

## Hidrogeologia de rochas graníticas da região do Porto (NW de Portugal)

### Hydrogeology of granitic rocks from Porto region (NW Portugal)

COXITO AFONSO, M. J.<sup>1</sup>

#### Abstract

The studied area refers to Porto region (NW Portugal), has about 190km<sup>2</sup> being limited to the South by the terminal part of the Douro River mouth and to the West by the Atlantic Ocean. It is located in a complex geotectonic domain of the Iberian Massif, between the Porto–Albergaria-a-Velha–Tomar shear zone and the Douro-Beira Carboniferous trough. The region is characterized by the prevailing Variscan granitic rocks, which are two-mica granitoids, with medium grain and granular texture (Porto Granite) or porphyritic (Ermesinde Granite). The regional fracture study allowed to define preferential orientations: NW-SE are dominant, and more discreetly, NE-SW, while the predominant dip of the discontinuities is vertical to subvertical. The granitic rocks weathering in this region results in arenization, which may reach depths of more than 100 m. In geomorphological framework, the region corresponds to a wide flat area dipping gently to South and West. The drainage net reveals a structural control, which imposed morphostructural features to the region. The main water line is the Leça River, whose general orientation is NE-SW.

In the climatological study it was determined the annual average values of precipitation and temperature in the region, which correspond to 1151.5mm and 14°C, respectively. This study also enabled an evaluation of the effective evapotranspiration, which is 612.6mm/year. The infiltration rate was evaluated as 7% and the renewable underground hydric resources were estimated as 16x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/year, which corresponds to 2.7 l/s/km<sup>2</sup>.

In the hydrodynamic analysis it is shown water productivity of wells, which led to a mean value of 1.7 l/s. Through pumping tests, the values of transmissivity and storage coefficient were estimated, which are in the ranges 1 to 46 m<sup>2</sup>/d and 10<sup>-6</sup> to 10<sup>-2</sup>, respectively. These parameters allowed delineating a hydrodynamic model suitable to the granitic fractured media.

The hydrogeochemical study allowed verifying that local ground waters show significant mineralization (conductivity values between 427 and 489  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) and pH around 6. The mineralization of the waters is essentially controlled by the concentration of the rainwater evaporation. Nevertheless, the contribution of the silicates hydrolysis and of the artificial introduction of some salts due to human activity should not be neglected. The ground waters are mainly positioned in the sodium chloride and calcium chloride facies.

Concerning groundwater contamination, it was detected a great number of contaminant sources in this kind of urban environment. The analysis of the water quality for human use revealed that these waters are generally admissible, although the contents of nitrate are sometimes high. The use of these waters for agriculture offers a low danger of alkalization and a medium to low danger of salinization of the soil. In terms of water vulnerability to pollution, the region fits in a low to medium vulnerability class.

**Key words:** Porto granitic rocks, hydrogeology, hydrochemistry, NW Portugal

(1) Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Portugal, e Centro de Minerais Industriais e Argilas da Universidade de Aveiro (mja@isep.ipp.pt)

## INTRODUÇÃO

Este trabalho teve como principal objectivo contribuir para um melhor conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos em formações graníticas na parte portuguesa do Maciço Ibérico. Neste estudo de síntese, apresentam-se os resultados de um trabalho de investigação de maior dimensão sobre a região do Porto (AFONSO, 1997). Com efeito, a investigação na área em estudo prossegue, actualmente, centrando-se na temática da hidrogeologia ambiental e recursos hídricos da região do grande Porto–S. João da Madeira (AFONSO, 2003).

O sector estudado reporta-se à região do Porto (NW de Portugal), ocupando uma área de *ca.* 190 km<sup>2</sup> limitada a Sul pela parte terminal da foz do rio Douro e a Oeste pela faixa litoral do Oceano Atlântico (figura 1).

Os meios fracturados graníticos, face às suas características geológicas e estruturais, caracterizam-se por uma elevada heterogeneidade e anisotropia, as quais colocam enormes dificuldades ao desenvolvimento e à gestão dos recursos hídricos. A identificação de descontinuidades, como contactos geológicos, filões e falhas, bem como o estudo da alteração, são de vital importância na investigação destas formações cristalinas. Enquanto que a alteração controla o fluxo na parte superior do maciço, funcionando esta zona como reservatório, as descontinuidades actuam como um sistema colector responsável pela circulação profunda (*e.g.*, CARVALHO, 1984; CARVALHO *et al.*, 1985; PEREIRA, 1992, 1999; CHAMINÉ *et al.*, 1999; CARVALHO & CHAMINÉ,

2000; CARVALHO, 2001; AIRES-BARROS & MARQUES, 2003).

## ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL E GEOMORFOLÓGICO REGIONAL

A região do Porto localiza-se (figura 1) num domínio geotectónico complexo do Maciço Ibérico (MI), *i.e.*, entre os terrenos da faixa de cisalhamento de Porto–Albergaria-a-Velha–Tomar e o Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão (CHAMINÉ, 2000; PINTO DE JESUS, 2001). O sector estudado situa-se, assim, ao longo da sutura com direcção geral NNW–SSE — faixa de cisalhamento de Porto–Tomar (Zona de Ossa-Morena) — que contacta com a Zona Centro-Ibérica (LOTZE, 1945; RIBEIRO *et al.*, 1979, 1990b). O conjunto anterior faz parte do megadomínio de cisalhamento de Porto–Tomar–Ferreira do Alentejo (CHAMINÉ, 2000; CHAMINÉ *et al.*, 2000; RIBEIRO *et al.*, 2003).

No MI a evolução tectónica posterior é imposta pela orogenia Alpina (*e.g.*, RIBEIRO *et al.*, 1979, 1990a; CABRAL, 1995; RIBEIRO, 1988, 2002) correspondendo à reactivação das falhas tardi-variscas e como consequência estará na origem dos actuais traços morfoestruturais da região (ARAÚJO, 1991; GOMES & BARRA, 2001). A presença de alguns depósitos plio-quadernários, discordantes sobre o substrato ante-Mesozóico, representará ou o testemunho do arrasamento do relevo e modelação da superfície do MI, ou o entalhe da rede hidrográfica actual (MARTÍN-SERRANO, 1994). A região do Porto é caracterizada, em traços muito gerais, pela dominância de rochas graníticas de idade

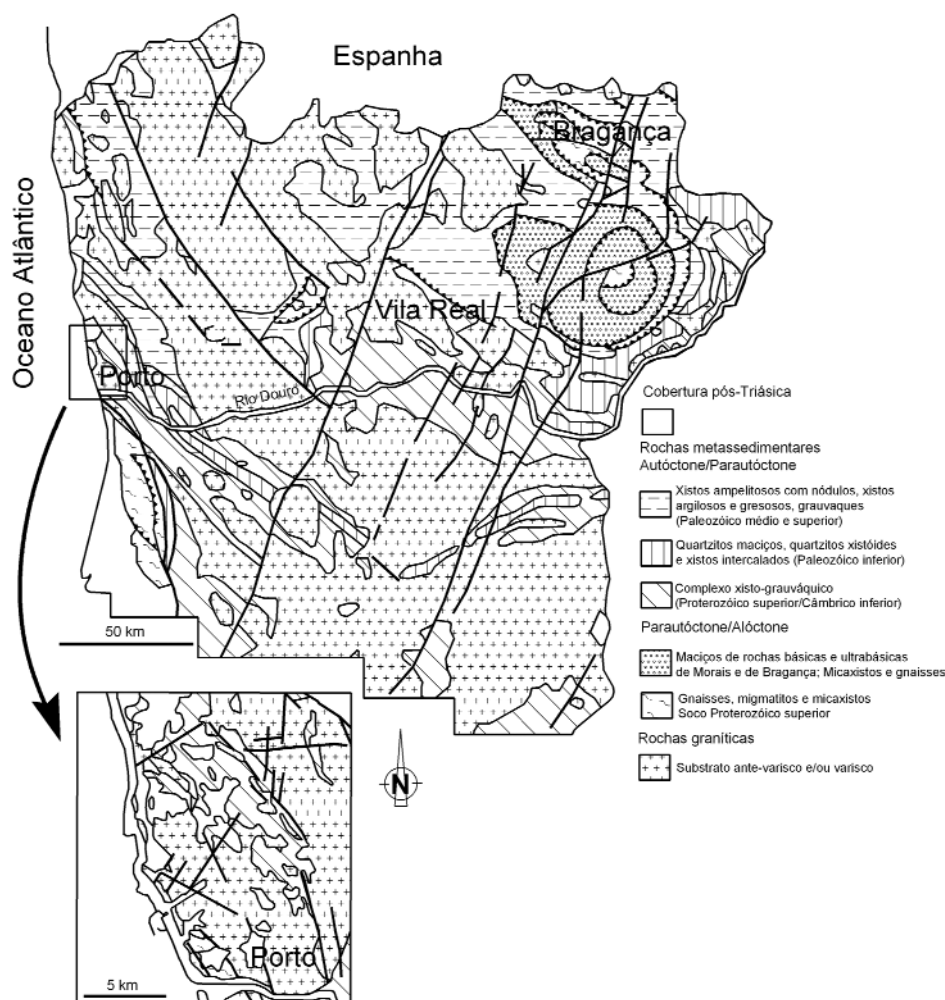


Figura 1. Enquadramento geológico da região do grande Porto (muito simplificado de OLIVEIRA *et al.*, 1992).

