

ÁGUA E TERRITÓRIO

UM TRIBUTO A
CATARINA RAMOS



CEG

Centro de Estudos Geográficos

ESTUDO DOS HIDROSSISTEMAS CÁRSICOS A PARTIR DA ANÁLISE DA CURVA DE RECESSÃO. DISCUSSÃO COM BASE NA EXSURGÊNCIA DOS OLHOS D'ÁGUA DO ANÇOS (POMBAL, PORTUGAL)

Isabel Paiva¹

Lúcio Cunha¹

Resumo

A água que sai através de uma nascente cársica traz impresso tudo o que ocorre dentro de um hidrossistema. A descarga através do exutório representa, pois, uma integração dos processos de recarga, armazenamento e circulação subterrânea que ocorrem a montante. A análise do hidrograma, e em particular da curva de recessão, permite o conhecimento do funcionamento hidrológico de um hidrossistema e, por conseguinte, a identificação das características físicas internas do próprio maciço cársico. Esta informação, obtida através do comportamento da água de uma nascente cársica é particularmente relevante em hidrossistemas cársicos cuja estrutura interna é praticamente desconhecida, como é o caso em estudo. Neste trabalho, analisaremos o caudal diário médio da exurgência dos Olhos d'Água do Anços (OAA), o principal exutório do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó ao longo de 7 anos hidrológicos (2009/10 – 2015/16), de características hidrometeorológicas bastante heterogêneas. A aplicação do método quantitativo desenvolvido por Mangin (1975) no estudo da curva de recessão, analisando em simultâneo os mecanismos de circulação subterrânea e de armazenamento e esvaziamento, permitiu entender melhor a dualidade que caracteriza o funcionamento hidrogeológico do hidrossistema em estudo, nos processos de circulação ao longo da zona não-saturada, nas componentes *quickflow* e *baseflow* no caudal dos OAA, no tempo de residência da água na zona saturada e o poder regulador da mesma.

Palavras-Chave: hidrossistema cársico; exurgência; curva de recessão, *quickflow*; *baseflow*.

1. Introdução

As características hidrogeológicas e o funcionamento hidrodinâmico dos sistemas cársicos são profundamente complexos e de uma enorme especificidade, o que os torna substancialmente diferentes dos sistemas desenvolvidos em meios porosos e fracturados. A principal particularidade daqueles hidrossistemas é a presença de um terceiro tipo de permeabilidade (o sistema de condutas) com elevada condutividade hidráulica.

¹ Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, Departamento de Geografia e Turismo da Universidade de Coimbra. isabelrp@ci.uc.pt; luciogeo@fl.uc.pt

O desenvolvimento de uma rede subterrânea irregular e interconectada de poros, fissuras, fracturas e condutas de diferentes formas e dimensões incute aos hidrossistemas cársicos uma extrema heterogeneidade e uma forte anisotropia quando comparados com outros tipos de aquíferos, provocando condições hidráulicas complexas e uma forte variabilidade espacial e temporal dessas condições (Taylor e Greene, 2008).

As dificuldades e as restrições que se colocam, em termos metodológicos, no estudo destes meios tão específicos (Goldscheider e Drew, 2007; Goldscheider, 2015), fazem da análise das respostas das surgências um método apropriado, fiável e de relativa simplicidade na compreensão dos processos hidrodinâmicos que aí ocorrem. Os estudos quantitativos sobre os processos físicos no interior do hidrossistema ainda são um desafio, uma vez que estes são sistemas complexos, difíceis de explorar, caracterizar e quantificar. O hidrossistema cársico é, neste método, considerado como uma ‘caixa-negra’ e é estudado numa perspectiva funcional, sendo caracterizado a partir das suas respostas naturais mediante métodos indirectos como a análise de séries temporais (Mangin, 1975; Padilla e Pulido-Bosch, 1995; Larocque *et al.*, 1998; Panagopoulos e Lambrakis, 2009; Kovacic, 2010), a análise hidroquímica (Raeisi e Karami, 1997; Birk *et al.*, 2004; Mudarra e Andreo, 2010; Bicalho *et al.*, 2012) e a análise da curva de recessão (Bonacci, 1993; Baedke e Krothe, 2001; Amit *et al.*, 2002; Geyer *et al.*, 2008; Fiorillo, 2011).

Não obstante algumas limitações que apresenta, a análise do hidrograma, enquanto resposta do hidrossistema a um evento de recarga, possibilita a obtenção de informação valiosa sobre parâmetros hidráulicos, características do escoamento e propriedades físicas internas dos sistemas cársicos (Eisenlohr *et al.*, 1997; Kiraly *et al.*, 1995; Birk *et al.*, 2004; Kovacs *et al.*, 2005; Birk *et al.*, 2006; Florea e Vacher, 2006; Kovács e Perrochet, 2008; Covington *et al.*, 2009; Doummar *et al.*, 2012; Malík e Vojtková, 2012; Chang *et al.*, 2015). Estes trabalhos, e particularmente os que se realizam em hidrossistemas pouco conhecidos (em que a quantidade de informação e de recursos é reduzida) mostram como a análise do hidrograma, e em particular da curva de recessão, constitui um método muito vantajoso e credível. Os custos não muito elevados de obtenção de dados numéricos, a necessidade de poucos parâmetros para análise e o fornecer informação sobre as propriedades hidrodinâmicas do hidrossistema no seu todo, são algumas das suas vantagens.

A forma do hidrograma de uma nascente cársica, não obstante a influência da precipitação, reflecte a alteração do sinal de *input* ao longo da sua propagação no interior do hidrossistema, sendo, por isso, considerado como uma transcrição da estrutura, do funcionamento hidrodinâmico, de parâmetros hidráulicos e das reservas do hidrossistema (Soulios, 1991; Bonacci, 1993; Padilla *et al.*, 1994; Amit *et al.*, 2002; Fiorillo, 2014). Um hidrograma caracterizado por picos pronunciados, no seguimento de um abundante evento de recarga, indica a existência de entrada concentrada de água, uma rede organizada de condutas, circulação rápida, evidenciando um hidrossistema bastante carsificado. Em contrapartida, um hidrograma de formato suave, sem picos acentuados

de escoamento (raros e de pouca expressão,) revela ou um hidrossistema pouco carsificado onde a rede de condutas é pouco desenvolvida ou um hidrossistema carsificado mas onde o sistema de condutas é pouco conectado e muito pouco funcional.

Durante a recessão, a zona do hidrossistema que se acredita estar envolvida é a saturada, sendo a zona não-saturada praticamente negligenciada. A análise da recessão é normalmente conduzida sem se considerarem os processos de recarga, uma vez que o principal propósito é obter informação sobre a capacidade de armazenamento e o processo de esvaziamento da água acumulada no hidrossistema para compreensão do comportamento hidráulico do mesmo e prever o escoamento em situações, por exemplo, de seca (Fiorillo, 2009; Fiorillo *et al.*, 2012). No entanto, é amplamente reconhecido que a primeira parte da recessão (*curva de decrescimento*) é profundamente influenciada pela água proveniente de um evento de recarga recente que, quase sempre, atinge a zona saturada e influencia o escoamento das exurgências passado algum tempo. Apenas a última parte da recessão (*curva de esgotamento*), a mais estável do hidrograma, pode ser considerada como não sendo influenciada por episódios de recarga.

Vários autores têm, contudo, sublinhado que a parte inicial da recessão se desvia claramente do decréscimo exponencial da fórmula de Maillet (1905), traduzido num único coeficiente de recessão α . Para alguns, a recessão é um conjunto de funções exponenciais representando diferentes componentes do hidrossistema, com diferentes características e com diferentes dimensões (condutas de elevada condutividade, fracturas alargadas, fissuras conectadas, poros e fissuras estreitos e isolados - Forkasiewicz e Paloc, 1967; Sauter, 1992; Baedke e Krothe, 2001, Hergarten e Birk, 2007; Kovács e Perrochet, 2008). Segundo outros autores, o comportamento não-exponencial da parte inicial do hidrograma é interpretada em termos dos processos de infiltração (Mangin, 1975; Atkinson, 1977; Padilla *et al.*, 1994; Chang *et al.*, 2015).

Neste estudo, tendo presente o factor limitativo do hidrossistema cársico de Degraçias-Sicó ser muito pouco conhecido, adoptaremos esta segunda interpretação da curva de recessão. Considerando que aquela se pode dividir em duas partes, procuraremos, através do primeiro sector, compreender a circulação hipogeia e com base no segundo, e mais prolongado sector da curva de recessão, tentaremos analisar e quantificar as reservas do hidrossistema que alimentam as exurgências durante os meses secos. O método escolhido para esta análise é o proposto por Mangin (1975), um método semi-quantitativo que possibilita, em simultâneo, a caracterização das condições de infiltração na zona não-saturada e de armazenamento e esvaziamento da zona saturada, bem como a identificação do nível de carsificação interno do hidrossistema. Este método define também dois parâmetros – a demora da infiltração, i , e o poder regulador, k – que permitem a classificação dos hidrossistemas cársicos. Este método, amplamente testado em hidrossistemas cársicos de Espanha e França, que o validaram, assume-se como o de utilização mais fácil e o mais apropriado para identificar a eficiência cársica no funcionamento dos hidrossistemas carbonatados (El-Hakim e Bakalowicz, 2007).

