



Isabel Maria Rodrigues de Paiva

HIDROSSISTEMA CÁRSICO DE DEGRACIAS-SICÓ

Estudo do funcionamento hidrodinâmico
a partir das suas respostas naturais

Tese de doutoramento em Letras, área de Geografia, especialidade de Geografia, orientada pelo Professor Doutor Lúcio José Sobral da Cunha e pela Professora Doutora Catarina de Melo Ramos, apresentada ao Departamento de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra

2014



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Isabel Maria Rodrigues de Paiva

HIDROSSISTEMA CÁRSICO DE DEGRACIAS-SICÓ

Estudo do funcionamento hidrodinâmico a partir das suas respostas naturais

Tese de doutoramento em Letras, área de Geografia, especialidade de Geografia, orientada pelo Professor Doutor Lúcio José Sobral da Cunha e pela Professora Doutora Catarina de Melo Ramos, apresentada ao Departamento de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra



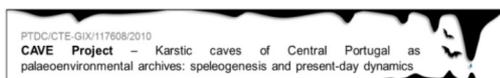
Coimbra
2014

APOIOS INSTITUCIONAIS E FINANCEIROS

Este estudo é um contributo do Projeto CAVE (PTDC/CTE-GIX/117608/2010)

Financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Económico e Regional (FEDER) através do Programa Operacional Fatores de Competitividade (COMPETE) (FCOMP-01-0124-FEDER-022634)

e fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia



Teve também o apoio da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia através da Bolsa de Investigação com a referência SFHM / BD / 60470 / 2009, financiada pelo POPH - QREN - Tipologia 4.1 - Formação Avançada, comparticipado pelo Fundo Social Europeu e por fundos nacionais do MCTES

Teve igualmente apoio do CEGOT - Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território

AGRADECIMENTOS

Muitos foram os que com a sua sapiência, espírito de sacrifício e amizade nos auxiliaram nesta longa e desafiante caminhada.

As primeiras palavras são, não por força da obrigação, mas por profundo mérito, para os orientadores deste trabalho, o Professor Doutor Lúcio J. Sobral da Cunha e a Professora Doutora Catarina de Melo Ramos. Para eles, que caminharam a nosso lado, aconselhando, orientando, por vezes divergindo, mas sempre fazendo prosperar este projecto. Para eles, que nestes últimos dias, na fase final deste percurso, tão incansavelmente trabalharam e nos apoiaram, um incomensurável 'Obrigada'!

O segundo reconhecimento é dirigido ao Sr. Carlos Ramos, que com os seus conhecimentos técnicos, amizade e enorme espírito de sacrifício, ao longo dos últimos cinco anos, tornou possível este trabalho. A ele, o nosso profundo e amigo agradecimento.

Em termos institucionais, o nosso agradecimento ao CEGOT – Centro de Geografia e Ordenamento do Território na pessoa do seu coordenador, à altura, a Professora Doutora Fernanda Delgado Cravidão, e na pessoa do coordenador da Linha de Investigação 1 – Natureza e Dinâmicas Ambientais, à altura, o Professor Doutor Lúcio J. Sobral da Cunha, pelo imprescindível apoio prestado na aquisição de equipamentos de registo digital, sem os quais não seria possível este estudo.

Reconhecimento extensível ao Departamento de Geografia da Universidade de Coimbra, na pessoa do seu Director, o Professor Doutor Luciano Fernandes Lourenço, que nos apoiou ao longo destes anos tanto em questões simples como em momentos cruciais deste longo processo.

Aos colegas do Departamento de Geografia que, com a sua sabedoria, simpatia ou amizade nos apoiaram de forma permanente e nos encorajaram em momentos de desânimo com motivantes palavras de incentivo. Para eles, o nosso agradecimento sincero.

Uma palavra de apreço e gratidão para os donos dos terrenos e presidentes das Juntas de Freguesia de Degraças, Alvorge e Santiago de Litém à altura (2009) que, amavelmente, nos deram permissão para a instalação dos aparelhos de recolha de dados da precipitação e temperatura do ar.

Um agradecimento muito especial endereçado à Doutora Metka Petric e ao Karst Research Institute (Postojna, Eslovénia) que, amavelmente, nos acolheram, orientaram e transmitiram conhecimentos imprescindíveis no estudo destes meios tão profundamente complexos e belos.

