J., Monteiro Santos F.A., Vieira G.T., Mora C., Gomes A., Teixeira J., Samper J., Pisani B.J., Aguiar C., Gonçalves J.A., Almeida P.G., Cavaleiro V., Carvalho J.M., Borges F.S., Aires-Barros L., Rocha F., 2005. Hydrogeological study of a high mountain area (Serra da Estrela, Central Portugal): a multidisciplinary approach. *Cadernos Labor. Xeol. Laxe*, A Coruña, **30**, 145-166.
- Espinha Marques J., 2007. Contribuição para o conhecimento da hidrogeologia da região do Parque Natural da Serra da Estrela (Sector de Manteigas – Nave de Santo António – Torre). *Tese de Doutoramento não publicada*, Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, 466.
- Espinha Marques J., Marques J.M., Aguiar, C., 2009. A groundwater system in a mountain environment (Serra da Estrela, Portugal). In: Evelpidou N., Figueiredo T., Mauro F., Vahap A. & Vassilopoulos A. (Eds). *Natural Heritage in Europe from East to West*. Springer-Verlag, 163-167.
- Espinha Marques J., Samper J., Pisani B., Alvares D., Carvalho J.M., Chaminé H.I., Marques J.M., Vieira G.T., Mora C., Borges F.S., 2011a. Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, Central Portugal, using a semi-distributed hydrological model. *Environmental Earth Sciences*, **62**, 6, 1219-1234.
- Espinha Marques J., Carvalho A., Marques J. M., Chaminé H. I., Guerner A., Moura R., Carreira P., Neves O., Samper J., Rocha F., 2011b. Methodology for assessing the impact of the use of road salt on groundwater resources in a mountain environment (Serra da Estrela, Central Portugal). *Cadernos Lab. Xeol. Laxe*, A Coruña, **36**, 79-98.

- ET [Earth Talk], 2010. What are the environmental impacts of all the de-icing and snow removal? Earth Talk from the Editors of: *The Environmental Magazine*. Westport.
- European Commission, 2008. Groundwater Protection in Europe: the new groundwater directive, consolidating the EU regulatory framework. European Commission, *Directorate-General for the Environment*, 35.
- Ferreira N. & Vieira G., 1999. Guia geológico e geomorfológico do Parque Natural da Serra da Estrela. Locais de interesse geológico e geomorfológico. Parque Natural da Serra da Estrela. *Instituto da Conservação da Natureza / Instituto Geológico e Mineiro*, Lisboa, 112.
- Godwin K.S., Hafner S.D., Buff M.F., 2003. Long-term trends in sodium and chloride in the Mohawk River, New York: the effect of fifty years of road-salt application. *Environmental Pollution*, **124**, 2, 273-281.
- Granato G.E., 1996. Deicing chemicals as source of constituents of highway runoff. *Transportation Research Record*, **1533**, 50-58.
- Guo Q. & Wang Y., 2009. Trace Element Hydrochemistry Indicating Water Contamination in an Around the Yangbajing Geothermal Field, Tibet, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **83**, 608-613.
- Hawkins R.H. & Judd J.H., 1973. Water pollution as affected by street salting. *Journal of the American Water Resources Association*, **8**, 6, 1246-1252.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification Update. *Meteorologische Zeitschrift*, **15**, 3, 259-263.
- Mora C., 2006. Climas da Serra da Estrela, características regionais e particularidades locais dos Planaltos e do Alto Vale do Zêzere. Tese de Doutoramento não publicada. Universidade de Lisboa, Lisboa, 472.
- OJEU [Official Journal of the European Union], 2006. Directive 2006/118/EC of the European parliament and the council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration. *Official Journal of the European Union*, L 372/19-L 372/31.
- Oliveira J.T., Pereira E., Ramalho M., Antunes M.T., Monteiro J.H., 1992. Carta Geológica de Portugal à escala 1/500 000. 5ª Ed., 2 folhas. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, **11**, 1633-1644.
- Rasa K., Peltovuoria T., Hartikainen H., 2006. Effects of de-icing chemicals sodium chloride and potassium formate on cadmium solubility in a coarse mineral soil. *Science of the Total Environment*, **2-3**, 819-825.
- Ribeiro O., 1954. Estrutura e relevo da Serra da Estrela. *Bol. Real. Soc. Esp. Hist. Natur.*, Madrid, Tomo de Homenaje a E.Hernández-Pacheco, 549-566.
- Ribeiro A., Kullberg M.C., Kullberg J.C., Manuppella G., Phipps S., 1990. A review of Alpine tectonics in Portugal: foreland detachment in basement and cover rocks. *Tectonophysics*, **184**, 3/4, 357-366.
- Rodrigues P., Rodrigues R., Costa B., Martins A.T., Esteves da Silva J., 2010. Multivariate analysis of the water quality variation in Serra da Estrela (Portugal) Natural Park as a consequence of road deicing with salt. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **102**, 2, 130-135.
- Teixeira C., Santos J.P., Carvalho H.F., Fernandes A.P., Vairinho M.M., 1974. Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. Notícia Explicativa da folha 20-B – Covilhã. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 52.
- TRB [Transportation Research Board], 1991. Highway deicing, comparing salt and calcium magnesium acetate. *Special Report* **235**, 163.
- Turismo de Portugal, 2011. O turismo em 2009. Direcção de Estudos e Planeamento Estratégico/ Departamento de Informação Estatística, 159.
- Vieira G.T. & Mora C., 1998. General characteristics of the climate of the Serra da Estrela. In: G.T. Vieira, Ed., *Glaciar Periglacial Geomorphology of the Serra da Estrela*. Guidebook for the field-trip, IGU Commission on Climate Change and Periglacial Environments, 26-28 August 1998, CEG and Department of Geology, University of Lisbon, 26-36.
- Viviroli D., Weingartner R., Messerli B., 2003. Assessing the hydrological significance of the world's mountains. *Mountain Research and Development*, **23**, 32-40.
- Viviroli D. & Weingartner R., 2008. "Water towers": a global view of the hydrological importance of mountains. In: E. Wiegandt (Ed.) *Mountains: Sources of Water, Sources of Knowledge*. Advances in Global Change Research, **31**, 15-20.
- Viviroli D., Archer D.R., Buytaert W., Fowler H.J., Greenwood G.B., Hamlet A.F., Huang Y., Koboltchnig G., Litaor M.I., López-Moreno J.I., Lorentz S., Schädler B., Schwaiger K., Vuille M., Woods R., 2010. Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and politics. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, **7**, 2829-2895.
- WTC [Wisconsin Transportation Center], 1997). Using Salts and Sand for Winter Road Maintenance. *Wisconsin Transportation Bulletin*, U. S. Roads, **6**.