Assim, na impossibilidade de realização de medições hidrogeológicas em poços ou outros pontos de observação directa no hidrossistema em estudo, a análise do hidrograma do principal exutório, e em particular da curva de recessão, constitui um meio privilegiado no estudo introdutório do seu funcionamento hidrogeológico geral e, consequentemente, no inferir das suas propriedades internas.

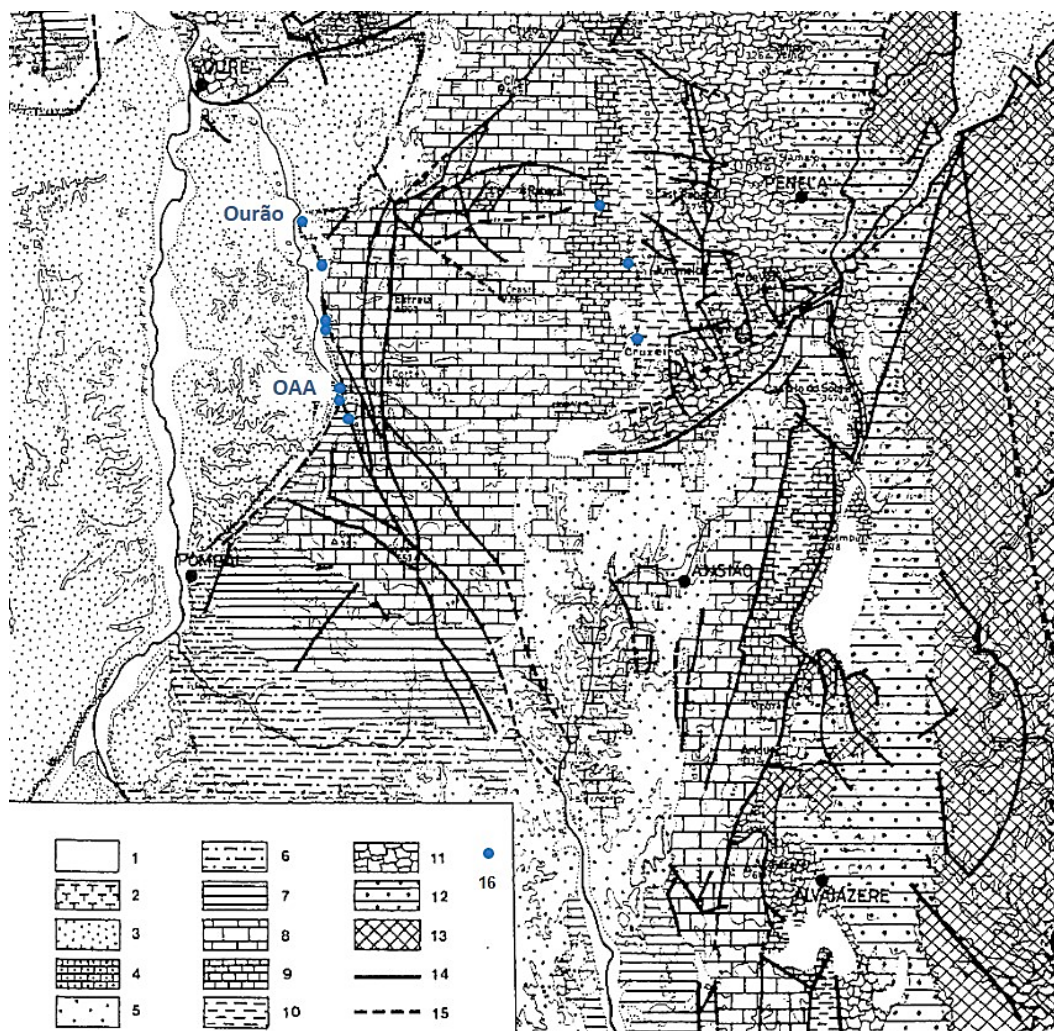
O estudo que aqui apresentamos tem por base o caudal diário médio da exurgência dos Olhos d'Água do Anços, durante o período de recessão em 7 anos hidrológicos (2009/10 – 2015/2016) compreendendo condições hidrometeorológicas bastante diferenciadas. Durante este curto período, verificam-se desde anos bastantes secos a anos húmidos, o que possibilitou uma análise bastante completa do comportamento hidrodinâmico do referido hidrossistema.

2. Área de estudo

A exurgência Olhos d'Água do Anços (OAA), de carácter permanente, é o principal exutório do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó, situando-se no alinhamento de exurgências temporárias e permanentes da sua bordadura oeste, entre os 70 e os 45 metros de altitude. Estas exurgências, que marginam a parte oeste do hidrossistema, surgem associadas a uma densa fracturação submeridiana que ajuda a explicar o alinhamento deste conjunto de nascentes cársicas, situadas no contacto dos calcários do Dogger com os materiais gresosos ocidentais mais recentes (vale do rio Arunca) – Figuras 1 e 2.

Os OAA, juntamente com a exurgência do Ourão, são responsáveis, no período invernal, pela drenagem de cerca de 70% de toda a água que circula no hidrossistema, valor que passa para mais de 90% no período de Junho a Outubro, valores que se justificam pela drenagem hipogeia se processar de leste para oeste, acompanhando o pendor das camadas (por si só orientador do escoamento).

O hidrossistema cársico de Degracias-Sicó localiza-se na região centro-litoral de Portugal e corresponde à quase totalidade do Maciço Calcário de Sicó, um dos mais importantes sistemas carbonatados e carsificados da Orla Meso-Cenozóica Ocidental. Integra o complexo hidrossistema cársico Sicó-Alvaiázere, correspondendo a grande parte da sua metade setentrional, numa área total de cerca de 100 Km².



Legenda: 1- Formações superficiais (essencialmente Quaternário); 2 – Tufos calcários (Quaternário); 3 – Grés e argilas (Cretácico sup. a Pliocénico); 4 – “Calcários apinhoados da Costa de Arnes” (Cretácico médio); 5 – “Arenitos de Carrascal” (Cretácico inf.); 6 – Arenitos finos (Kimeridgiano-Portlandiano); 7 – Calcários margosos e margas (Oxfordiano- Kimeridgiano); 8 – Calcários (Bajociano-Batoniano); 9 – Calcários margosos (Aaleniano); 10 – Margas e calcários margosos (Liásico médio e sup.); 11 – Dolomias e calcários dolomíticos (Liásico inf.); 12 – “Grés de Silves” (Triásico-Hetangiano); 13 – Rochas predominantemente xistosas (Precâmbrio e Paleozóico); 14 – Falha; 15 – Falha provável; 16 – Principais exurgências da metade setentrional do hidrossistema de Sicó-Alvaiázere (falta Arrifana e Alcabideque, no extremo norte).

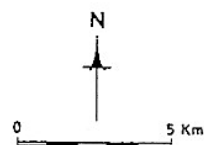


Figura 1. Esboço litológico e tectónico da região onde se insere a área de estudo (adaptado de Cunha, 1989).

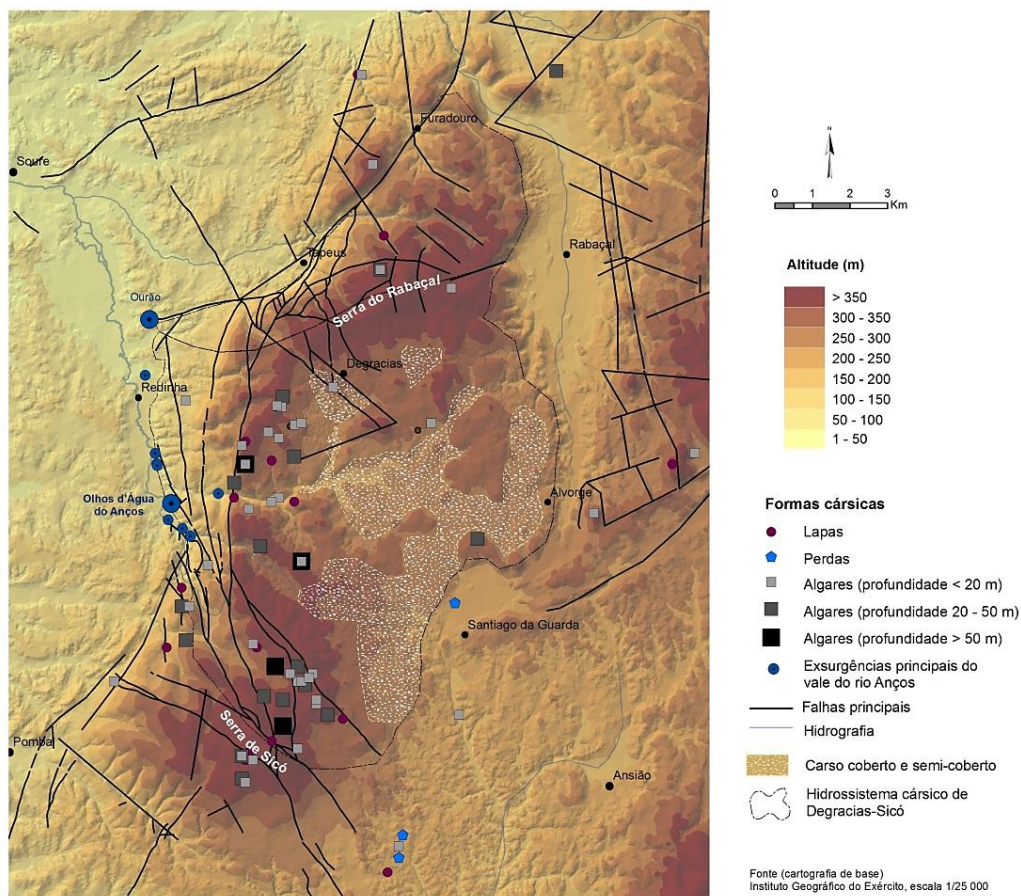


Figura 2. Principais falhas, formas cársticas de profundidade e áreas cobertas total ou parcialmente por depósitos (carso coberto e semi-coberto) na área de estudo.