Ainda um agradecimento reconhecido ao Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra na pessoa do Doutor Paulo Ribeiro pela cedência de dados cruciais para a

3

colmatação de pequenos hiatos nas séries de dados devido a problemas com os aparelhos da rede por nós instalada.

Individualmente, a nossa imensa gratidão para com aqueles que, em pequenas ou grandes tarefas, nos auxiliaram de forma completamente desinteressada e nos fizeram prosseguir neste moroso e, por vezes, difícil caminho. À Dr.^ª Ana Lapinha do Departamento de Química da Universidade de Coimbra, ao Dr. Armando Ferreira e Dr.^ª Paula Vieira da Câmara Municipal de Pombal, à Dr.^ª Susana Freiria, ao Eng.^º António Paulino, ao Eng.^º Pedro Afonso e ao Eng.^º António Correia do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra e ao Dr. Miguel Caceiro, a todos eles o nosso sincero e profundo agradecimento.

Aos verdadeiros amigos, aqueles que sempre nos incentivaram e apoiaram incondicionalmente, mesmo nos momentos mais difíceis, um carinhoso agradecimento.

E a todos aqueles que pontualmente colaboraram e que aqui não constam, não por falta de reconhecimento mas porque a memória nos atraçou, um igualmente sentido *Obrigada!*

Índice Geral

RESUMO.....	19	
ABSTRACT	21	
INTRODUÇÃO	23	
PARTE I		
ENQUADRAMENTO TEÓRICO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MACIÇO CÁRSICO DE SICÓ E REGIÃO ENVOLVENTE		
CAPÍTULO I - Hidrossistemas cársicos: um domínio hidrológico com grande especificidade.....		33
1. Estrutura e funcionamento	33	
1.1. Os conceitos de <i>aquífero cársico</i> e <i>hidrossistema cársico</i> . Terminologia utilizada	33	
1.2. Principais características de um hidrossistema cársico	36	
1.3. O modelo conceptual de circulação subterrânea e o funcionamento hidrodinâmico	40	
1.4. As diferentes classificações	51	
2. Métodos de análise e caracterização da relação <i>input-output</i>	54	
2.1. Os métodos globais	55	
2.1.1. A particularidade dos modelos de 'caixa negra'	56	
2.1.2. Análise de séries temporais (<i>time series analysis</i>)	58	
2.1.3. Os modelos de eventos singulares – análise da curva de recessão	59	
2.2. Modelos distributivos.....	63	
2.3. As características físico-químicas das águas – o caso da temperatura e da condutividade eléctrica	65	
CAPÍTULO II - Enquadramento geográfico e caracterização física do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó		71
I. Enquadramento hidrográfico e hidrogeológico	71	
1. Localização geográfica e delimitação da área de estudo: questões metodológicas	71	
2. Enquadramento hidrogeológico	76	
3. As principais exurgências do vale do rio Anços (Olhos d'Água do Anços e Ourão) no conjunto do hidrossistema cársico de Sicó-Alvaiázere	78	
II. Caracterização litológica e morfo-estrutural	84	
1. As características gerais do relevo	84	
2. A litologia e a evolução paleogeográfica: breve apresentação		87
3. A tectónica e as unidades morfo-estruturais.....		91
4. Formas cársicas de profundidade: ocorrência e distribuição espacial		100
CAPÍTULO III - Características climáticas da região onde se localiza o hidrossistema cársico de Degracias-Sicó		103
1. A precipitação como <i>input</i>	103	
1.1. Os dados: temporalidade e espacialidade.....	111	
1.2. As séries udométricas: homogeneidade, consistência e preenchimento de hiatos	106	
1.3. Variabilidade interanual da precipitação	111	
1.4. Comportamento mensal da precipitação	117	
1.5. A repartição espacial da precipitação	123	
2. O balanço hidrológico	126	
PARTE II		
O HIDROSSISTEMA CÁRSICO DE DEGRACIAS-SICÓ: ESTUDO DA SUA HIDRODINÂMICA		
CAPÍTULO I - O método de investigação e os dados utilizados		133
1. A escolha do método	133	
2. A obtenção e recolha de dados – considerações metodológicas.....	138	
2.1. A instalação de novas estações climatológicas.....	138	
2.2. Os dados relativos às exurgências do bordo oeste do hidrossistema em estudo.....	139	
2.3. Determinação da Curva de Vazão nas exurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão.....	140	
CAPÍTULO II - A precipitação enquanto <i>input</i> do hidrossistema.....		151
1. O período 2009/2010 – 2012/2013	151	
1.1. A obtenção dos dados: questões metodológicas	151	
1.2. Precipitação anual e mensal	154	
1.3. Precipitação diária.....	162	
CAPÍTULO III - A recarga: quantitativos e espacialização		171
I. A especificidade das áreas cársicas	171	
1. Enquadramento teórico.....	171	
2. Considerações metodológicas e dados utilizados.....	175	