varisca e/ou pré-varisca (*e.g.*, SERRANO PINTO *et al.*, 1987; PEREIRA *et al.*, 1989; CHAMINÉ *et al.*, 1998; CHAMINÉ, 2000; NORONHA & LETERRIER, 2000), sendo estas, maioritariamente, granitóides de duas micas, de grão médio e

textura granular ( fácies granítica do Porto; segundo ALMEIDA (2001) tem uma idade de 318 Ma) ou porfiróide ( fácies granítica de Ermesinde). Na sistematização proposta por FERREIRA *et al.* (1987) o granitóide do Porto (*s.l.*) enquadra-se num

granito sin-tectónico relativamente à 3ª fase da orogenia Varisca, tendo sido individualizados corpos granitoides na região incluídos quer na categoria de pré-tectónicos a variscos precoces quer na categoria de pós-tectónicos. O granito do Porto aflora em grande parte da cidade do Porto, estendendo-se ainda para os concelhos de Vila Nova de Gaia, Matosinhos e Maia, contactando, a Leste, com uma extensa mancha de rochas metassedimentares (tradicionalmente incluída no “Complexo Xisto-Grauváquico”; cf. CARRINGTON DA COSTA & TEIXEIRA, 1957) e, a Oeste-Sudoeste, com uma série de unidades tectonoestratigráficas de médio a alto grau metamórfico típicas da ZOM (CHAMINÉ, 2000; NORONHA & LETERRIER, 2000; CHAMINÉ *et al.*, 2003). Uma parte da região está ocupada por depósitos de cobertura de idade holocénica e/ou plistocénica (depósitos aluvionares, areias de praia e de duna actuais), e de idade plio-pleistocénica (depósitos de praias antigas e de terraços fluviais) — *vide* ARAÚJO (1991, 1997), SOARES DE CARVALHO (1992). Em termos de fracturação regional, as orientações dominantes são do quadrante NW-SE e, de uma forma mais discreta, encontram-se também as de direcção média NE-SW, predominando em termos de inclinação as descontinuidades verticais a subverticais. A análise da alteração permitiu constatar que o resultado da meteorização das rochas graníticas da região é frequentemente patenteada pela arenização e/ou decomposição do maciço (cf. BEGONHA & BRAGA, 1995; BEGONHA, 2001), que pode alcançar profundidades de mais de 100 m. Estes produtos de meteorização são

caracterizados por um esqueleto essencialmente constituído por minerais primários (quartzo, feldspato potássico e micas) e uma fracção argilosa predominantemente do tipo caulinite e gibsite. Estes dois minerais revelam uma elevada evolução mineralógica e conferem uma boa drenagem interna do maciço.

Do ponto de vista geomorfológico, o sector estudado está enquadrado no MI (RIBEIRO, 1988; ARAÚJO, 1991), correspondendo a uma vasta área aplanada (as cotas não ultrapassam em geral os 100 metros) de posição marginal relativamente à plataforma litoral (figura 2), que transita para um relevo acentuado de rebordo interior de plataforma (i.e., o relevo marginal; ARAÚJO, 1991). A organização da rede de drenagem reflecte a tectónica da área, especialmente, dos sistemas de fracturação regional (NW-SE a NNW-SSE, NE-SW a NNE-SSW e W-E; cf. CONDE, 1983; ARAÚJO, 1991; CABRAL, 1995; PEDROSA, 1998, 1999; CHAMINÉ, 2000), impondo os traços morfoestruturais à região. Assim, estas estruturas maiores produzem uma compartimentação tectónica que, por sua vez, condicionou a distribuição das linhas de água, e consoante a litologia e a estrutura formaram-se as redes hidrográficas, em geral, do tipo rectangular e/ou dendrítico. A linha de água principal na região em estudo é o rio Leça, desenvolvendo-se sobre uma plataforma ligeiramente inclinada para o Oceano Atlântico com uma orientação NE-SW. As ribeiras do Arquinho e do Leandro são dois dos tributários mais relevantes, exibindo uma orientação geral N-S. A parte terminal do rio Douro constituiu outro sistema fluvial, orientando-se localmente segundo W-E.

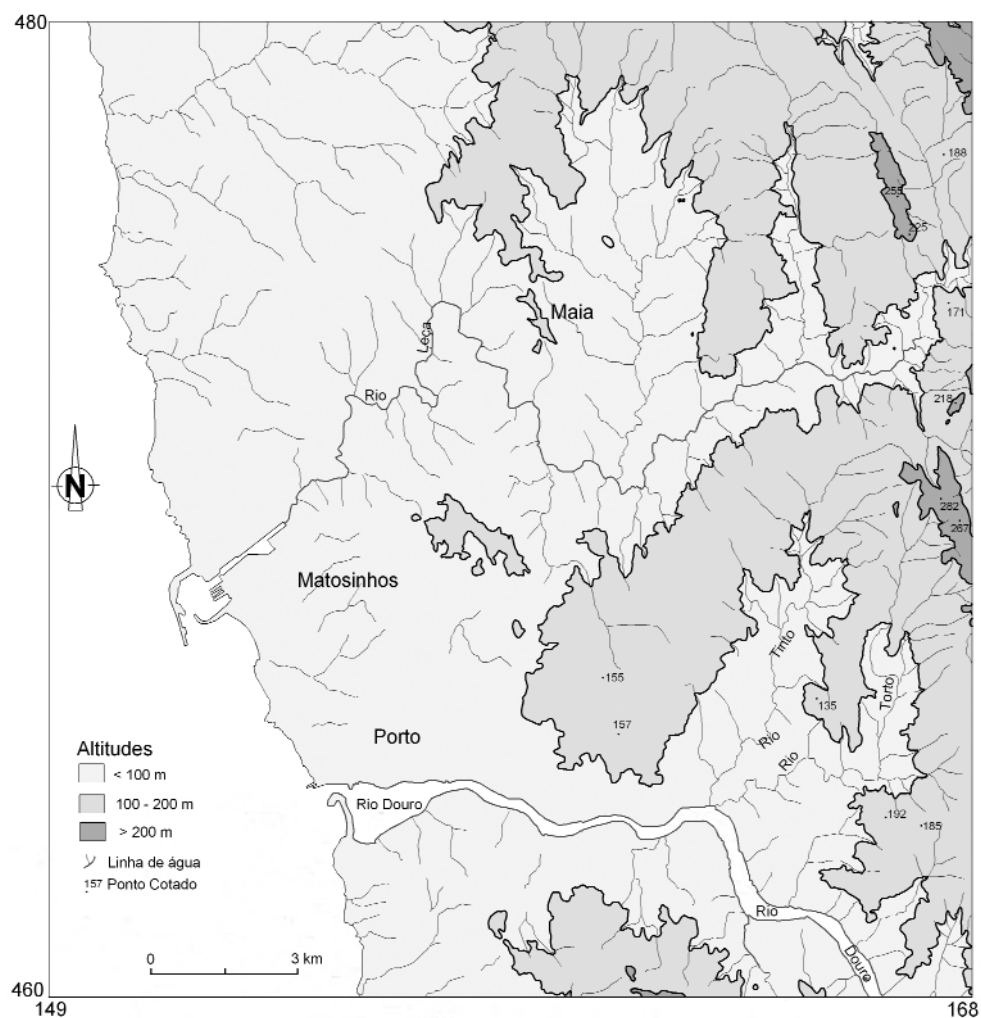


Figura 2. Hipsometria e rede hidrográfica da região do grande Porto.

## CLIMATOLOGIA

Seguindo as instruções da Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1970), a qual recomenda para áreas litorais séries de dados climáticos de pelo menos 30 anos, seleccionaram-se seis estações hidrometeorológicas: Espargo, Paços de Ferreira,

Pedras Rubras, Porto, Santo Tirso e Serra do Pilar. A série escolhida para os cálculos relacionados com a precipitação correspondeu ao período 1958 a 1993, enquanto que a análise climática se refere à série 1958 a 1988, uma vez que os registos de temperatura só estavam disponíveis para este período. A densidade média das seis

estações é *ca.* 1 estação/387km<sup>2</sup>, sendo este valor mais elevado que o recomendado pela OMM para áreas planas em regiões temperadas, mediterrânicas e tropicais (SHAW, 1988).