Topograficamente, ocupa um conjunto de relevos que se salientam na topografia regional e que compreende as Serras de Sicó (a sul, 553 m) e do Rabaçal (a norte, 532 m) e, entre elas, o Planalto de Degracias-Alvorje, superfície irregular que se desenvolve a cotas entre os 280 e os 350 m (Figura 2). O carácter aplanado de grande parte do Planalto favorece a infiltração, aspecto que, conjugado com as características lito-estruturais e os retoques cársticos desta área, promove a entrada de uma enorme quantidade de água para o domínio subterrâneo.

O Maciço de Sicó e, particularmente, o seu hidrossistema Degracias-Sicó é constituído essencialmente por calcários do Jurássico Médio com uma disposição monoclinal com fraca inclinação para Oeste. Enquanto o limite oriental se relaciona com a passagem das margas liásicas para os calcários do Jurássico Médio, a bordadura ocidental corresponde a um conjunto de falhas normais que estabelecem uma escadaria tectónica que limita o

Maciço, pondo-o em contacto com os sedimentos detríticos cretácicos e cenozoicos (Figura 1). A Norte, a Serra do Rabaçal corresponde um braquianticlinal associado pelo seu flanco norte a um conjunto de falhas inversas. O núcleo margoso deste anticlinal corresponde ao limite setentrional do hidrossistema. A sul, um conjunto de acidentes NW-SE compartimentam e limitam o maciço na sua passagem para as formações calcomargosas do Jurássico Superior.

A longa e complexa evolução geomorfológica da área levou a um processo de deposição de materiais detríticos cretácicos e à sua posterior remobilização ao sabor das vicissitudes tectónicas regionais, estando ainda hoje grande parte de Planalto de Degracias Alvorge recoberto por depósitos cretácicos (Arenitos da Figueira da Foz) e pelos chamados depósitos poligénicos vermelhos, deles derivados (Cunha, 1989), facto que condiciona e compromete todo o processo de recarga no planalto.

O clima desta região é tipicamente mediterrânico, com ligeira interferência do factor relevo, que diminui a temperatura e aumenta a precipitação), sendo o período de Novembro a Março o mais chuvoso e frio, contrariamente ao período mais seco e quente que se estende de Junho a Setembro. Os quantitativos anuais de precipitação anual rondam os 1200 mm, valor calculado tendo por base a estação meteorológica de Degracias, do SNIRH, no período 1979/80 - 2015/16. O período mais chuvoso estende-se de Novembro a Fevereiro, sendo Janeiro o mês com totais mais elevados enquanto os meses mais secos são Julho e Agosto (Figura 3).

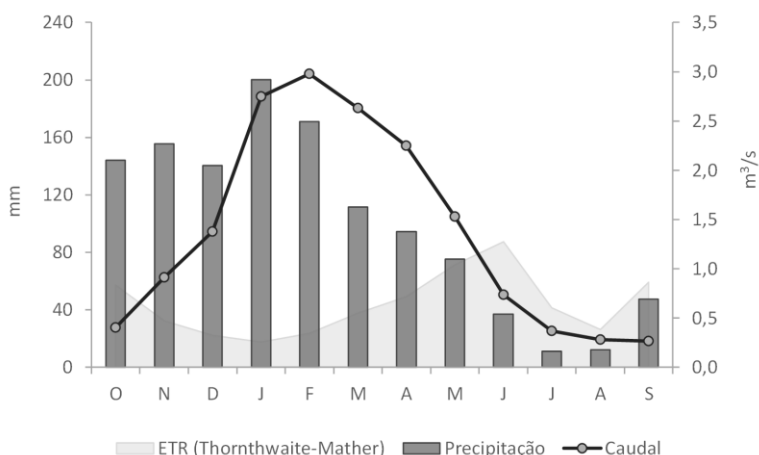


Figura 3. Variação mensal da evapotranspiração real, da precipitação mensal média (1979/80 – 2015/2016) com base nos registos da estação de Degracias (SNIRH) e do caudal mensal médio (2009/10 – 2015/16) na exsurgência Olhos d'Água do Anços.

A evapotranspiração real (ETR), calculada a partir do método sequencial de Thornthwaite-Mather, apresenta valores muito baixos no período de Novembro a Março, em função das temperaturas baixas da região, acentuadas pela altitude.

De acordo com Paiva (2015), a recarga anual, em termos médios, rondará os 700 mm (cerca de 58% dos 1200 mm anuais de precipitação nesta área), embora possa variar substancialmente consoante os quantitativos de precipitação anual. A nível mensal, a recarga decalca fielmente o ritmo da precipitação, podendo atingir mais de 80% da precipitação mensal no período de Novembro a Março. A recarga é totalmente autógena, sendo favorecida pelas características geomorfológicas da área, designadamente a sua planura, a ampla bacia morfo-estrutural que ocupa uma grande extensão de parte central da área de recarga e a existência de um vasto número de formas cársticas que promovem a infiltração (difusa através dos lapíais e pontualmente concentrada através da abertura superficial dos algares).

As características geomorfológicas e tectónicas são igualmente responsáveis pela distribuição espacial da recarga que é máxima ao longo de uma estreita faixa arqueada que se estende desde a Serra do Rabaçal, a norte, até à Serra de Sicó, a sul, e que abrange todo o bordo ocidental, profundamente fracturado e com um elevado número de formas cársticas que promovem a infiltração, em alguns pontos concentrada (Figura 3). Contrariamente, os valores são mínimos e a recarga tem um carácter totalmente difuso e lento em extensas áreas da parte central e oriental do Planalto Degraças-Alvorge, cobertas por depósitos de reduzida permeabilidade.

A descarga ocorre, em grande medida, através das exsurgências da bordadura oeste, grande parte de carácter permanente, onde se inclui os OAA. O hidrograma desta exsurgência é bastante pontiagudo (Figura 4), mostrando o aumento abrupto e relativamente rápido do caudal em resposta à ocorrência de elevados quantitativos de precipitação, característica típica de hidrossistemas bastante carsificados. O caudal anual médio é 1,37 m³/s, variando entre valores diários médios superiores a 5 m³/s, que ocorrem normalmente no início da Primavera, após vários meses de recarga, e valores inferiores a 0,2 m³/s, registos mínimos do final do ano hidrológico.

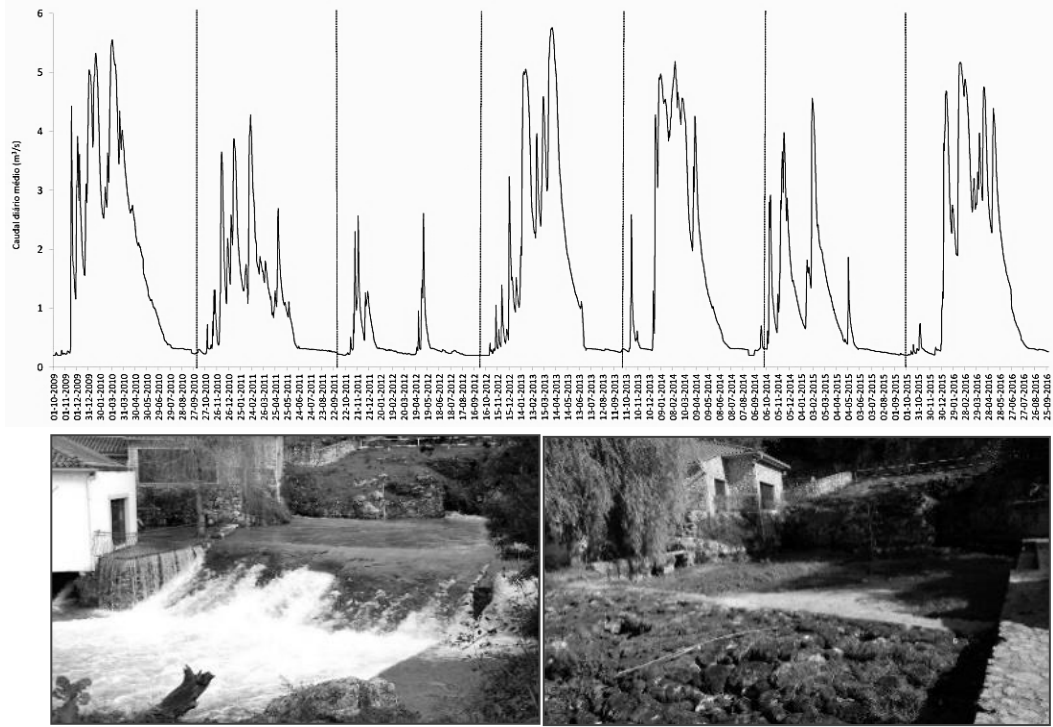
3. Metodologia e dados

A análise quantitativa da curva da recessão de um hidrograma deriva dos trabalhos de Boussinesq e de Maillet datados do início do século XX (Tallaksen, 1995; Dewandel *et al.*, 2003), segundo os quais o escoamento de uma nascente é uma função da quantidade de água armazenada no interior do próprio hidrossistema, assumindo que este seria poroso, homogéneo, isotrópico e não-confinado (Ford e Williams, 2007). Segundo Maillet (1905), a recessão ajustava-se a uma única curva exponencial, assumindo a existência de um único reservatório, de acordo com a fórmula:

(1)

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

em que, Q_t é o caudal num tempo t e Q_0 é o caudal no início da fase de esgotamento e α é o coeficiente de recessão, normalmente expresso em dias (dias^{-1}).