3. O cálculo da recarga a partir do método do balanço hidrológico	180
3.1. A determinação da evapotranspiração real (ETR)	182
3.2. A recarga anual e mensal	189
4. O método de Kessler	208
II. Distribuição espacial da recarga	217
1. Os modelos de cálculo e representação espacial da recarga em hidrossistemas cársicos – breve enquadramento teórico.....	217
1.1. O modelo APLIS	219
2. Adaptação do método APLIS à área em estudo.....	221
2.1. As variáveis utilizadas e respectiva classificação ordinal em ambiente SIG.....	221
2.2. A fórmula de cálculo e a distribuição espacial da recarga.....	221
CAPÍTULO IV - A descarga do hidrossistema	233
I. O funcionamento hidrodinâmico a partir do estudo da série de caudais 2009/2010 – 2012/2013	233
1. A análise do hidrograma: apontamentos teóricos.....	233
1.1. O <i>output</i> – as exurgências do bordo oeste. Os Olhos d'Água do Anços enquanto exutório principal.....	235
2. Análise de séries temporais (<i>time series analysis</i>)	257
2.1. Enquadramento teórico e questões metodológicas.....	257
2.1.1. Análise univariada	260
2.1.2. Análise bivariada	263
2.2. A relação <i>input-output</i> através da análise das séries da precipitação e do caudal. Resultados e discussão.....	266
2.2.1. Análise univariada	266
2.2.2. Análise bivariada	277
3. Análise da curva de recessão	296
3.1. Enquadramento teórico e questões metodológicas.....	296
3.2. Estudo de caso: curvas de recessão da exurgência dos Olhos d'Água do Anços.....	306
3.2.1. A decomposição da curva de recessão em várias funções exponenciais.....	311
3.2.2. A decomposição da curva de recessão numa função exponencial e numa função homográfica – o método de Mangin.....	316

7

II. O funcionamento hidrodinâmico a partir da variação da temperatura e da condutividade eléctrica da água na exurgência dos Olhos d'Água do Anços	329
1. Enquadramento teórico e considerações metodológicas	329
2. A variação diária da temperatura da água	332
3. Condutividade eléctrica.....	340
3.1. O comportamento diário	342
3.2. Distribuição das frequências dos valores de condutividade eléctrica	349
4. O funcionamento hidrodinâmico a partir da análise de pormenor (episódios) da condutividade eléctrica e da temperatura da água dos Olhos d'Água do Anços	353

PARTE III

A ESPECIFICIDADE DA HIDRODINÂMICA CÁRSICA. O HIDROSSISTEMA DE DEGRACIAS- SICÓ NO CONTEXTO HIDROLÓGICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARUNCA

CAPÍTULO I - A particularidade do sector cársico na diversidade hidrogeomorfológica da bacia hidrográfica do rio Arunca	371
1. Considerações metodológicas	371
2. Caracterização breve dos sectores inicial e intermédio (área não-cársica)	373
3. As hidrodinâmicas cársica e fluvial: análise comparativa através do caudal diário médio.....	378
4. As hidrodinâmicas cársica e fluvial: análise comparativa através do caudal horário	388
4.1. O tempo de crescimento e o tempo de resposta.....	388
4.2. A curva de recessão e a diferença nas curvas de decrescimento	399
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA	409
BIBLIOGRAFIA	423