### Precipitação e temperatura

As características pluviométricas na região do Porto estão condicionadas, com maior incidência, pelas perturbações atmosféricas de Oeste e pelas situações depressionárias em conjunto com os fluxos marítimos, os quais mantêm ainda, nesta área próxima do oceano, as suas propriedades higrométricas (VELHAS, 1991; MONTEIRO, 1997). A altitude parece ser também responsável pela distribuição da precipitação (MONTEIRO, 1997), uma vez que a estação que apresenta o volume pluviométrico mais alto (1655.5mm) é Paços de Ferreira, a qual se encontra à cota mais elevada (320m), enquanto que a precipitação mais baixa (1165.7mm) foi registada na estação de Pedras Rubras, localizada à cota de 70m. Quanto à delimitação temporal da estação chuvosa, verificou-se que o seu corpo central é constituído pelos meses de Inverno e fim de Outono, uma vez que são os que possuem precipitações mais elevadas (em termos médios) e aqueles que mais frequentemente se apresentam como os meses mais pluviosos. Relativamente ao cálculo da precipitação média na região em estudo, este foi feito recorrendo aos métodos da média aritmética, polígonos de Thiessen e isoietas. Para a aplicação destes métodos, foram utilizadas mais quatro estações com registos de 14 anos (1979 a 1993): Boa Nova, Vila Chã,

Ermesinde e Leça da Palmeira. O método dos polígonos de Thiessen e o das isoietas conduziram a valores muito aproximados, 1155.1mm e 1151.5mm, respectivamente. Estes valores estão de acordo com VELHAS (1991), que aponta um valor de precipitação média anual da ordem dos 1200mm para o sector da bacia do rio Leça mais próximo do litoral.

No que diz respeito à temperatura, a sua análise reportou-se ao período 1958 a 1988, para as estações de Porto, Pedras Rubras, Serra do Pilar e Paços de Ferreira, e ao período de 1958 a 1981 para a estação de Santo Tirso. O mês mais frio em todas as estações foi Janeiro, sendo o mês de Dezembro igualmente mais frio na estação de Santo Tirso; quanto ao mês mais quente, este correspondeu a Julho. O cálculo da temperatura média anual na área de estudo conduziu a um valor de 14°C.

A análise climática, resultante do cômputo entre a precipitação e a temperatura, permitiu concluir que os meses de Julho e Agosto são aqueles que apresentam as precipitações médias mais baixas e as temperaturas médias mais elevadas, pelo que constituem o período seco anual, já que o dobro da temperatura supera o volume de precipitação (HERAS, 1976). Adoptando o critério de classificação climática de Köppen (*in* STRAHLER, 1979), o clima da região em estudo inclui-se no tipo Csb (*cf.* MONTEIRO, 1989), o qual corresponde a um clima mediterrânico, temperado húmido, em que o mês mais frio tem uma temperatura média compreendida entre -3°C e 18°C, o verão é quente e seco, não se atingindo temperaturas médias superiores a 22°C durante o mês mais quente.

### Evapotranspiração

A evapotranspiração real foi estimada através do método sequencial mensal de Thornthwaite e Mather, do método de Coutagne e de Turc (LENCASTRE & FRANCO, 1992), para as estações de Porto, Pedras Rubras, Serra do Pilar, Paços de Ferreira e Santo Tirso. O tratamento dos dados foi processado automaticamente pelo programa CEGEVAP (ALMEIDA, 1979). Este programa permite calcular a evapotranspiração real mensal, quer usando o método de Thornthwaite, quer recorrendo aos de Turc e Coutagne, necessitando para tal dos valores de precipitação, temperatura e ainda da reserva útil. Adoptou-se o valor de 150mm para a reserva útil, o que vai de encontro aos valores estabelecidos por VELHAS (1991), que utilizou os valores de 120mm e 150mm na bacia hidrográfica do Leça. Já ABRUNHOSA (1988), num trabalho hidrogeológico sobre a bacia do Ave, adoptou 130mm; enquanto que LIMA (1994) estabeleceu o valor de 100mm, e LENCASTRE & FRANCO (1992), os quais citam os valores de 100mm e 150mm como os mais coerentes para situações idênticas às da região de Braga. A aplicação do balanço hídrico sequencial (LENCASTRE & FRANCO, 1992) às áreas de influência das cinco estações revelou a existência de um período húmido extenso, que se inicia em Outubro e se prolonga até meados de Maio, e um período seco de curta duração que vai de Junho a Setembro. A evapotranspiração real obtida através do método de Thornthwaite e Mather conduziu a um valor médio na região de 612.6 mm/ano.

### Recursos hídricos subterrâneos

Como objectivo de estimar os recursos hídricos subterrâneos, procedeu-se ao cálculo da infiltração eficaz, recorrendo ao método do balanço de cloretos (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983). Para tal, foi levada a cabo, quinzenalmente, uma recolha simultânea de água da chuva e subterrânea em cinco estações inseridas na área de trabalho, durante sete meses. O teor médio do ião cloreto na água da chuva da região foi de 6.1 ppm. Este valor está ligeiramente abaixo dos indicados por CUSTÓDIO & LLAMAS (1983) para locais perto da costa (entre 10 e 40 ppm). Nas águas subterrâneas, o teor médio em cloretos cifrou-se nos 43.9 ppm. Com base nestes resultados, obteve-se uma taxa média de infiltração eficaz de *ca.* 7%. Este valor poderá estar sobreavaliado, uma vez que uma grande parte da região possui uma percentagem significativa de áreas impermeabilizadas. Não obstante, esta taxa está contida no intervalo de valores médios em formações cristalinas do Norte de Portugal (CARVALHO *et al.*, 2000). Os recursos hídricos subterrâneos renováveis foram estimados com base na área total coberta pelo estudo (190.3km<sup>2</sup>), no coeficiente de infiltração eficaz (7%) e na precipitação média anual (1151.5mm), tendo-se cifrado estes em 16x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/ano, o que corresponde a 2.7 l/s/km<sup>2</sup>.

### HIDRODINÂMICA

#### Produtividades

O estudo da produtividade das captações na região do Porto baseou-se em 62 relatórios hidrogeológicos, correspondentes a captações do tipo furo vertical, com



uma profundidade média, mínima e máxima de 123m, 23m e 205m, respectivamente. A análise cuidada e a triagem de informação dos relatórios citados permitiram obter valores de caudais avaliados por 'air-lift' (36) e por ensaio de caudal (26). A análise dos dados permitiu retirar as seguintes conclusões: i) no que toca aos ensaios 'air-lift', os caudais mínimo, máximo e médio foram 0.11/s, 8.31/s e 1.81/s, respectivamente, enquanto que o caudal mediano foi de 1.11/s; ii) relativamente aos ensaios de caudal, a mediana foi de 1.31/s, correspondendo os caudais mínimo, máximo e médio a 0.41/s, 4.01/s e 1.71/s, respectivamente. Foi estabelecida a correlação entre os caudais e a profundidade, tendo-se concluído que esta era nula.

#### Parâmetros hidráulicos

A condutividade hidráulica (K) foi avaliada com base em ensaios de permeabilidade tipo 'Lugeon' e 'Lefranc' e em ensaios de caudal. Relativamente aos ensaios de permeabilidade, os resultados obtidos foram os seguintes:  $K_{\text{média}}$  é moderada ( $1.2 \times 10^{-1}$  m/d),  $K_{\text{mínima}}$  é muito baixa ( $8.6 \times 10^{-5}$  m/d) e  $K_{\text{máxima}}$  é moderada a elevada (1.15 m/d). Com o intuito de explicar os valores de K encontrados, correlacionaram-se estes com a fracturação (i.e., nº fracturas/metro), com a espessura e o grau de alteração, bem como com a profundidade, correlações estas que resultaram bastante baixas a nulas. Desta forma, poder-se-á apontar como causa provável para as condutividades hidráulicas mais elevadas a presença de algumas descontinuidades mais permeáveis, quer devido à sua orientação relativamente ao fluxo, quer em termos da sua abertura e/ou preenchi-

mento. No que diz respeito aos ensaios de caudal, os valores de K média, mínima e máxima corresponderam, respectivamente, a uma condutividade moderada ( $4.1 \times 10^{-1}$  m/d), baixa ( $4 \times 10^{-3}$  m/d) e moderada a elevada (5.3 m/d). Estes valores não exibiram qualquer correlação com a profundidade e foram idênticos, com excepção de K mínima, aos relatados para os ensaios 'Lugeon' e 'Lefranc'.