21/01/2013 14:19 Caudal instantâneo: 4,9 m³/s 19/10/2009 12:31 Caudal instantâneo: < 0,2 m³/s
 Figura 4. Hidrograma representando o caudal diário médio, em m³/s, da exsurgência Olhos d'Água do Anços de 2009/10 a 2015/2016. Imagens da exsurgência em situação de cheia (Janeiro de 2013) e de estiagem (Outubro de 2009).

A heterogeneidade dos hidrossistemas cársticos não consegue, porém, ser transcrita apenas por uma curva exponencial, pelo que a formulação anterior foi sendo substituída por aquela que considerava a curva de recessão como o somatório de múltiplas exponenciais, interpretadas como representativas do contributo de diferentes reservatórios individuais (Forkasiewicz e Paloc, 1967; Sauter, 1992; Baedke e Krotke, 2001; Amit *et al.*, 2002; Kovács, 2003; Kiraly, 2003; Kovács *et al.*, 2005; Kovács e Perrochet, 2008), segundo a equação:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^N Q_{0i} e^{-\alpha_i t} \quad (2)$$

sendo N o número de exponenciais, t o tempo, Q_{0i} o caudal no início da recessão ($t = 0$) e α_i os coeficientes de recessão para cada exponencial. De acordo com esta perspectiva, a curva de recessão pode ser decomposta em vários segmentos (cada um com a sua função exponencial e respectivo coeficiente de recessão α). Na sua interpretação, estas diferentes exponenciais representam o esvaziamento de diferentes reservatórios, com propriedades hidráulicas específicas. Alguns dos estudos acima mencionados, particularmente os de Kovács (2003) e Kovács *et al.* (2005) mostram que a curva de recessão se pode dividir num número infinito de exponenciais, embora só três sejam significativamente representativas do caudal total da exurgência, o que explica que, normalmente, surjam apenas três funções exponenciais na análise da curva de recessão (Kovács e Perrochet, 2008).

A interpretação usual para a mudança de valor de α é a de que o primeiro e mais acentuado declive (*flood recession*) representa a transmissão do impulso da água de recarga (após tempestade) através das condutas. Segue-se-lhe uma mudança para um declive menos acentuado (declive de recessão intermédio – *depletion recession*) entendido como o início da diminuição do impulso da recarga pós-tempestade e em que a descarga da surgência é, portanto, uma mistura dessa água, recentemente infiltrada, com água subterrânea, descarregada por pequenas condutas e grandes fracturas. A última mudança no declive da curva de recessão (*baseflow recession*) assinala o retomar das condições de escoamento de base, sendo o caudal das surgências composto por água armazenada no hidrossistema. As simulações de Eisenlohr (1996), Eisenlohr *et al.* (1997) e Cornaton (1999) concluíram que o aumento na condutividade da rede de condutas resulta na subida dos valores de α . Para além disso, um aumento simultâneo do armazenamento tanto na matriz rochosa quanto na rede de condutas origina a diminuição do coeficiente de recessão. Deste modo, comprovou-se que o coeficiente de recessão depende não só das propriedades hidráulicas da matriz rochosa, mas também de parâmetros hidráulicos e geométricos do sistema de condutas, até então negligenciados (Kovács *et al.*, 2005; Chang *et al.*, 2015).

3.1 O método de Mangin

Mangin (1975) considerou que a análise da curva de recessão deveria ter por base a sua divisão em duas partes, caracterizando, em simultâneo, as condições de recarga (infiltração profunda ao longo da zona não-saturada) e de armazenamento e esvaziamento da zona saturada. A fase de decrescimento da curva traduzia o efeito da recarga no comportamento do caudal, reflectindo as condições de circulação na zona não-saturada (escoamento rápido), representadas pela função Ψ_t . A fase de esgotamento (escoamento de base), relacionada com o esvaziamento da zona saturada não tinha qualquer tipo de influência da recarga, sendo expressa pela função Φ_t .

O autor partiu da hipótese inicial que considera a função Φ_t como indicadora, essencialmente, do esvaziamento da zona saturada e a função Ψ_t como representando a infiltração ao longo da zona não-saturada, moderada pela sua passagem pelo carso molhado (Padilla *et al.*, 1994). O caudal escoado num determinado momento (Q_t) é a soma dos valores obtidos para as funções Φ_t e Ψ_t (equação 3). A função Φ_t é descrita pela equação (1), quando a água de infiltração recente se torna negligenciável ($t > t_i$). O valor de t_i (duração da infiltração profunda, em dias) é obtido pela expressão $1/\eta$. O parâmetro η integra a fórmula empírica de onde se obtém Ψ_t que representa o primeiro segmento da curva de recessão. A função Ψ_t é definida entre t_0 e t_i através da equação (4):

$$Q_t = \Phi_t + \Psi_t \quad (3)$$

$$\psi_t = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \varepsilon t} \quad (4)$$

em que q_0 é a diferença entre o pico de caudal (Q'_0 num tempo t_0 , início da recessão) e o caudal no início do esgotamento (Q_{R0} num tempo t_i). η (em dias) representa a velocidade da infiltração profunda e ε (em dias) a concavidade da curva de recessão, representando a capacidade moderadora da zona não-saturada sobre a infiltração. Quanto menor o valor de η , mais lenta é a infiltração profunda (variação entre 0 e 1). No caso do parâmetro ε quanto mais elevado o valor, maior o predomínio da circulação rápida. Quando a circulação é muito lenta, os valores de ε são inferiores a 0,01 enquanto que entre 1 e 10 revelam predomínio claro da circulação rápida (Ford e Williams, 2007). Tratando-se de um parâmetro que traduz a atenuação da velocidade de circulação com o tempo em função das características do hidrossistema cársico, quanto maior o valor de ε mais densa e estruturada será a rede de drenagem da zona não-saturada e mais rápido será o processo de circulação (Civita, 2008).

Mangin (1975) observou que valores de η e ε baixos (inferiores a 0,1) correspondiam a: (i) hidrossistemas com uma rede de canais de drenagem subterrânea pouco desenvolvida (ou pouco funcional – Mangin, 1994; Marsaud, 1996); (ii) sistemas cársicos com cobertura sedimentar ou com retenção nival sazonal, responsáveis por uma infiltração lenta ou diferida (El-Hakim e Bakalowicz, 2007).

Para classificar os hidrossistemas cársicos, Mangin (1975) introduziu duas expressões matemáticas referentes ao volume de água drenado na fase de esgotamento como escoamento de base (Volume dinâmico – V_d) e, na fase de decrescimento, como escoamento rápido (Volume de infiltração – V_i). O Volume dinâmico (V_d) corresponde ao volume de água armazenado na zona saturada no início da recessão ($t = 0$) disponível para drenagem como escoamento de base. Calcula-se através da equação (5), em que V_d em m^3 ; c uma constante que toma o valor de 86400 quando o caudal é dado em m^3/s e α em dias. O Volume dinâmico não coincide exactamente com o volume das reservas da zona

saturada, subestimando-as. O volume de água drenado durante a fase de decrescimento (entre t_0 e t_i) é o Volume de infiltração (V_i) e é obtido pela equação (6).

$$V_d = \int_0^{\infty} Q_{R0} e^{-\alpha t} dt = c \frac{Q_{R0}}{\alpha} \quad (5)$$

$$V_i = \int_0^{t_i} q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \varepsilon t} dt = \frac{q_0}{\varepsilon} \left[\ln(1 + \varepsilon t_i) \left(1 + \frac{\eta}{\varepsilon} \right) - \eta t_i \right] \quad (6)$$

O cálculo do escoamento rápido é obtido através da subtração do escoamento de base (estimado) ao escoamento total entre t_0 e t_i . O seu valor atinge o zero (em t_i) quando a água proveniente de infiltração recente também é zero, tal como prevê o modelo. No entanto, o escoamento rápido não corresponde na perfeição ao valor de água infiltrada porque, como explica o próprio autor (Mangin, 1994) o escoamento de base, que é um parâmetro de partida, é estimado e porque o escoamento rápido corresponde à infiltração depois da sua circulação ao longo da zona não-saturada e também da zona saturada.