Índice de Quadros

Quadro I.I.I – Características e especificidade dos hidrossistemas cársicos relativamente aos aquíferos porosos e fracturados.....	38
Quadro I.I.I.I – Percentagem mensal de água escoada através das principais exsurgências da parte setentrional do hidrossistema Sicó-Alvaiázere, por mês, em anos hidrológicos de características pluviométricas diferentes, no período 1999/2000 – 2007/2008.....	82
Quadro I.I.I.I.I – As estações utilizadas na caracterização pluviométrica e as características das respectivas séries, disponibilizadas pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH).....	104
Quadro I.I.I.I.II – Quadro-síntese dos registos de precipitação mensal disponíveis para as estações da região onde se insere a área em estudo.....	110
Quadro I.I.I.I.III – Coeficiente de determinação (r^2) para as estações da região onde se insere a área em estudo.....	111
Quadro I.I.I.I.IV – Medidas de tendência central e de dispersão para a estação de Degracias e para algumas estações vizinhas, com séries longas. A) por década; B) por estação udoográfica/climatológica, no conjunto da série e no período 1979/1980 – 2006/2007.....	114
Quadro I.I.I.I.V – Classificação pluviométrica dos anos hidrológicos nas estações da área de estudo e região envolvente.....	116
Quadro I.I.I.I.VI – Variação mensal (em %) da precipitação nas estações udoográficas de Degracias e da região envolvente (1979/80 – 2006/07).....	119
Quadro I.I.I.I.VII – Coeficiente de variação da precipitação nas estações udoográficas de Degracias e da região envolvente (1979/80 – 2006/07).....	120
Quadro II.I.I – Contributo da secção de vazão menor para o caudal total dos Olhos d'Água do Anços de acordo com a altura da lâmina de água no descarregador.....	145
Quadro II.I.I.I – Precipitação anual (2009/2010 – 2012/2013) nas estações da Sra. da Estrela, Alvorge e Sicó e respectivos desvios à média (estação de Degracias, 1979/1980 – 2006/2007).....	155
Quadro II.I.I.II – Número (total) de dias com precipitação ($\geq 0,2$ mm), com precipitação moderada (10-20 mm) e com precipitação elevada (> 20 mm) na Sra. da Estrela nos anos hidrológicos de 2009/2010 a 2012/2013 e número (médio) de dias, nas mesmas classes, na série de referência (Degracias, 1979/1980 – 2006/2007).....	163
Quadro II.I.I.II.I – Evapotranspiração real anual (em mm) e infiltração efectiva anual (em mm) segundo os métodos de Turc, Coutagne e Thornthwaite, e respectivas percentagens relativamente ao total de precipitação anual para a série de referência e para o período 2009/2010 – 2012/2013, por ano.....	186
Quadro II.I.I.II.II – Determinação dos componentes do balanço hidrológico anual, em mm e Mm ³ , para a série de referência (Degracias) e para cada ano do período em estudo.....	190
Quadro II.I.I.II.III – Recarga relativamente à precipitação total (em percentagem) em hidrossistemas cársicos de média montanha em regiões do Mediterrâneo.....	192
Quadro II.I.I.II.IV – Coeficientes de correlação r entre as variáveis precipitação, temperatura, evapotranspiração real (ETR) e recarga na série de referência (estação de Degracias) e no período em estudo (estação da Sr ^a . da Estrela) para o conjunto do ano hidrológico e para o período de recarga (Novembro – Março).....	195
Quadro II.I.I.II.V – As componentes do balanço hidrológico (e relações percentuais entre elas) calculadas com base nos dados das estações de Degracias e da Sra. da Estrela (por ano).....	198