Os parâmetros hidráulicos transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) foram estimados a partir de ensaios de caudal, a maioria destes realizados a caudal constante e em 50% dos quais foi possível obter os rebaixamentos quer no furo de bombagem, quer em furos de observação. A interpretação dos ensaios, no que toca aos dados relativos à bombagem, foi efectuada com base nos modelos de escoamento disponíveis no programa AQFIS (OLIVEIRA, 1990; ALMEIDA & OLIVEIRA, 1990) e no modelo de Theis, através do programa SENTHEIS (ALMEIDA, 1981; ALMEIDA *et al.*, 1992). Relativamente aos dados de recuperação, a sua interpretação foi elaborada com base no método de recuperação de Theis (KRUSEMAN & RIDDER, 1990), com recurso à folha de cálculo Microsoft® Excel. A análise dos resultados conduziu às seguintes conclusões: i) os valores de T foram bastante variáveis, oscilando entre 1 e  $46 \text{ m}^2/\text{dia}$ ; ii) os valores mais baixos de T foram, na generalidade, os obtidos pelo método de recuperação de Theis, enquanto que os valores mais elevados corresponderam, de uma forma geral, à aplicação dos modelos do programa AQFIS; iii) os valores de T obtidos por intermédio dos furos de observação foram normalmente

superiores aos resultantes dos furos de bombagem, quando se considerou a aplicação do mesmo método; e iv) os valores de S foram muito variáveis, situando-se entre  $10^{-6}$  e  $10^{-2}$ , não obstante, para o mesmo furo, os resultados obtidos pelos modelos do programa AQFIS e pelo modelo de Theis não denotarem diferenças relevantes. Esta análise permitiu concluir que T é subavaliada por intermédio do método de recuperação de Theis e que o modelo de Theis pode fornecer uma aproximação razoável na estima de T e S.

#### Um modelo de funcionamento hidrodinâmico

A heterogeneidade e anisotropia dos meios fracturados graníticos, aliadas à escassez de informação, bem como às limitações inerentes aos ensaios de permeabilidade e de caudal, não permitiram a definição de um modelo muito acurado. Não obstante, tentou-se esboçar num modelo embrionário o funcionamento hidrodinâmico neste tipo de meios. Até cerca de 27 metros de profundidade verificou-se a existência de uma unidade aquífera livre ( $S_{\text{médio}}=1.4 \times 10^{-2}$ ) com permeabilidade baixa a moderada ( $K=10^{-2}$  a 1m/d) e, na maior parte dos casos, produtividades baixas ( $Q \leq 0.4$ l/s). Este nível aquífero descontínuo, quer horizontal quer verticalmente, poderá corresponder aos níveis alterados ou fracturados dos granitos e a sua alimentação deverá ser directa, por infiltração. Subjacente a este nível, situa-se um outro até uma profundidade de *ca.* 48 m, com permeabilidades muito baixas a baixas ( $K=10^{-5}$  a  $10^{-2}$ m/d) e produtividades na maior parte dos casos baixas ( $Q \leq 0.8$ l/s).

Esta unidade aquífera corresponderá ao granito fracturado menos alterado, o qual deverá ser alimentado directamente por infiltração e/ou por drenância da unidade sobrejacente. Entre as profundidades de 48 e 80 m, a única informação disponível diz respeito às produtividades, as quais foram maioritariamente baixas ( $Q \leq 0.8$ l/s). O nível situado abaixo dos 80 m e que se estende, aproximadamente, até aos 122 m, corresponde a um aquífero confinado ( $S_{\text{médio}}=2.9 \times 10^{-4}$ ), com permeabilidade baixa a moderada ( $K=10^{-2}$  a 1m/d) e produtividade média, avaliada através dos ensaios de caudal, de 1.6l/s. Estes valores de permeabilidade e produtividade deverão corresponder a um maciço mais ou menos são, cortado por discontinuidades abertas. A recarga deste aquífero deverá processar por infiltração directa, nos pontos em que o mesmo é de tipo livre ou semiconfinado, ou através dos níveis sobrejacentes. Por fim, subjacente a este nível situar-se-á o maciço são e compacto, o qual deverá ter uma permeabilidade praticamente nula.

#### HIDROGEOQUÍMICA

A caracterização hidrogeoquímica das águas da região em estudo foi baseada em 35 pontos de amostragem (figura 3), 28 dos quais furos, 4 poços e os restantes 3, minas. A campanha de amostragem incluiu três colheitas: Novembro de 1995 (28 pontos), Fevereiro de 1996 (25 pontos) e Julho de 1996 (27 pontos). Dos 35 pontos, 17 foram analisados nas três colheitas. No momento das colheitas foram medidos sistematicamente *in situ* os seguintes parâmetros: temperatura, pH, condutividade

eléctrica e potencial redox. Os dados hidrogeológicos de campo, em conjunto com os determinados analiticamente, foram tratados automaticamente pelo programa HIDSPEC (CARVALHO & ALMEIDA, 1989).

A temperatura média das águas foi de 18.2°C em Novembro, 15.5°C em

Fevereiro e 19.9°C em Julho. Ressalva-se o facto de que na maioria dos pontos de água a temperatura poderá não corresponder à real, uma vez que as águas antes de serem amostradas percorriam trajectos por vezes mais ou menos longos em condutas/tubagens, nalguns casos a céu aberto. Desta forma, considerou-se que o valor obtido na

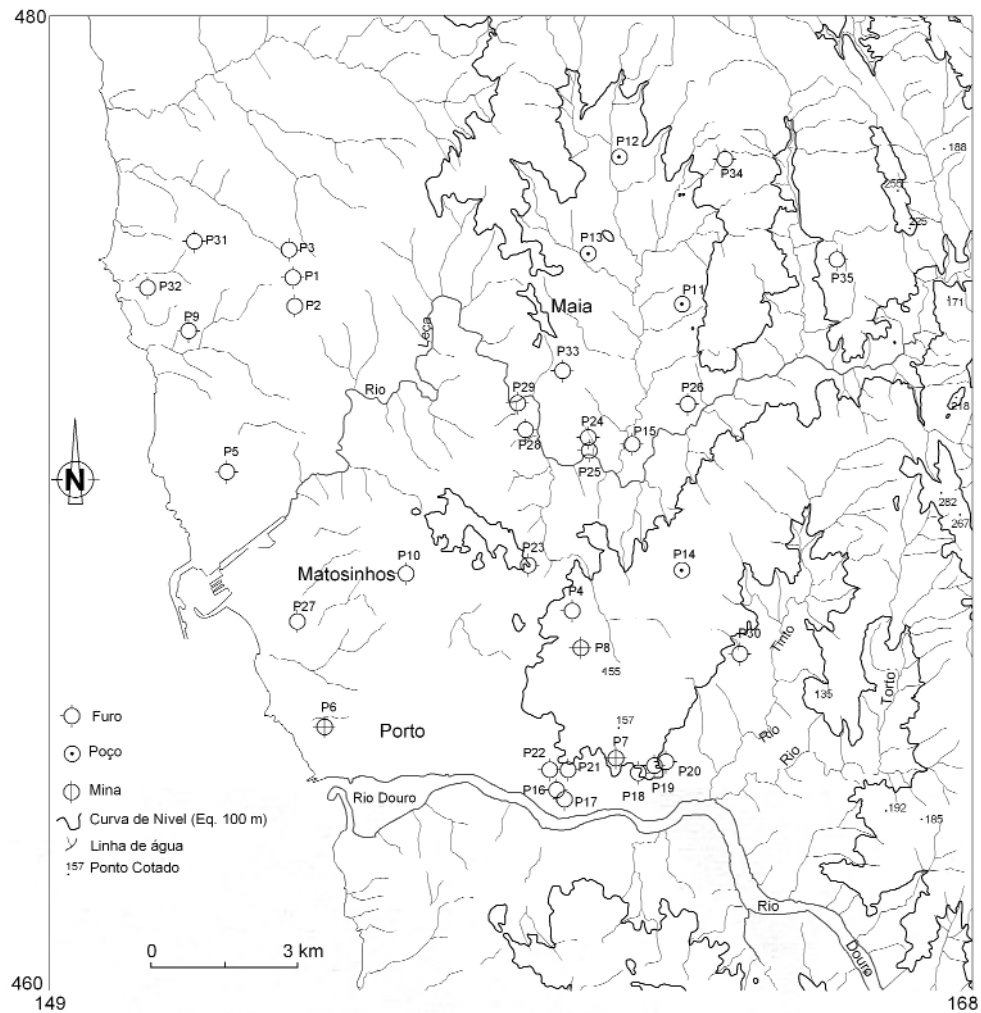


Figura 3. Localização dos 35 pontos de água amostrados, na região do Porto, para a análise hidrogeológica (adaptado de AFONSO, 1997).

colheita de Fevereiro seria aquele que mais se aproximaria da temperatura média real das águas subterrâneas na região.