O volume total de água armazenada no início da recessão (V_{t0}) disponível para escoamento ao longo de toda a recessão é obtido da seguinte forma:

$$V_{t0} = V_d + V_i \quad (7)$$

em que V_{t0} , V_d e V_i são todos em m^3 .

Com base nesta metodologia, Mangin (1975) estabeleceu uma classificação para os hidrossistemas cársicos, definindo os índices k (define a extensão da zona saturada) e i (caracteriza as condições de infiltração profunda ao longo da zona não-saturada). O índice k (dado em anos) revela o poder regulador da zona saturada e obtém-se da fórmula (8), sendo V_t o total da descarga de uma exsurgência ao longo de um ano hidrológico. Os resultados inferiores a 0,5 revelam tratar-se de hidrossistemas cársicos enquanto valores entre 0,5 e 1 (limite máximo) mostram tratar-se de aquíferos fracturados e porosos. Este limite foi, porém, alterado posteriormente, como salientado anteriormente.

A função i descreve a forma da curva de decrescimento segundo a fórmula (9). Para $t = 2$ dias (posteriores ao pico de escoamento), a equação (9) é rescrita segundo a equação (10).

$$k = V_d / V_t \quad (8)$$

$$(1 - \eta t) / (1 + \varepsilon t) \quad (9)$$

$$(1 - 2\eta) / (1 + 2\varepsilon). \quad (10)$$

Este índice varia entre 0 e 1, distinguindo hidrossistemas com predomínio de circulação rápida (i tende para 0) e hidrossistemas caracterizados por circulação lenta (i aproxima-se de 1). Assim:

- (i) $k < 0,5$; $i > 0,5$ (sistemas cársicos complexos, extensos e constituídos por vários subsistemas);
- (ii) $k < 0,5$; $0,25 < i < 0,5$ (sistemas em que a rede de condutas está mais desenvolvida na sua parte superior do que nas proximidades do exutório e se caracteriza por recarga atrasada devido tanto a terrenos não cársicos, como a retenção nival ou cobertura sedimentar);
- (iii) $k < 0,1$; $0 < i < 0,25$ (sistemas intensamente carsificados na zona não-saturada e na zona saturada, com uma rede de condutas bem desenvolvida, conectada com o exutório);
- (iv) $0,1 < k < 0,5$ e $0,1 < i < 0,25$ (sistemas com uma zona vadosa bastante carsificada e uma extensa rede de condutas que terminam na zona saturada);
- (v) $k > 0,5$ (aquíferos porosos e fracturados)

A inventariação dos métodos disponíveis e mais aplicados na análise da curva de recessão (Tallaksen, 1995; Grasso, 1999; Dewandel *et al.*, 2003), levou a que optássemos, no caso da recessão em meio cársico, pelos que se baseiam na divisão da curva em vários segmentos. Esta opção justifica-se porque constatámos, através de vários ensaios, ser muito difícil o ajustamento de uma só curva à recessão da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços. Como sublinha Fiorillo (2011), se o hidrossistema for de grandes dimensões e se as suas características internas forem heterogéneas, um coeficiente de recessão apenas não é suficiente para descrever o processo de recessão completo.

Neste trabalho estudámos sete recessões correspondentes ao período de esvaziamento do hidrossistema após o último grande pico primaveril de escoamento na exsurgência Olhos d'Água do Anços. Os dados utilizados correspondem ao caudal diário médio (m^3/s), obtido a partir dos registos automáticos do nível da água a cada 20 minutos, medido por uma sonda LevelTroll 500. Para o cálculo dos parâmetros essenciais à utilização deste método servimo-nos da ferramenta *Curve Fitting* do MATLAB. Apenas considerámos o principal exutório do hidrossistema porque as exsurgências permanentes são de muito pequena dimensão (não existindo dados diários de caudal) e a exsurgência do Ourão sofreu profundas interferências antrópicas, estando os dados completamente deturpados.

4. Resultados e discussão

As curvas de recessão dos Olhos d'Água do Anços, apesar dos diferentes valores de caudal no início da recessão e dos quantitativos e ritmos de recarga diferenciados, apresentam uma configuração relativamente semelhante entre si, identificando-se: (i) um segmento inicial com declive bastante acentuado (até aos 20 dias), correspondente à componente

de escoamento rápido (*quickflow*); (ii) um segmento intermédio extenso em que a descida é muito menos pronunciada, correspondente ao escoamento intermédio e (iii) um segmento final da curva, longo, de grande uniformidade, correspondente ao escoamento de base (*baseflow*). A existência inequívoca destes sectores ao longo da curva de recessão revela funcionamentos hidrogeológicos heterogéneos, decorrentes de estruturas, no interior do hidrossistema, com características físicas específicas e substancialmente diferentes. De acordo com a literatura da especialidade, esta é uma situação frequente em hidrossistemas de grandes dimensões, muito fracturados e de elevada permeabilidade.

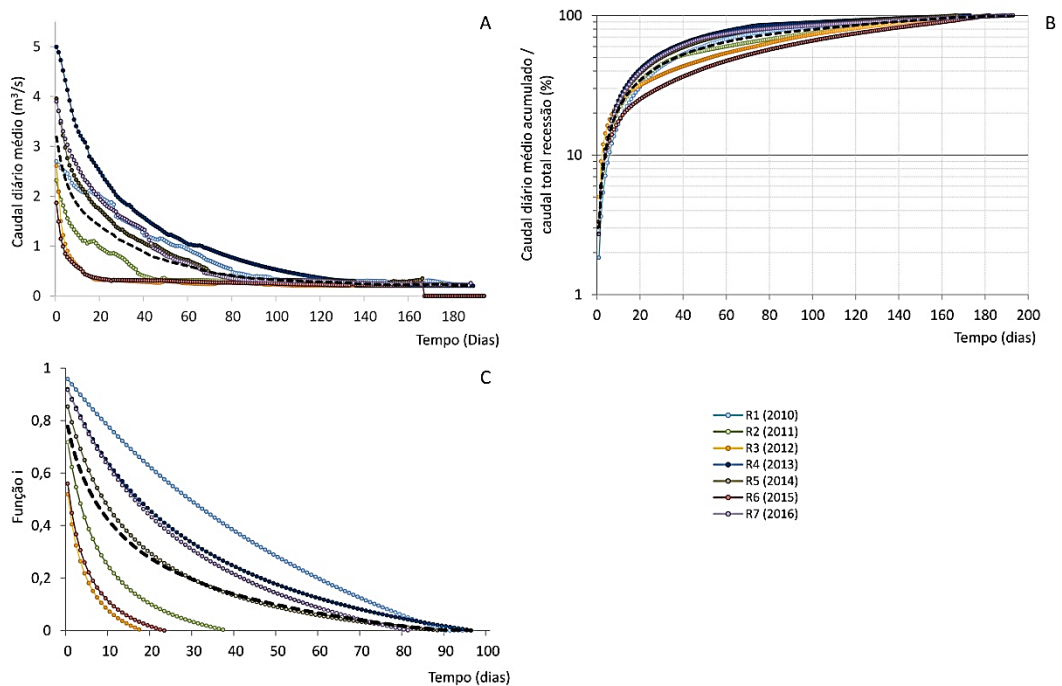


Figura 5. Representação das recessões em estudo (2010 a 2016): diminuição do caudal diário médio ao longo da recessão (A); caudal diário médio acumulado relativamente ao caudal total da recessão, em %, em escala logarítmica (B); Função i (C).

A representação gráfica em escala logarítmica mostra, de forma ainda mais nítida, as diferentes hidrodinâmicas ao longo da recessão (Figura 5B), constatando-se que, por um lado, mais de 30% da água disponível para a recessão se escoam nos primeiros 20 dias (*flood recession*), e por outro lado, um longo período final, de cerca de 100 dias, onde se escoam apenas 20% de toda a água (*depletion recession*). No período intermédio ocorre a drenagem dos restantes cerca de 50% da água que se escoam pelos OAA. Os diferentes troços da curva de recessão (e respectivos coeficientes de recessão) reflectem a

modificação nas condições hidrodinâmicas da circulação hipogeia, pelo que se depreende a existência de estruturas no interior do hidrossistema com transmissividade e capacidade de armazenamento substancialmente diferentes. Paiva (2015), através da decomposição da curva de recessão em múltiplas funções exponenciais, concluiu, para o hidrossistema em estudo, a presença de, pelo menos, três segmentos bem individualizados, com coeficientes de recessão (α) de 0,08 para a parte inicial da curva (α_1 , *flood recession*), 0,04 para a parte intermédia (α_2 , fase de transição) e de 0,004 para a fase de esgotamento (α_3 , *depletion*).

Os valores obtidos segundo o método de Mangin (Tabela 1) para os parâmetros ε e η da função Ψ , relativa à infiltração, indicam o nítido predomínio de processos de infiltração difusa e de circulação lenta na zona não-saturada ($\eta=0,023$; $\varepsilon=0,143$). O valor médio da função i (0,78) corrobora essas ilações. A presença de circulação rápida na zona não-saturada também se conclui da Tabela 1, através dos valores mais elevados daqueles parâmetros nos anos secos ($\eta=0,05$; $\varepsilon=0,365$; $i=0,52$ em 2012), quando as estruturas de elevada transmissividade se encontravam vazias.