Quadro II.I.I.II.VI – Os quantitativos de precipitação, evapotranspiração real, recarga e caudal de Novembro a Março e respectiva percentagem face ao total anual. Relação percentual entre as referidas variáveis para o mesmo período.....	204
Quadro II.I.I.II.VII – Factores de correcção k para os valores de x	210
Quadro II.I.I.II.VIII – Recarga anual (em milímetros e em percentagem) calculada através do método de Kessler para a estação de Degracias (1979/1980 – 2006/2007) e para a Sra. da Estrela (2009/2010 – 2012/2013). Comparação com a recarga calculada pelo método do balanço hidrológico.....	212
Quadro II.I.I.II.IX – Precipitação acumulada nos períodos de Setembro-Dezembro e de Janeiro-Abril e respectiva percentagem face à precipitação anual (por ano hidrológico) e valores de recarga anual (em mm e %) segundo o método de Kessler para a estação de Degracias (1979/1980-2006/2007) e para a Sra. da Estrela (2009/2010-2012/2013).....	214
Quadro II.I.I.II.X – Pontuação atribuída às várias classes em cada uma das variáveis utilizadas no modelo APLIS (Altitude; Declive; Litologia; Áreas de infiltração preferencial; Tipo de Solo) e classes de recarga.....	220
Quadro II.I.I.II.XI – Pontuação atribuída a cada uma das variáveis utilizadas na determinação da distribuição da recarga no hidrossistema cársico de Degracias-Sicó (Altitude; Declive; Litologia; Áreas de infiltração preferencial; Usos do solo).....	223
Quadro II.I.I.II.XII – Valores da recarga anual – total (mm) e em percentagem – e valores percentuais máximos e mínimos de recarga segundo diferentes métodos de cálculo.....	228
Quadro II.IV.II.I – Resultados obtidos através da análise das séries da precipitação e do caudal (análise correlacional e espectral) para vários hidrossistemas europeus. Interpretação e aplicação dos conhecimentos aos respectivos hidrossistemas.....	273
Quadro II.IV.III.I – As recessões analisada na exsurgência dos Olhos d'Água do Anços (2009/2010 – 2012/2013).....	307
Quadro II.IV.III.II – Coeficientes de recessão (α) de cada segmento da curva de recessão, de acordo com a técnica de decomposição em curvas de recessão múltiplas proposta por Forkasiewicz e Paloc (1967).....	313
Quadro II.IV.III.III – Parâmetros hidrodinâmicos das funções de infiltração ao longo da zona não-saturada (Ψ) e de esgotamento (Φ) para todas as recessões dos Olhos d'Água do Anços.....	317
Quadro II.IV.III.IV – Parâmetros das funções de infiltração (Ψ) e de esgotamento (Φ) com aplicação ao conhecimento das características hidrodinâmicas e físicas dos respectivos hidrossistemas cársicos.....	319
Quadro II.IV.III.V – Volume de infiltração (V), volume dinâmico (V_d), coeficiente k e função i para cada uma das recessões, calculados pelo método de Mangin (1975).....	321
Quadro II.IV.IV.I – Coeficientes de correlação entre os valores diários das variáveis caudal e temperatura da água nos Olhos d'Água do Anços, temperatura do ar e precipitação na Sra. da Estrela (A) e parâmetros estatísticos de tendência central e de dispersão da temperatura diária da água para os Olhos d'Água do Anços (B) para o período 2009/2010 – 2012/2013 (medição contínua). Parâmetros estatísticos idênticos para as principais exsurgências do vale do rio Anços (C) – medições pontuais.....	334