Quanto à condutividade eléctrica média, constatou-se que esta aumentava ligeiramente de Novembro (476 $\mu$ S/cm) para Fevereiro (489 $\mu$ S/cm) e diminuía para Julho (427 $\mu$ S/cm), constituindo assim a época seca o período com mineralização mais baixa.

Relativamente ao pH, verificou-se que os valores médios não diferiram muito nas três amostragens, observando-se um ligeiro decréscimo de Novembro (6.15) para Julho (6.02). A análise global dos dados permitiu concluir que cerca de 70% dos pontos apresentavam valores compreendidos entre 6 e 7, os quais estão contidos na gama de pH em que se incluem a maioria das águas subterrâneas (6 a 9).

Relativamente aos quatro catiões principais, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>, a sua análise permitiu concluir que o catião com valores médios mais elevados nas três colheitas era o Na<sup>+</sup> (39.9 a 45mg/l), seguido por ordem decrescente, do Ca<sup>2+</sup> (21.4 a 31mg/l), do Mg<sup>2+</sup> (10.6 a 11.6mg/l) e do K<sup>+</sup> (4 a 8.4mg/l). No sentido de verificar a existência de processos comuns que justificassem a proveniência dos diferentes catiões, estabeleceram-se as matrizes de correlação entre estes, as quais permitiram verificar que os coeficientes eram relativamente baixos ( $r \leq 0.59$ ), com excepção do par Na<sup>+</sup>/Mg<sup>2+</sup> o qual apresentou em Fevereiro uma correlação mais elevada ( $r = 0.71$ ). À semelhança dos catiões, foi feita a análise dos quatro principais aniões, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. O anião com valores médios mais elevados na 1<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> colheitas foi o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (69.6 a 78.6mg/l),

enquanto que na 2<sup>a</sup> colheita foi o Cl<sup>-</sup> (62.9mg/l). Estes dois aniões foram seguidos, por ordem decrescente, do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (36.0 a 51.1mg/l) e do NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (18.5 a 46.0mg/l). As relações esboçadas entre os quatro aniões foram pouco consistentes, face às suas baixas correlações ( $r \leq 0.35$ ), destacando-se apenas a correlação entre o Cl<sup>-</sup> e o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> em Fevereiro ( $r = 0.61$ ). A análise das matrizes de correlação entre catiões e aniões permitiu verificar que o par Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> exibia as correlações mais elevadas nas três colheitas ( $0.80 < r < 0.91$ ), que o par Ca<sup>2+</sup>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> apresentava uma boa correlação em Julho ( $r = 0.83$ ), que a correlação Mg<sup>2+</sup>/Cl<sup>-</sup> foi boa em Fevereiro ( $r = 0.80$ ) e que o par K<sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> exibia correlações razoáveis em Novembro ( $r = 0.67$ ) e Fevereiro ( $r = 0.62$ ).

O teor em sílica (SiO<sub>2</sub>), correspondente de uma forma dominante à espécie H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, uma vez que o pH médio destas águas se inclui na gama 6 a 9, conduziu a valores médios compreendidos entre 18.9mg/l (Novembro) e 28.2mg/l (Julho).

Face aos resultados expostos tentou-se verificar quais os iões e processos que contribuiriam para a mineralização das águas no sector estudado. A hidrólise dos silicatos não parece exercer um papel preponderante na mineralização, uma vez que: i) as correlações condutividade/pH, condutividade/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e condutividade/sílica são baixas; ii) as correlações entre os diversos catiões são relativamente baixas; e iii) a correlação entre o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e os catiões Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> e Mg<sup>2+</sup> é fraca, no entanto nas amostragens de Novembro e Julho, a correlação HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Ca<sup>2+</sup> foi, respectivamente, de 0.68 e 0.83, valores que poderão indicar algum controlo da hidrólise das plagioclases na

mineralização. Constatou-se ainda que, para a colheita de Julho, os iões que melhor se correlacionavam com a condutividade eram o  $\text{Na}^+$  ( $r = 0.81$ ), o  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0.75$ ) e o  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r = 0.73$ ), salientando-se ainda a correlação, em Fevereiro, entre a condutividade e o  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $r = 0.83$ ). De todas as relações anteriormente apresentadas concluiu-se que a mineralização das águas parece estar essencialmente controlada pela concentração por evaporação da água da chuva, face à excelente correlação entre os iões sódio e cloreto e à boa correlação entre a condutividade e estes dois iões. Os teores por vezes elevados de sulfato, os quais controlam em parte a mineralização, podem igualmente ser atribuídos, pelo menos parcialmente, à concentração a partir da água da chuva. Esta origem comum dos iões sódio, cloreto e sulfato é suportada pela composição química da água da chuva no Porto (BEGONHA *et al.*, 1995). Enquanto que o  $\text{Cl}^-$  e o  $\text{Na}^+$  são de origem marinha, o  $\text{SO}_4^{2-}$  será muito provavelmente de origem antrópica.

### Fácies hidroquímicas

A caracterização das fácies hidroquímicas foi estabelecida através da projecção no diagrama de Piper. A título de exemplo, apresenta-se o diagrama de Piper relativo à colheita de Novembro (figura 4).

Como se referiu, o  $\text{HCO}_3^-$  foi o anião que apresentou valores médios mais elevados na 1ª e 3ª colheitas, enquanto que o  $\text{Cl}^-$  liderou na 2ª colheita. Contudo, a análise dos três diagramas permitiu constatar que a fácies cloretada foi dominante nas três amostragens, seguida da fácies bicarbonatada. Quanto aos catiões, o  $\text{Na}^+$  foi o

catião dominante seguido do  $\text{Ca}^{2+}$ . No entanto, verificou-se que a fácies sódica dominou na 1ª e 3ª colheitas, enquanto que na 2ª predominou a fácies cálcica. Em Novembro, a maior parte das águas eram cloretadas sódicas e cálcicas, dominando as primeiras; em Fevereiro, período no qual a dispersão das fácies foi menor, as águas cloretadas sódicas e as águas cloretadas cálcicas estavam equiparadas. Em Julho, época que apresentou a maior variabilidade de fácies hidroquímicas, a maioria das águas eram cloretadas sódicas, cálcicas e magnesianas. Desta forma, concluiu-se que de Novembro para Fevereiro havia um nítido deslocamento no sentido do pólo cloreto e de forma menos evidente no sentido do cálcio, enquanto que de Fevereiro para Julho se verificou um deslocamento das fácies hidroquímicas no sentido do bicarbonato e do sódio.

### Índices de saturação

A avaliação do estado de equilíbrio da água relativamente a um dado contexto mineralógico pode ser conseguida através dos índices de saturação (IS) relativos a diferentes espécies minerais. Os índices de saturação foram calculados pelo programa HIDSPEC (CARVALHO & ALMEIDA, 1989), o qual apresenta os índices sob a forma de logaritmo (LogIS) para diversos minerais, entre os quais se incluíam quatro polimorfos de sílica: quartzo, calcedónia, cristobalite e sílica gel. Todas as águas analisadas se apresentaram subsaturadas relativamente a todos os minerais que figuravam na especiação, com excepção dos polimorfos de sílica. Relativamente ao quartzo e à cristobalite, a maioria das águas encon-

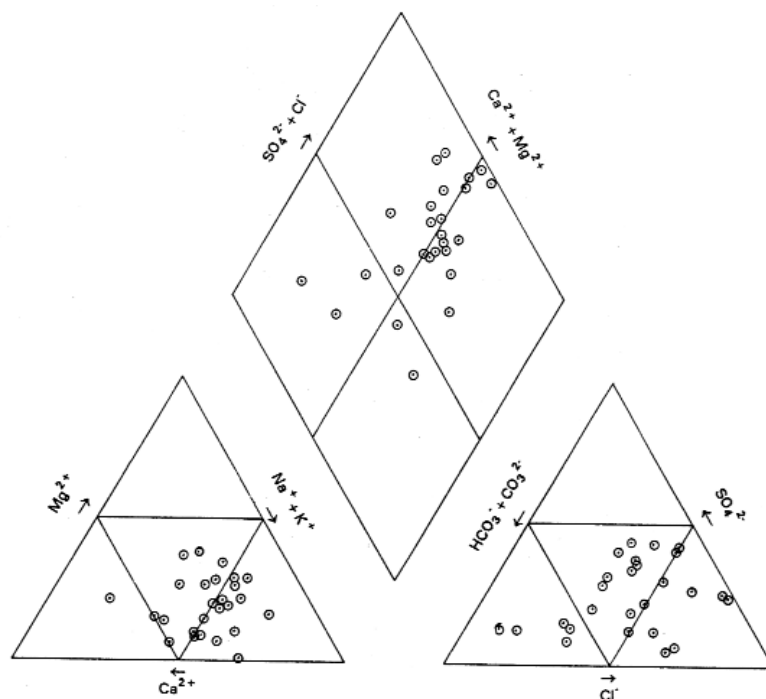


Figura 4. Diagrama de Piper relativo à colheita de Novembro de 1995.