A rapidez da circulação hipogeia parece ocorrer também em anos húmidos, o que se deduz de k , que mede o tempo de residência da água no interior dos hidrossistemas, com valores relativamente baixos em 2016 ($k=0,10 = 1,2$ meses) e em 2014 ($k=0,12 = 1,4$ meses), o que significa que a renovação da água da zona saturada ocorre de forma relativamente rápida, comprovando a existência de estruturas de considerável condutividade hidráulica, conectadas e funcionais na zona não-saturada, que rapidamente encaminham a água infiltrada até à zona saturada.

A presença de circulação rápida na zona não-saturada é também atestada pela subida abrupta da curva de crescimento, pelos picos de escoamento que se observam no hidrograma em resposta a um episódio de recarga intensa (típicos de um hidrossistema fortemente carsificado e funcional), pela turbidez que surge nas exsurgências cerca de 1,5 dias após esses mesmos eventos hidrometeorológicos (Figura 6). A existência de uma rede de condutas funcional no interior do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó foi também provada pelo estudo do comportamento da temperatura e da condutividade eléctrica da água drenada pelos OAA (Paiva, 2015) e pela análise correlatória e espectral do caudal desta exsurgência (Paiva *et al.*, 2012; Paiva, 2015).

O predomínio do carácter difuso e lento da circulação, com um longo tempo de atravessamento da zona não-saturada (vários meses), explicar-se-á, sobretudo, pela elevada componente de escoamento diferido que será proveniente: (i) de áreas mais afastadas da exsurgência, dada a grande dimensão do hidrossistema; (ii) do carácter predominantemente difuso da recarga; (iii) da possível retenção temporária no epicarso, em razão da espessa cobertura de depósitos nos sectores leste e central da área de recarga.

Tabela 1. Parâmetros hidrodinâmicos das funções de infiltração ao longo da zona não-saturada (Ψ_t) e de esgotamento (Φ_t) para todas as recessões dos Olhos d'Água do Anjos.

Parâmetros		Unid.	R ₁ 2010 (24/04/2010 - 29/10/2010)	R ₂ 2011 (30/05/2011 - 02/11/2011)	R ₃ 2012 (10/05/2012 - 25/10/2012)	R ₄ 2013 (11/04/2013 - 30/09/2013)	R ₅ 2014 (08/04/2014 - 21/09/2014)	R ₆ 2015 (05/05/2015 - 02/11/2015)	R ₇ 2016 (12/05/2016 - 20/11/2016)	Média
função $\Psi(t)$	Q'_0	m ³ /s	2,70	2,32	2,09	5,23	3,95	1,87	4,31	3,21
	η	dias ⁻¹	0,011	0,025	0,051	0,010	0,011	0,040	0,012	0,023
	ε	dias ⁻¹	0,010	0,162	0,365	0,033	0,073	0,322	0,032	0,142
	ti	dias ⁻¹	92	40	20	98	87	25	82	63
função $\Phi(t)$	α	dias ⁻¹	0,004	0,010	0,004	0,005	0,008	0,002	0,005	0,005
	Q_{R0}	m ³ /s	0,54	0,84	0,34	0,58	0,80	0,32	0,51	0,56
	q_0	m ³ /s	2,16	1,48	1,75	4,65	3,15	1,55	3,81	2,65
	Q_0	m ³ /s	0,36	0,38	0,31	0,35	0,38	0,31	0,35	0,35
Duração da recessão (DR)		dias	189	180	172	192	167	187	193	183
Precipitação		mm	1278	1230	689	1489	1566	845	1305	1200
Volume total ano hidrol.		Mm ³	61,4	34,8	13,3	53,2	51,7	32,9	54,5	43,1
Volume total recessão (Vtr)		Mm ⁴	17,1	8,1	7,7	20,8	11,0	4,8	13,5	11,9
Volume de infiltração (Vi)		Mm ³	6,7	1,0	0,6	10,9	4,9	0,6	8,0	4,7
Vi / Vtr		%	39,0	12,9	7,5	52,3	44,0	12,8	58,8	32,5
Volume dinâmico (Vd)		Mm ⁵	10,5	7,0	7,1	9,9	6,2	4,2	5,6	7,2
Vd/Vtr		%	61,0	87,1	92,5	47,7	56,0	87,2	41,2	67,5
Vi / Vd			0,64	0,15	0,08	1,10	0,78	0,15	1,43	0,6
Baseflow index (BFI)			0,73	0,76	0,89	0,47	0,67	0,88	0,74	0,73
BFI >0,9		dias	122	174	163	97	132	173	137	143
BFI >0,9 / DR		%	64,6	96,7	94,8	50,5	79,0	92,5	71,0	78,4
k			0,17	0,20	0,54	0,19	0,12	0,13	0,10	0,21
i			0,96	0,72	0,52	0,92	0,85	0,56	0,92	0,78
Caudal medio anual		m ³ /s	1,95	1,11	0,42	1,69	1,64	1,04	1,73	1,37
Caudal máximo diário		m ³ /s	5,55	4,28	2,61	5,76	5,18	4,56	5,17	4,73
Caudal mínimo		m ³ /s	0,20	0,20	< 0,20	0,20	0,20	<20	0,20	0,20

A influência de um episódio de recarga prolonga-se por bastante tempo, em particular nos anos mais chuvosos (2016, $ti=82$ dias) podendo a quantidade de escoamento rápido ser, no total da recessão, superior ao escoamento de base (em 2016, $Vi/Vtr = 59\%$ enquanto $Vd/Vtr = 41\%$).

Pode, ainda, colocar-se a hipótese dos resultados da função Ψ_t se poderem explicar, parcialmente, pela reduzida dimensão das saídas da água nesta exsurgência (e em todas as que drenam o hidrossistema no bordo oeste), o que impede a saída rápida da água infiltrada em grandes quantidades nestes anos, explicação aliás apresentada por Kovacic (2010) para situações semelhantes na Eslovénia. Uma parte considerável do caudal dos OAA durante a recessão ($Vi/Vd = 0,6$; $k=0,21$; $Vi/Vtr = 33\%$) provém de infiltração recente, englobando escoamento rápido, em circulação turbulenta, e escoamento diferido, de circulação mais lenta, que chega ao exutório até várias semanas após a recarga.

17/11/2009 12:00 | 130 mm em 3 dias
Caudal instantâneo: 4,56 m³/s



08/01/2011 12:00 | Período precedente: 79 mm em 4 dias; 46 mm nos dois dias anteriores



Figura 6. Turbidez da água na exsurgências na sequência de episódios de precipitação elevada em diferentes momentos do ano hidrológico.

A influência de um episódio de recarga prolonga-se por bastante tempo, em particular nos anos mais chuvosos (2016, $t_i=82$ dias) podendo a quantidade de escoamento rápido ser, no total da recessão, superior ao escoamento de base (em 2016, $V_i/V_{tr} = 59\%$ enquanto $V_d/V_{tr} = 41\%$).

Pode, ainda, colocar-se a hipótese dos resultados da função Ψ_t se poderem explicar, parcialmente, pela reduzida dimensão das saídas da água nesta exsurgência (e em todas as que drenam o hidrossistema no bordo oeste), o que impede a saída rápida da água infiltrada em grandes quantidades nestes anos, explicação aliás apresentada por Kovacic (2010) para situações semelhantes na Eslovénia. Uma parte considerável do caudal dos OAA durante a recessão ($V_i/V_d = 0,6$; $k=0,21$; $V_i/V_{tr} = 33\%$) provém de infiltração recente, englobando escoamento rápido, em circulação turbulenta, e escoamento diferido, de circulação mais lenta, que chega ao exutório até várias semanas após a recarga.

A função Φ_t não sofre qualquer interferência da recarga, pelo que os seus resultados são considerados como indicadores das características internas de qualquer tipo de hidrossistema. No caso em estudo, o coeficiente de recessão α é muito baixo ($\alpha=0,005$) indicando o esvaziamento lento da zona saturada, que se prolonga por vários meses (cerca de 120 dias), e a enorme capacidade de armazenamento do hidrossistema. O Volume dinâmico é elevado, correspondendo a 67,5% do total da água escoada pelos OAA durante a recessão, o que significa o domínio do escoamento de base no caudal da exsurgência ($BFI=0,73$; $BFI>90=143$ dias, representando 78% do total de dias da recessão). Estes valores acentuam-se ainda mais em anos secos, em que o caudal, no total do período de recessão, é assegurado quase exclusivamente por escoamento de base (casos de 2012 e de 2015), o mesmo acontecendo em anos em que os meses que precedem o início da recessão são secos (caso de 2011 e 2014). O predomínio do escoamento de base

no caudal desta exurgência foi também comprovado por Paiva (2015) e Paiva *et al.* (2012). Os resultados obtidos mostram o elevado poder de regulação do hidrossistema, em função da enorme quantidade de água que consegue armazenar na zona saturada. A explicação para tão elevada capacidade de armazenamento está, para além da grande dimensão da zona saturada, no seu desenvolvimento em profundidade, tipicamente vaclusiano, abaixo do nível do exutório (Cunha, 1989). Com excepção de anos atípicos, em que ocorre uma elevada recarga no final do Inverno/início da Primavera, o escoamento de base (Volume dinâmico) é sempre muito superior ao escoamento rápido (Volume de infiltração), tanto em quantidade quanto em duração (Figura 7 A a G).