Quadro II.IV.IV.II – Parâmetros estatísticos correspondentes aos valores de condutividade eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), por ano, nos Olhos d'Água do Anços (2011/2012 e 2012/2013) – comparação com os parâmetros estatísticos do caudal	341
Quadro II.IV.IV.III – Correlação (de Pearson) entre a precipitação (mm), caudal (m^3/s), condutividade eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) para a exsurgência dos Olhos d'Água do Anços	344
Quadro III.I.1 – Valores característicos do caudal e medidas de tendência central e de dispersão, por ano hidrológico, para as séries de caudal diário médio do rio Arunca (sub-bacia) e da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços	379
Quadro III.I.2 – Diferentes períodos na dinâmica hidrológica dos sectores cársico (exsurgência dos Olhos d'Água do Anços) e não-cársico (sub-bacia do rio Arunca) da bacia hidrográfica do rio Arunca (explicação da Figura III.I.4 B)	386

Índice de Figuras

Figura I.1.1 – A dualidade dos processos de recarga, armazenamento e circulação num hidrossistema cársico e respectivo efeito no hidrograma das surgências	39
Figura I.1.2 – Modelo conceptual de um hidrossistema cársico segundo Mangin (1975) – A e segundo Drogue (1974) - B	41
Figura I.1.3 – Características e funcionamento hidrológico do epicarso	44
Figura I.1.4 – Esquema dos principais tipos de circulação através da zona não-saturada	46
Figura I.1.5 – Modelo conceptual de um hidrossistema cársico onde se encontram integradas as perspectivas de Mangin, Drogue e Kiraly	49
Figura I.1.6 – Esquematização do funcionamento de um hidrossistema cársico	50
Figura I.1.7 – Classificação dos hidrossistemas cársicos com base na análise de série temporais (A) e com base na análise da curva de recessão (B) – Mangin (1975)	52
Figura I.1.8 – Valores característicos do declive da curva de recessão (t) para determinar os regimes de circulação num hidrossistema cársico (A). Hidrograma de uma surgência com decomposição da curva de recessão em vários troços, representativos dos diferentes tipos de circulação hipogea (B)	62
Figura I.1.9 – Curvas de distribuição de frequências (CDF) para vários hidrossistemas bastante carsificados	67
Figura I.1.10 – Padrões térmicos de uma surgência segundo Luhmann <i>et al.</i> (2012)	69
Figura I.III.1.1 – Localização e enquadramento geográfico do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó a nível regional (A) e a nível local (B), em relação à bacia hidrográfica do rio Arunca e à sub-bacia do rio Anços e com representação dos principais alinhamentos tectónicos, fundamentais na sua delimitação (B)	72
Figura I.III.1.2 – Esquema (provisório) da circulação hipogea nas serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere	75

11

Figura I.III.1.3 – O enquadramento da área de estudo na bacia do rio Arunca e no aquífero Sicó-Alvaiázere. Localização das saídas naturais do sistema aquífero – A. As exsurgências do vale do rio Anços (em destaque) – B	77
Figura I.III.1.4 – Caudal mensal médio (m^3/s) no período 1999/2000 – 2007/2008	79
Figura I.III.1.5 – Percentagem mensal de água drenada ao longo de três anos hidrológicos (2002/2003 – 2004/2005) por cada uma das quatro principais exsurgências do sector setentrional do hidrossistema cársico de Sicó-Alvaiázere	81
Figura I.III.1.1 – Mapa hipsométrico (A) e mapa de declives (B) da área em estudo e região envolvente com representação dos principais alinhamentos tectónicos que afectam o hidrossistema cársico de Degracias-Sicó	85
Figura I.III.1.2 – Esboço litológico e tectónico da região onde se insere a área de estudo com localização das principais exsurgências da parte setentrional do hidrossistema Sicó-Alvaiázere	88
Figura I.III.1.3 – Unidades morfo-estruturais da região de Condeixa-Pombal-Ansião-Alvaiázere	93
Figura I.III.1.4 – Esboço morfo-estrutural e principais aplanamentos das serras calcárias setentrionais e da Serra do Rabaçal	95
Figura I.III.1.5 – Corte geológico esquemático do Planalto de Degracias-Alvorge	98
Figura I.III.1.6 – Esboço morfo-estrutural e principais aplanamentos da Serra de Sicó	99
Figura I.III.1.7 – Formas cársicas de profundidade na área de estudo e região envolvente e áreas cobertas total ou parcialmente por depósitos (carso coberto e semi-coberto) na área de estudo	101
Figura I.III.1.8 – Mapa dos usos do solo na área em estudo e região envolvente a partir de Corine Land Cover (2006) com representação da localização das formas cársicas que favorecem a infiltração (algares, através da sua abertura superficial)	102
Figura I.III.1.1 – As estações udográficas e climatológicas utilizadas na caracterização pluviométrica da região onde se localiza a área de estudo, pertencentes ao Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), e as estações climatológicas por nós instaladas	105
Figura I.III.1.2 – Ensaio de Valor de Dupla Acumulação para a estação de Degracias e estações circunvizinhas	108
Figura I.III.1.3 – Precipitação anual, módulo, desvios da precipitação anual relativamente ao módulo, linha de tendência e médias móveis para um período de cinco anos para as estações de Degracias, Pombal, Soure, Penela, Alvaiázere e Freixianda	112
Figura I.III.1.4 – Gráficos pluviométricos da região onde se insere a área em estudo (1979/80 – 2006/07)	118
Figura I.III.1.5 – Tendência da variação mensal da precipitação para a média do conjunto de quatro estações (Pombal, Soure, Alvaiázere e Freixianda) no período de 1943/44 – 2006/2007	122
Figura I.III.1.6 – Relação da precipitação média anual com a altitude a que se localizam as estações udográficas/climatológicas na região onde se insere a área em estudo	123
Figura I.III.1.7 – Dendograma resultante da análise de <i>clusters</i> para as estações da região onde se localiza a área em estudo	124