trava-se sobressaturada nas três colheitas; quanto à calcedónia, as águas estavam sobressaturadas em Fevereiro e Julho, encontrando-se em equilíbrio em Novembro. Em relação à sílica gel, as águas apresentaram-se subsaturadas nas três colheitas. Os valores médios dos quatro polimorfos sofreram um aumento de Novembro para Julho, no entanto, considerando apenas os dezasseis pontos analisados nas três colheitas, verificou-se que existe na maioria destes uma tendência para os valores aumentarem de Novembro para Fevereiro e diminuírem de Fevereiro para Julho. Estes resultados pouco consistentes não permitiram delinear com clareza um aumento da saturação no decurso do ano hidrológico.

#### CONTAMINAÇÃO E VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS À POLUIÇÃO

Sendo a região em estudo uma importante área urbana e fortemente industrializada, esta encontra-se sujeita a fortes pressões antrópicas. A tipologia das substâncias contaminantes está dependente das fontes consideradas, as quais são numerosas e variadas neste tipo de ambiente urbano. As fontes que provocam maior impacto na qualidade das águas subterrâneas da região são: i) as fossas e reservatórios sépticos, as quais ocorrem em zonas onde o saneamento básico é insuficiente ou simplesmente inexistente, situações que não são raras na área de estudo; ii) os cemité-

rios, que deverão ter representatividade na área de estudo, uma vez que só na cidade do Porto existem onze; iii) reservatórios de armazenamento à superfície e subterrâneos, como é o caso dos reservatórios de produtos derivados de hidrocarbonetos petrolíferos, cujo impacto é muito grande na região em estudo, face ao número extraordinariamente elevado de estações de serviço existentes, bem como à presença da refinaria da Petrogal, localizada no quadrante Oeste da área estudada; iv) o escoamento urbano; v) os poluentes atmosféricos; vi) as lixeiras e entulheiras e vii) as actividades agrícolas.

#### Qualidade da água para consumo humano e para uso agrícola

A avaliação da qualidade da água para consumo humano foi feita com base numa adaptação de um diagrama elaborado pelo Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa (*cf.* AFONSO, 1997), no qual se projectaram os dados relativos à colheita de Julho. Este diagrama permitiu classificar as águas em três categorias: inaceitáveis, toleráveis (admissíveis) e recomendáveis. Constatou-se que a maioria das águas se situavam no campo das toleráveis relativamente à temperatura, ao sódio, ao cloreto e ao sulfato e que em relação à dureza, ao cálcio, ao magnésio, ao potássio e ao nitrato, a maior parte das águas eram recomendáveis. Chama-se a atenção para o facto de os teores médios de potássio e nitrato serem mais baixos na época seca, pelo que se se atentasse às águas da colheita de Novembro, 46% seriam consideradas inaceitáveis, enquanto que na colheita de Fevereiro estas representariam

36%. Estas conclusões seriam idênticas se se analisassem os parâmetros referidos à luz dos Decretos-Lei nº 236/98, de 1 de Agosto e nº 243/2001, de 5 de Setembro.

Quanto à aptidão das águas para uso agrícola, recorreu-se ao diagrama de Riverside, da classificação do 'U. S. Salinity Laboratory Staff' (*cf.* CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983). A análise do diagrama, aplicado à colheita de Julho, permitiu constatar que a maioria das águas se posicionava no sector C2S1, o que significa que as águas oferecem um baixo perigo de alcalinização e um perigo médio a baixo de salinização do solo.

#### Vulnerabilidade à poluição

A análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição na região em estudo foi elaborada com base no índice DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987 *in* VRBA & ZAPOROZEC, 1994), o qual resulta da ponderação de sete indicadores hidrogeológicos (FERREIRA & OLIVEIRA, 1993): profundidade da zona não-saturada do solo (*Depth to the water table*), recarga profunda de aquíferos (*net Recharge*), material do aquífero (*Aquifer material*), tipo de solo (*Soil type*), topografia (*Topography*), impacto da zona não-saturada (*Impact of the unsaturated zone*) e condutividade hidráulica (*hydraulic Conductivity*). O objectivo final deste processo é o mapeamento da vulnerabilidade, no entanto este não foi efectuado para a região em estudo, uma vez que os dados correspondentes a cada um dos parâmetros não estão sectorizados, correspondendo somente a informações gerais de toda a zona. Relativamente ao parâmetro D, atri-

buíram-se os índices 7 e 9. Quanto ao parâmetro R, correspondeu o índice 3. Em relação ao parâmetro A, foram aplicados os índices 2-5 e 3-5. No que toca ao parâmetro S, adoptou-se o índice 6. No que diz respeito ao parâmetro T, o índice atribuído foi o 9. Quanto ao parâmetro I, seleccionaram-se os índices 2-8 e 6-9. Por fim, para o parâmetro C, o índice correspondente foi 1. Os valores mínimo e máximo do índice de vulnerabilidade DRASTIC foram 87 e 141, respectivamente, os quais correspondem a uma vulnerabilidade baixa a média.

#### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A região do Porto apresenta, do ponto de vista quantitativo, potencialidades animadoras em termos de recursos hídricos subterrâneos. A existência destes recursos depende das características climatológicas, geomorfológicas e geológicas da região, comumente inserida no limite do Maciço Cristalino Antigo e da Orla Ocidental (*e.g.*, CARVALHO, 1996; PEDROSA, 1999; CARVALHO *et al.*, 2000). Apesar de a taxa média de infiltração ser baixa, a precipitação média anual é significativa e encontra-se bem distribuída sendo as condições geomorfológicas favoráveis. No entanto, a elevada heterogeneidade e anisotropia destas formações, resultantes das características geológicas e estruturais, é basilar na investigação destas formações cristalinas. Assim, é de vital importância a identificação, à escala local, de estruturas planares, como contactos geológicos, filões e falhas (*e.g.*, CARVALHO, 1984; PEREIRA, 1992; CHAMINÉ *et al.*, 1999; CARVALHO & CHAMINÉ,

2000). Em termos hidroquímicos, as águas da região do Porto apresentam uma mineralização significativa, a qual é essencialmente controlada pela concentração por evaporação da água da chuva, havendo um contributo da hidrólise dos silicatos e adição artificial de alguns sais, devido a actividades antrópicas. Relativamente à caracterização das águas, a maioria destas situa-se na fácies cloretada sódica e cloretada cálcica. Quanto à qualidade da água para consumo humano, o estudo revelou que estas são em geral admissíveis, apesar de conterem por vezes teores elevados de nitrato. No que toca à sua utilização para fins agrícolas, estas águas oferecem um baixo perigo de alcalinização e um perigo médio a baixo de salinização do solo. Em termos de vulnerabilidade à poluição, a região enquadra-se numa classe de vulnerabilidade baixa a média (índice DRASTIC).

Face ao exposto e no seguimento do trabalho realizado, apresentam-se de seguida algumas recomendações para estudos vindouros, que poderão contribuir para um conhecimento mais profundo destes domínios hidrogeológicos. A avaliação da infiltração deverá contemplar outras metodologias, como as curvas de escoamento de nascentes e a decomposição de hidrogramas de escoamento em linhas de água. O estudo hidrodinâmico deverá incluir a elaboração de mapas de isopiezas, a definição da conexão hidráulica entre as unidades de cobertura sedimentar e as unidades cristalinas e ainda, a interacção entre águas superficiais e subterrâneas. Relativamente à caracterização hidrogeológica, dever-se-á construir uma malha apertada de pontos, nomeadamente nos locais onde a mineralização é mais elevada,



alargar os parâmetros físico-químicos analisados, designadamente os metais pesados e incluir parâmetros microbiológicos. O recurso aos isótopos de H, O e C possibilitará a definição de zonas de recarga, o estabelecimento da idade aparente das águas e a caracterização da dinâmica dos sistemas de fluxo. Quanto à contaminação e à vulnerabilidade das águas à poluição, deverá avaliar a sensibilidade das águas a impactos humanos e/ou naturais, recorrendo a ferramentas como, por exemplo, a modelação hidrogeológica e hidrogeoquímica isotópica, e ainda estudar a problemática da intrusão marinha.