A representação gráfica conjunta do Volume dinâmico e do Volume de infiltração diários ao longo das sete recessões analisadas (Figura 7 H e I) mostra uma elevada uniformidade do escoamento de base, independentemente das características hidrometeorológicas de cada ano. Comprova-se, portanto, a regularidade do comportamento hidrodinâmico da zona saturada bem como a sua enorme capacidade de armazenamento, o seu poder regulador na complexa relação *input-output*. O Volume de infiltração mostra igualmente um comportamento de grande regularidade, variando apenas nos quantitativos, em função dos valores da recarga. Não parece, portanto, existir qualquer outro tipo de *input* ou de mecanismo na zona não-saturada capaz de provocar alterações ou perturbações no escoamento da água recém-infiltrada.

Os índices k e i , que permitem a classificação do hidrossistema pela análise conjunta das condições de infiltração e da capacidade de armazenamento, apresentam variações significativas, revelando um funcionamento hidrodinâmico marcado pelos contrastes, colocados a descoberto pelas diferenças acentuadas nos quantitativos e no ritmo da recarga. Os resultados relativamente díspares em ambos os índices reflectem a marcada dualidade do funcionamento hidrológico do hidrossistema em estudo (Paiva, 2015).

Os valores de k , à excepção do ano muito seco de 2012, revelam um curto tempo de residência da água na zona saturada (entre 37 e 68 dias), o que indicará a presença de um sistema conectado de condutas e fracturas largas, funcionais, com significativa transmissividade, que encaminha a água até à exurgência. Os valores elevados de k nos anos muito secos (0,54) revelam a existência de consideráveis reservas, águas com tempos de residência superiores a meio ano, e mostram a grande capacidade de armazenamento da zona saturada, justificando o predomínio do escoamento de base no caudal dos OAA. Os valores elevados de i ($>0,85$) em quase todas as recessões revelam o predomínio da circulação difusa e lenta ao longo da zona não-saturada. No entanto, os valores muito mais baixos nos anos secos (0,52 e 0,56) mostram que a circulação desde a zona de recarga até à zona saturada pode ser bastante mais rápida, efectuada ao longo de uma rede subterrânea de canais que rapidamente encaminha a água até à zona freática. Estes resultados foram comprovados por dados de temperatura e condutividade eléctrica da água dos OAA apresentados em Paiva (2015).

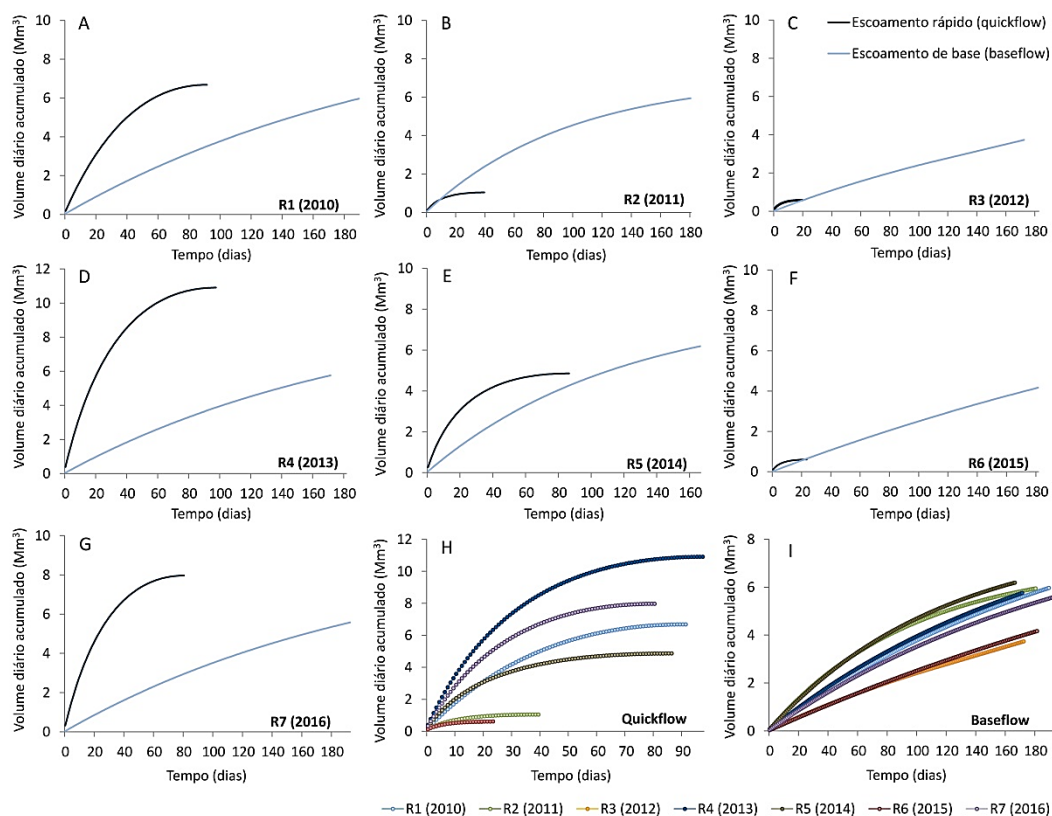


Figura 7. Volume diário acumulado, em Mm^3 , de escoamento rápido e escoamento de base, ao longo de cada recessão (imagens A a G). Volume diário acumulado, em Mm^3 , de escoamento rápido (H) e de escoamento de base (I).

Os valores médios de k e i ($k = 0,21$, $i = 0,78$) mostram que o hidrossistema de Degracias-Sicó, cujo principal exutório é a exsurgência dos Olhos d'Água do Anços, se posiciona, de acordo com a classificação de Mangin (1975), no domínio dos **sistemas cársticos complexos**, ou seja, sistemas com grandes dimensões e constituídos por vários subsistemas, caracterizados por um baixo grau de carsificação funcional global e por uma relação *input-output* fortemente influenciada pelo elevado tempo de atravessamento da zona não-saturada e pelo seu poderoso efeito filtrante.

5. Conclusões

A análise quantitativa das curvas de recessão da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços de 2010 a 2016 permitiu compreender aspectos cruciais do funcionamento

hidrogeológico do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó bem como inferir algumas das características internas do próprio maciço cársico.

A recessão nos OAA estende-se, em média, por um período de cerca de 6 meses (183 dias), com predomínio do escoamento de base relativamente ao escoamento rápido no total do caudal, realidade que se altera em anos muito chuvosos e com elevada recarga no final do Inverno/início da Primavera, em que o Volume de infiltração é superior ao Volume dinâmico. Se exceptuarmos os anos muito secos, verifica-se uma prolongada influência da recarga no caudal desta exsurgência ($t_i=63$ dias), o que revela a presença de uma importante componente de escoamento diferido. A infiltração é predominantemente difusa e a circulação lenta ao longo da zona não-saturada, embora os valores dos anos secos indiquem a presença de maiores velocidades de infiltração e, como tal, de estruturas com maior transmissividade e com algum grau de organização, as quais encaminham, de forma célere, a água de recarga até à zona saturada.

A presença de dois tipos de circulação ao longo da espessa zona não-saturada revela a existência de estruturas com velocidade de circulação muito diferenciada, nomeadamente de uma rede de condutas e fracturas alargadas com relativa funcionalidade e que testemunham a elevada carsificação do hidrossistema em estudo, em particular da sua bordadura oeste, onde o trop-plein do Malhadoiro testemunha a existência de uma paleo-drenagem organizada reveladora inclusive de uma carsificação polifaseada, ligada ao soerguimento do Maciço de Sicó. O pouco tempo de residência da água infiltrada no interior do hidrossistema em estudo, caracterizado pela sua grande dimensão, elevada espessura e predomínio de recarga difusa, prova que tem de existir necessariamente uma rede de canais, estruturada e funcional, que encaminha a água desde a área de recarga até às exsurgências da bordadura oeste.

O predomínio do escoamento de base que emergiu da análise da curva de recessão revela a existência de reservas consideráveis na zona saturada, que se escoam lentamente como mostra o baixo valor do coeficiente de esgotamento. A zona saturada é, portanto, extensa e bastante desenvolvida, com reservas que, salvo uma estiagem de duração excepcional ou uma situação de seca hidrológica, garantem o carácter permanente dos Olhos d'Água do Anços e das exsurgências a jusante, revelando um elevado poder de regulação do hidrossistema bem como uma enorme capacidade de armazenamento na zona saturada.

Os resultados procedentes da análise da curva de recessão sublinham a profunda dualidade que caracteriza o funcionamento hidrogeológico e o próprio hidrossistema de Degracias-Sicó, mostrando a existência de: (i) uma importante componente de escoamento rápido na recessão dos OAA, proveniente de circulação rápida, o que origina curtos tempos de residência da água no interior do hidrossistema, características típicas de uma drenagem funcional semelhante à de hidrossistemas considerados como bem drenados; (ii) o predomínio da circulação lenta na zona não-saturada, a supremacia quantitativa do escoamento de base, revelando longos tempos de residência da água,

atributos típicos de hidrossistemas com zona saturada extensa, com grande capacidade de armazenamento e enorme poder de regulação.