Figura I.II.III.8 – A repartição espacial da precipitação anual média na região onde se insere a área de estudo (1979/1980 – 2006/2007)	125
Figura I.II.III.9 – Representação gráfica do balanço hidrológico do solo na região onde se localiza a área em estudo (1979/1980 - 2006/2007)	125
Figura II.I.1 – Esquema metodológico e sequencial da análise do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó na presente investigação	136
Figura II.I.2 – Olhos d'Água do Anços em diferentes contextos hidrológicos sazonais	141
Figura II.I.3 – Esquema da estrutura hidráulica nos Olhos d'Água do Anços e relação altura da água/funcionamento hidráulico para determinação do caudal	142
Figura II.I.4 – Equação e esquema da vazão subjacente à fórmula para caudal descarregado por orifícios retangulares com dois bordos horizontais	143
Figura II.I.5 – O contributo da secção menor de vazão para o total de caudal nos Olhos d'Água do Anços e a sua relação com a altura de água no descarregador – durante a estiagem (foto lado esquerdo) e no Inverno (foto lado direito)	145
Figura II.I.6 – Curva exponencial ajustada aos valores medidos no campo (micro-molinete) e que mostram a relação percentual do caudal na secção de vazão menor com o caudal total da exsurgência em função da lâmina de água no descarregador	146
Figura II.I.7 – Exsurgência do Ourão (A – Perspectiva geral das 2 saídas (final do Verão); B – saída conducente a um canal de regadio; C – saída próxima da sonda instalada).....	147
Figura II.I.8 – Esquema da estrutura hidráulica da exsurgência do Ourão e do seu funcionamento (A – visão frontal; B – visão de perfil das duas saídas de água da exsurgência. De salientar a representação do funcionamento hidráulico da saída mais afastada da sonda como descarregador e como orifício)	149
Figura II.II.1 – Inventariação dos dados das estações udoográficas instaladas na área de recarga (Sra.da Estrela, Alvorge e Serra de Sicó)	152
Figura II.II.2 – Fórmula da regressão linear utilizada para o preenchimento de falhas de dados nas estações de Sicó (a partir de Setembro de 2010) e de Alvorge (até Maio de 2011) a partir dos registos de precipitação diária da Sra. da Estrela. Coeficientes de determinação e de correlação de Pearson.....	153
Figura II.II.3 – Precipitação mensal nas estações da Sra. da Estrela, Alvorge e Sicó comparativamente à série de referência (Degracias) por ano hidrológico.....	157
Figura II.II.4 – Desvios (em percentagem e em milímetros) dos valores mensais de precipitação da estação udoográfica da Sra. da Estrela por ano hidrológico (A) e em relação à média (Degracias, 1979/1980 – 2006/2007) no período 2009/2010 – 2012/2013	158
Figura II.II.5 – Classificação pluviométrica mensal para as estações da Sra. da Estrela, Alvorge e Sicó, por ano hidrológico, segundo o método da divisão da série em percentis	161
Figura II.II.6 – Número de dias com precipitação superior a 20 mm (A) e percentagem de dias com mais de 20 mm no total de dias com precipitação (B) para a série de referência (Degracias, 1979/1980 – 2006/2007) e para o período analisado (Sra. da Estrela, 2009/2010 – 2012/2013)	165
Figura II.II.7 – Representação dos dias com precipitação superior a 1 mm por classes (1-10 mm; 10-20 mm e > 20 mm) e valor em mm da precipitação acumulada na sequência chuvosa para os anos hidrológicos de 2009/2010 a 2012/2013.....	167
Figura II.III.1 – Tipos de recarga e modos de circulação subterrânea num hidrossistema cársico	172