Do exposto ressalta claramente o interesse e a necessidade de aprofundar a investigação hidrogeológica (AFONSO, 2003), a várias escalas, na região do grande Porto, quer ao nível da integração actualizada numa base georeferenciada dos vários aspectos geotectónicos, geomorfológicos e hidrogeológicos regionais quer ao nível do refinamento da hidrogeoquímica e da hidrodinâmica, perspectivando o estabelecimento de um modelo conceptual dos recursos hídricos para a região. Esta abordagem poderá contribuir para uma melhor

gestão sustentável dos recursos hídricos ao nível do planeamento estratégico ambiental numa área tão densamente urbanizada.

#### AGRADECIMENTOS

Esta publicação sintetiza um estudo hidrogeológico desenvolvido na região granítica do Porto, e inclui as principais conclusões da dissertação de mestrado, apresentada pela autora à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL). Ao Departamento de Geologia da FCUL e ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), todas as facilidades e apoios para a concretização deste estudo. Ao Dr. José Teixeira pelo apoio na execução das ilustrações. São devidos agradecimentos ao Prof. Helder I. Chaminé (ISEP, Porto) pelo incentivo e pela revisão cuidada do texto original. Ao Prof. J. Martins Carvalho (Universidade de Évora) e ao Prof. J. Manuel Marques (Universidade Técnica de Lisboa, IST) pela revisões críticas minuciosas do manuscrito.

*Recibido:* 7-VII-03

*Aceptado:* 20-VIII-03

## REFERÊNCIAS

- ABRUNHOSA, M. J. (1988). *Síntese hidrogeológica da Bacia Hidrográfica do Rio Ave*. 22º Curso Internacional de Hidrologia Subterrânea. Barcelona. 52 pp. + Anexos. (Relatório Inédito).
- AIRES-BARROS, L. & MARQUES, J. M. (2003). Avaliação de recursos hidrominerais e geotérmicos. Potencialidades e perspectivas futuras no nosso País. *Ingenium*, Rev. Ord. Eng., Lisboa, 72 (II Série): 38-44.
- AFONSO, M. J. C. (1997). Hidrogeologia de rochas graníticas da região do Porto. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. 150 pp. + Vol. Anexos. (Tese de mestrado).
- AFONSO, M. J. C. (2003). *Hidrogeologia e hidrogeoquímica da região entre Porto e S. João da Madeira (NW de Portugal): implicações ambientais - plano de trabalhos de doutoramento*. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. 12 pp. (Relatório Inédito).
- ALMEIDA, A. (2001). Caracterização geoquímica e geocronológica do granito de duas micas sintectónico do Porto (NW de Portugal). In Lago M., Arranz E. & Galé C. (eds): *Proceedings III<sup>er</sup> Congreso Ibérico de Geoquímica/VIII<sup>o</sup> Congreso de Geoquímica de España*. Instituto Tecnológico de Aragón, Zaragoza. pp. 311-315.
- ALMEIDA, C. & OLIVEIRA, M. M. (1990). Caracterização hidráulica de aquíferos fracturados. In: *Livro de homenagem a Carlos Romariz*. Departamento de Geologia da FCUL, Lisboa. pp. 30-64.
- ALMEIDA, C. A. C. (1979). Programas para calculadoras de bolso com aplicações em hidrogeologia. *Bol. Museu e Lab. Min. e Geol. da Fac. de Ciências de Lisboa*, 16 (1): 101-122.
- ALMEIDA, C. A. C. (1981). Aplicações do cálculo automático à interpretação de ensaios de bombeamento. *Resumos das comunicações, II Encontro Nacional de Geociências*. Coimbra.
- ALMEIDA, C., OLIVEIRA, M. M. & RIBEIRO, T. (1992). Interpretação automática de ensaios de bombagem. *Geonovas*, Rev. Ass. Portg. Geólogos, Lisboa, 3: 64-82.
- ARAÚJO, M. A. (1991). *Evolução geomorfológica da plataforma litoral da região do Porto*. Departamento de Geografia, Faculdade de Letras da Universidade do Porto. 534 pp. + Vol. Anexos [87 pp.] (Tese de doutoramento).
- ARAÚJO, M. A. (1997). A plataforma litoral da região do Porto: dados adquiridos e perplexidades. *Estudos do Quaternário*, APEQ, 1: 3-12.
- BEGONHA, A. J. S. (2001). *Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto*. Coleção monografias, FEUP Edições, Porto, 2: 1-445. (Tese de doutoramento apresentada na Universidade do Minho).
- BEGONHA, A. & BRAGA, M. A. S. (1995). A meteorização do Granito do Porto. In: Borges, F. S. & Marques, M. (eds): *IV Congresso Nacional de Geologia. Mem. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciênc. Univ. Porto*, 4: 171-175.
- CABRAL, J. (1995). Neotectónica em Portugal Continental. *Mem. Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 31: 1-265.
- CARRINGTON DA COSTA, J. & TEIXEIRA, C. (1957). *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. Notícia explicativa da Folha 9-C (Porto)*. Serv. Geol. Portg.. Lisboa. 38 pp.
- CARVALHO, J. M. (1984). A metodologia de prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em formações cristalinas e cristalofilinas portuguesas. In: *Volume d'Homage au Géologue G. Zbyszewski*, Ed. Recherche sur les Civilizations, Paris. pp. 137-153.
- CARVALHO, J. M. (1996). Mineral water exploration and exploitation at the Portuguese Hercynian massif. *Environmental Geology*, 27: 252-258.
- CARVALHO, J. M. (2001). As águas subterrâneas no abastecimento de núcleos urbanos no norte de Portugal. *Tecnologia da água*, Barcelona, 4 (1): 4-18.
- CARVALHO, J. M. & CHAMINÉ, H. I. (2000). O papel da fracturação e da alteração profunda em estudos de prospecção e pesquisa hidrogeológicas: exemplos das regiões de Oliveira de Azeméis e de Fafe (Maciço Cristalino, NW de Portugal). In: *Volume das Apresentações Científicas, 6<sup>a</sup> Conferência Anual do GGET*, Universidade de Évora. pp. 38-45.
- CARVALHO, J. M., LIMA, J. M. & GUEDES, J. F. (1985). Captações de água em formações graníticas da área do Porto. *Bol. Soc. Geol. Portg.*, Lisboa, 24: 305-312.
- CARVALHO, J. M.; PLASÊNCIA, N.; CHAMINÉ, H. I.; RODRIGUES, B. C.; DIAS, A. G. & SILVA, M. A. (2000). Recursos hídricos subterrâneos em formações cristalinas do Norte de Portugal. In: Samper, J.; Leitão, T;