Bibliografia

- Amit, H.; Lyakhovsky, V.; Katz, A.; Starinsky, A.; Burg, A. (2002). Interpretation of spring recession curves. *Ground Water* 40 (5), 543–551.
- Atkinson, T.C. (1977). Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain). *Journal of Hydrology*, 35 (1–2), 93–110.
- Baedke, S.J.; Krothe, N.C. (2001). Derivation of effective hydraulic parameters of a Karst Aquifer from discharge hydrograph analysis. *Water Resources Research*, 37 (1), 13–19.
- Bicalho, C.; Batiot-Guilhe, C.; Deidel, J. L.; Van Exter, S.; Jourde, H. (2012). Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer. *Journal of Hydrology*, 450–451, 206–218.
- Birk, S.; Liedl, R.; Sauter, M. (2004). Identification of localised recharge and conduit flow by combined analysis of hydraulic and physico-chemical spring responses (Urenbrunnen, SW-Germany). *Journal of Hydrology*, 286 (1–4), 179–193.
- Birk, S.; Liedl, R.; Sauter, M. (2006). Karst spring responses examined by process-based modeling. *Ground Water*, vol. 44, 6, pp. 832–836.
- Bonacci, O. (1993). Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers. *Hydrological Sciences Journal*, 38 (1), 51–62.
- Civita, M. V. (2008). An improved method for delineating source protection zones for karst springs based on analysis of recession curve data. *Hydrogeology Journal*, 16 (5), 855–869.
- Chang, Y.; Wu, J. e Liu, L. (2015). Effects of the conduit network on the spring hydrograph of the karst aquifer. *Journal of Hydrology*, 527, 517–530.
- Cornaton, F. (1999). *Utilisation de modèles continu discret et a double continuum pour l'analyse des réponses globales de l'aquifère karstique*. Tese de Mestrado, Universidade de Neuchâtel, 83 p.
- Covington, M.; Wicks, C.; Saar, M. (2009). A dimensionless number describing the effects of recharge and geometry on discharge from simple karstic aquifers. *Water Resources Research*, 45 (11), W11410.
- Cunha, L. (1989). *As serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere*. Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, 329 p.
- Dewandel, B.; Lachassagne, P.; Bakalowicz, M.; Weng, P.; Al-Malki, A. (2003). Evaluation of aquifer thickness by analysing hydrographs: application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer. *Journal of Hydrology*, 274 (1–4), 248–269.
- Doummar, J. ; Sauter, M. ; Geyer, T. (2012). Simulation of flow processes in a large scale karst system with an integrated catchment model (Mike She): identification of relevant parameters influencing spring discharge. *Journal of Hydrology*, 426, 112–123.

Eisenlohr, L., (1996). *Variabilité des réponses naturelles des aquifères karstiques. De l'identification de la réponse globale vers la connaissance de la structure de l'aquifère*. Tese de doutoramento, Universidade de Neuchâtel, Suíça.

Eisenlohr, L.; Király, L.; Bouzelboudjen, M.; Rossier, Y. (1997). Numerical simulation as a tool for checking the interpretation of karst spring hydrographs. *Journal of Hydrology*, 193 (1–4), 306–315.

El-Hakim, M.; Bakalowicz, M. (2007). Significance and origin of very large regulating power of some karst aquifers in Middle East. Implications on karst aquifers classification. *Journal of Hydrology*, 333, 329–339.

Fiorillo, F. (2009). Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment. *Journal of Hydrology*, 373, 290–301

Fiorillo, F. (2011). Tank-reservoir drainage as a simulation of recession limb of karst spring hydrographs. *Hydrogeology Journal*, 19, 1009–1019.

Fiorillo, F. (2014). The recession of spring hydrographs, focused on karst aquifers. *Water Resources Management*, 28 (7), 1781–1805.

Fiorillo, F.; Revellino, P.; Ventafridda, G. (2012). Karst aquifer draining during dry periods. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74 (2), 148–156.

Florea, L., Vacher, H. (2006). Springflow hydrographs: eogenetic vs. telogenetic karst. *Ground Water*, 44 (3), 352–361

Ford, D.C., Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons.

Forkasiewicz, J.; Paloc, H. (1967). Le régime de tarissement de la Foux-de-la-Vis. Etude préliminaire. *Chronique d'Hydrogéologie*, BRGM, 3(10), 61–73.

Geyer, T.; Birk, S.; Liedl, R.; Sauter, M. (2008). Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs. *Journal of Hydrology*, 348 (3–4), 452–463.

Goldscheider, N., Drew, D. (2007). *Methods in Karst Hydrogeology*. IAH: International Contributions to Hydrogeology, 26. CRC Press.

Goldscheider, N. (2015). Overview of methods applied in karst hydrogeology. In Stevanovic, Z. (ed). *Karst Aquifers—Characterization and Engineering*, Springer, 127–145.

Grasso, D. A. (1999). *Interprétation des réponses hydrauliques et chimiques des sources karstiques (Essai d'interférence de la structure des systèmes karstiques)*. Tese de doutoramento, Universidade de Neuchâtel, Suíça, 135 p.

Hergarten, S.; Birk, S. (2007). A fractal approach to the recession of spring hydrographs. *Geophysical Research Letters*, 34.

Kovacic, G. (2010). Hydrogeological study of the Malencica karst spring (SW Slovenia) by means of a time series analysis. *Acta Carsologica*, 39/2, 201–215.

Kovács, A. (2003). *Geometry and hydraulic parameters of karst aquifers: a hydrodynamic modeling approach*. Tese de doutoramento, Universidade de Neuchâtel, Suíça, 131 p.

Kovács, A.; Perrochet, P. (2008). A quantitative approach to spring hydrograph decomposition. *Journal of Hydrology*, 352, 16–29.

Kovács, A. ; Perrochet, P. ; Király, L. ; Jeannin, P.-Y. (2005). A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis. *Journal of Hydrology*, 303 (1–4), 152–164.

Kiraly, L.; Perrochet, P.; Rossier, Y. (1995). Effect of the epikarst on the hydrograph of karst springs: a numerical approach. *Bulletin d'Hydrogéologie*, 14, Centre d'Hydrogéologie, Universidade de Neuchâtel, Suíça, 199-220.

Kiraly, L. (2003). Karstification and Groundwater flow. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 1(3), 155-192.

Larocque, M.; Mangin, A.; Razack, M.; Banton, O. (1998). Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*, 205 (3–4), 217–231.

Maillet, E. (1905). *Essais d'hydraulique Souterraine et fluviale*. Hermann, Paris.

Malík, P.; Vojtková, S. (2012). Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs. *Environmental Earth Sciences*, 65 (8), 2245-2257.

Mangin, A. (1975). *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Laboratoire souterrain du Centre national de la recherche scientifique.

Mangin, A. (1994). Karst hydrogeology. In Gilbert, J.; Danielopol, D. L. e Stanford, J. A. (Eds.) – *Groundwater ecology*. Academic Press, 43-67.

Marsaud, B. (1996). *Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux*. Tese de doutoramento, BGRM, Paris, 268 p.

Mudarra, M.; Andreo, B., (2010). Hydrogeological functioning of a karst aquifer deduced from hydrochemical components and natural organic tracers present in spring waters. The case of Yedra Spring (Southern Spain). *Acta Carsologica*, 39/2, 261-270.

Padilla, A.; Pulido-Bosch, A. (1995). Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *Journal of Hydrology*, 168 (73-79), 73-89.

Padilla, A.; Pulido-Bosch, A.; Mangin, A. (1994). Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring. *Ground Water*, 32 (2), 267–277.

Paiva, I.; Ramos, C.; Cunha, L. (2012). A aplicação da análise de séries temporais (time series analysis) no estudo da dinâmica hidrológica dos sistemas cársicos. Primeiros resultados para o Maciço de Sicó (Litoral-centro de Portugal), *Geonorte*, Edição Especial 3 (4), 350-364.

Paiva (2015). *Hidrossistema cársico de Degraças-Sicó. Estudo do funcionamento hidrodinâmico a partir das suas respostas naturais*. Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, 445p.

Panagopoulos, G.; Lambrakis, N. (2006). The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of karst systems: application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete). *Journal of Hydrology*, 329, 368-376.

Raeisi, E.; Karami, G. (1997). Hydrochemographs of Berghan karst spring as indicators of aquifer characteristics. *Journal of Cave and Karst Studies*, 59 (3), pp. 112-118.

Sauter, M. (1992). *Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer (Gallusquelle, Malm, SW Germany)*. Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, C13, 150 p.

Soulios, G. (1991). Contribution a l'étude des courbes de recession des sources karstiques: exemples du pays hellénique, *Journal of Hydrology*, 124, 29-42.

Tallaksen, L. M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165, 349-370.

Taylor, C. J.; Greene, E. A., (2008). Hydrogeologic characterization and methods used in the investigation of karst hydrology. In Rosenberry, D. e LaBaugh, J. (Eds.) – *Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water*, US Geological Survey, 75-114.