- Fernández, L. & Ribeiro, L., (eds.), *Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica'*. Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones, A Coruña. AIH-GE/APRH. Publicaciones ITGE, Madrid. pp. 163-171.
- CARVALHO, M. R. & ALMEIDA, C. (1989). HIDSPEC, um programa de especiação e cálculo de equilíbrios água/rocha. *Geociências*, Aveiro, 4 (2): 1-22.
- CHAMINÉ, H. I. (2000). *Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de Espinho –Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa-Morena): implicações geodinâmicas*. Universidade do Porto. 497 pp., 2 anexos, 3 mapas. (Tese de doutoramento).
- CHAMINÉ, H. I.; CARVALHO, J. M. & FONSECA, P. E. (1999). O ramo oeste do carreamento de S. João-de-Ver: estudos de cartografia estrutural e de hidrogeologia no sector de Santiago de Riba-Ul-Oliveira de Azeméis (faixa metamórfica de Espinho–Albergaria-a-Velha, NW de Portugal). *GEOlogos*, Porto, 5: 57-65.
- CHAMINÉ, H. I.; FONSECA, P. E.; ROCHA, F. T.; MOÇO, L. P.; FERNANDES, J. P.; FLORES, D.; GAMA PEREIRA, L. C.; GOMES, C.; LEMOS DE SOUSA, M. J. & RIBEIRO, A. (2000). Unidade de Albergaria-a-Velha (faixa de cisalhamento de Porto–Tomar–Ferreira do Alentejo): principais resultados de um estudo geológico pluridisciplinar. *Geociências*, Aveiro, 14 (1/2): 47-54.
- CHAMINÉ, H. I.; LETERRIER, J.; FONSECA, P. E.; RIBEIRO, A. & LEMOS DE SOUSA, M. J. (1998). Geocronologia U/Pb em zircões e monazites de rochas ortoderivadas do sector Espinho–Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa Morena, NW de Portugal). *Comun. Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 84 (1): B115-B118.
- CHAMINÉ, H. I.; GAMA PEREIRA, L. C.; FONSECA, P. E.; MOÇO, L. P.; FERNANDES, J. P.; ROCHA, F. T.; FLORES, D.; PINTO DE JESUS, A.; GOMES, C.; SOARES DE ANDRADE, A. A. & ARAÚJO, A. (2003). Tectonostratigraphy of middle and upper Palaeozoic black shales from the Porto–Tomar–Ferreira do Alentejo shear zone (W Portugal): new perspectives on the Iberian Massif. *GEOBIOS*, Springer-Verlag. (in press).
- CONDE, L. N. (1983). *Mapa de fracturas de Portugal (Memória descritiva)*. EDP. 118 pp., 4 mapas. (Relatório inédito)
- CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. R. (1983). *Hidrología subterránea*. Ed. Omega, 2 tomos, Barcelona, 2359 pp.
- FERREIRA, J. P. C. L. & OLIVEIRA, M. (1993). *Desenvolvimento de um inventário das águas subterráneas de Portugal. Caracterização dos recursos hídricos subterráneos e mapeamento DRASTIC da vulnerabilidade dos aquíferos de Portugal*. LNEC, relatório nº 179/93-GIAS, Lisboa.
- FERREIRA, N.; IGLÉSIAS, M.; NORONHA, F.; PEREIRA, E.; RIBEIRO, A. & RIBEIRO, M. L. (1987). Granitóides da Zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: F. Bea; A. Carnicero; J. C. Gonzalo; M. López Plaza & M. D. Rodríguez Alonso (eds.). *Geología de los granitóides y rocas asociadas del Macizo Hespérico, Libro de Homenaje a L. C. García de Figuerola*. Editorial Rueda. Madrid. pp. 37-51.
- GOMES, A. A. & BARRA, A., 2001. Morfologia e cobertura detrítica da plataforma litoral na área de Albergaria-a-Velha (Distrito de Aveiro). *Estudos do Quaternário, APEQ*, 4: 7-14.
- HERAS, R. ((1976). *Hidrología y recursos hidráulicos*. Dirección General de Obras Hidráulicas, nº 120, tomo 1, Madrid, 839 pp.
- KRUSEMAN, G. P. & RIDDER, N. A. (1990). *Analysis and evaluation of pumping test data*. 2<sup>nd</sup> edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement, publication 47: 377 pp.
- LENCASTRE, A. & FRANCO, F. M. (1992). *Lições de Hidrologia*. 2<sup>a</sup> edição. Universidade Nova de Lisboa, 453 pp.
- LIMA, A. (1994). *Hidrogeologia de regiões graníticas (Braga - NW Portugal)*. Universidade do Minho Braga, 202 pp. (tese de mestrado)
- LOTZE, F. (1945). Zur gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. *Geotekkt. Forsch.*, Berlin, 6: 78-92 [trad. J. M. Rios, 1950. Observaciones respecto a la división de los variscides de la Meseta Ibérica. *Inst. L. Mallada, Pub. Extr. Geol. España*, 5 (27): 149-166].
- MARTÍN-SERRANO, A. (1994). Macizo Hespérico septentrional. In: M. Gutiérrez Elorza (ed.). *Geomorfología de España*. Editorial Rueda, Madrid. pp. 25-62.
- MONTEIRO, A. (1989). Contribuição para o estudo da degradação da qualidade do ar na cidade do Porto. *Geografia*, Rev. Fac. Letras, Porto, 5 (1<sup>a</sup> série): 5-31.

- MONTEIRO, A. (1997). *O clima urbano do Porto: contribuição para a definição das estratégias de planeamento e ordenamento do território*. Textos Universitários de Ciências Sociais e Humanas. Fundação Calouste Gulbenkian/Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica. 486 pp. (tese de doutoramento).
- NORONHA, F. & LETERRIER, J. (2000). Complexo metamórfico da Foz do Douro (Porto). *Geoquímica e geocronologia. Bol. Real Acad. Galega Ciencias*, Santiago de Compostela, 19: 21-42.
- OLIVEIRA, M. M. (1990). AQFIS - Um programa para gerar curvas rebaixamento/tempo para aquíferos fracturados. *Geolis*, Lisboa, IV (1, 2): 97-107.
- OLIVEIRA, J. T.; PEREIRA, E.; RAMALHO, M.; ANTUNES, M. T. & MONTEIRO, J. H. [coords.] (1992). *Carta Geológica de Portugal, escala 1/500000*, 5ª edição. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. (2 folhas).
- O.M.M. – ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (1970). *Guía de prácticas hidrometeorológicas*. 2ª edición. Ginebra (Suiza).
- PEDROSA, M. Y. [coord.] (1998). *Carta Hidrogeológica de Portugal, escala 1/200000. Folha 1*. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- PEDROSA, M. Y. (1999). *Notícia explicativa da Carta Hidrogeológica de Portugal, à escala 1/200000. Folha 1*. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa. 70 pp.
- PEREIRA, E.; RIBEIRO, A.; CARVALHO, G. S.; NORONHA, F.; FERREIRA, N. & MONTEIRO, J. H. [coords.] (1989). *Carta Geológica de Portugal, escala 1/200000. Folha 1*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- PEREIRA, M. R. (1992). Importância dos filonetes de quartzo na pesquisa de água subterrânea em rochas cristalinas. *Geolis*, Lisboa, 6 (1/2): 46-52.
- PEREIRA, M. R. (1999). *Hidrogeologia das rochas fracturadas da Terra Quente Transmontana*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. 299 pp. (Tese de doutoramento).
- PINTO DE JESUS, A. (2001). *Génese e evolução da Bacia Carbonífera do Douro (Estefaniano C inferior, NW de Portugal): um modelo*. Universidade do Porto. Vol. Texto: 272 pp., Vol. Atlas: 71 pp. (Tese de doutoramento).
- RIBEIRO, A. (1988). A tectónica Alpina em Portugal. *Geonovas*, Rev. Assoc. Portg. Geólogos, Lisboa, 10: 9-11.
- RIBEIRO, A. (2002). *Soft plate and impact tectonics*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 324 pp.
- RIBEIRO, A.; ANTUNES, M. T.; FERREIRA, M. P.; ROCHA, R. B.; SOARES, A. E.; ZBYSZEWSKI, G.; ALMEIDA, F. M.; CARVALHO, D. & MONTEIRO, J. H. (1979). *Introduction à la géologie générale du Portugal*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 114 pp.
- RIBEIRO, A.; KULLBERG, M.C.; KULLBERG, J. C.; MANUPPELLA, G. & PHIPPS, S. (1990a). A review of Alpine Tectonics in Portugal: Foreland detachment in basement and cover rocks. *Tectonophysics*, 184: 357-366.
- RIBEIRO, A.; QUESADA, C. & DALLMEYER, R.D. (1990b). Geodynamic evolution of the Iberian Massif. In: Dallmeyer, R. D. & Martínez-García, E. (eds.). *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. pp. 397-410.
- RIBEIRO, A.; MARCOS, A.; PEREIRA, E.; LLANA-FÚNES, S.; FARIAS, P.; FERNANDÉZ, F. J.; FONSECA, P. E.; CHAMINÉ, H. I. & ROSAS, F. (2003). 3-D strain distribution in the Ibero-Armorican Arc: a review. *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, N° Esp. V (CD-Rom): D62-D63.
- SERRANO PINTO, M.; CASQUET, C.; IBARROLA, E.; CORRETEGÉ, L.G. & FERREIRA, M. P. (1987). Síntese geocronológica dos granitóides do Maciço Hespérico. In: Bea, E.; Carnicero, A.; Gonzalo, J. C.; López Plaza, M. & Rodríguez Alonso, M. D. (eds). *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hesperico, Libro de Homenaje a L. C. García de Figuerola*. Editorial Rueda, Madrid. pp. 69-86.
- SHAW, E. M. (1988). *Hydrology in practice*, 2nd edition. London, Chapman & Hall, 539 pp.
- SOARES DE CARVALHO, G. (1992). Depósitos quaternários e cenozóico indiferenciado. In: Pereira, E. (Coord.), *Carta Geológica de Portugal na escala 1/200000. Notícia Explicativa da Folha 1*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. pp. 47-50.
- STRAHLER, A. N. (1979). *Geografía física*. 4ª edición. Ediciones Omega, Barcelona, 767 pp.
- VELHAS, E. (1991). A bacia hidrográfica do Rio Leça: estudo hidroclimatológico. *Geografia*, Rev. Fac. Letras, Porto, 7 (1ª série): 139-251.
- VRBA, J. & ZAPOROZEC, A., (eds.) (1994). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. In: International Association of Hydrogeologists. International Contributions to Hydrogeology, 16: 1-131.