13

Figura II.III.2 – Evolução mensal da precipitação, temperatura média do ar, evapotranspiração real, recarga e caudal mensal médio na série de referência, no conjunto dos quatro anos e em cada ano hidrológico em estudo.....	197
Figura II.III.3 – Planos de observação de cada mês em relação às componentes do balanço hidrológico (precipitação mensal total, temperatura média mensal do ar, evapotranspiração real mensal, recarga mensal) obtidos a partir da análise em componentes principais para cada ano hidrológico.....	206
Figura II.III.4 – Relação entre a recarga anual (em percentagem) e a <i>DPR (determinative precipitation rate)</i> segundo Kessler (A) e após o ajustamento introduzido (B)	211
Figura II.III.5 – A distribuição e as características da recarga no hidrossistema cársico de Degracias-Sicó com base na adaptação do modelo APLIS. Variáveis utilizadas e respectiva importância espacial para o processo de recarga (A); mapa final da distribuição da recarga (B) e definição de sectores com alguma homogeneidade nas características da recarga (C)	231
Figura II.IV.1.1 – As exsurgências dos Olhos d'Água do Anços (A) e do Ourão (B) em diferentes contextos hidrológicos sazonais.....	237
Figura II.IV.1.2 – Caudal diário médio (m^3/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária (mm) na área de recarga (estação da Sra. da Estrela) no período 2009/2010 – 2012/2013. Representação conjunta (A) e individual (B) dos quatro anos hidrológicos.....	241
Figura II.IV.1.3 – Caudal diário médio (m^3/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela no início do ano hidrológico – Outubro de 2010 (A) e Outubro de 2012 (B).....	244
Figura II.IV.1.4 – Caudal diário médio (m^3/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela no mês de Novembro e início de Dezembro – 2009 (A); 2010 (B); 2011 (C); 2012 (D)	246
Figura II.IV.1.5 – A resposta dos Olhos d'Água do Anços no início do ano hidrológico: neste caso resposta a uma sequência curta e de elevada precipitação (130 mm em 3 dias) em Novembro de 2009	247
Figura II.IV.1.6 – Caudal diário médio (m^3/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela nos meses de Janeiro e Fevereiro – 2010 (A); 2011 (B) e 2013 (C)	249
Figura II.IV.1.7 – Olhos d'Água do Anços no Inverno (meses de Janeiro e Fevereiro).....	250
Figura II.IV.1.8 – Caudal diário médio (m^3/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela no mês de Março – 2011 (A) e 2013 (B)	251
Figura II.IV.1.9 – A exsurgência dos Olhos d'Água do Anços – sistema espeleológico em corte e em planta (A). Aspecto actual das saídas de água (B)	253
Figura II.IV.1.10 – Caudal diário médio (m^3/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela no final de Abril e no mês de Maio – 2011 (A) e 2012 (B)	254
Figura II.IV.1.11 – Caudal diário médio (m^3/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela de Junho a final de Setembro – Junho de 2010 e 2013 (A); Agosto e Setembro de 2012 (B)	256
Figura II.IV.1.1 – Autocorrelação (r_n) das séries de caudal diário médio das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão para o total da série, $n = 1459$ dias (A); dos Olhos d'Água	

do Anços para cada ano hidrológico (B) e para a estação chuvosa – Novembro a Março (C) e tabela-resumo; $m = n/3, k = 1$	267
Figura II.IV.II.2 – Densidade espectral, $S(f)$, das séries da precipitação diária na Sra. da Estrela e do caudal diário médio das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão para o total da série ($n = 1459$ dias)	275
Figura II.IV.II.3 – Representação da correlação cruzada entre as séries de precipitação diária na Sra. da Estrela e de caudal diário médio das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão (A) e dos Olhos d'Água do Anços para cada ano hidrológico (B) e para a estação chuvosa – Novembro a Março (C) e tabela-resumo	279
Figura II.IV.II.4 – Turbidez da água nas exsurgências do bordo ocidental do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó na sequência de episódios de precipitação elevada em diferentes momentos do ano hidrológico: alguns exemplos	281
Figura II.IV.II.5 – Representação da amplitude cruzada entre as séries de precipitação diária e de caudal diário médio das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão no período em estudo (2009/2010 – 2012/2013)	285
Figura II.IV.II.6 – Representação da <i>coherence function</i> entre as séries de precipitação diária (Sra. da Estrela) e de caudal diário médio das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão no período em estudo (2009/2010 – 2012/2013) e dos Olhos d'Água do Anços por ano hidrológico	286
Figura II.IV.II.7 – Representação da <i>phase function</i> entre as séries de precipitação diária (estação da Sra. da Estrela) e de caudal diário médio das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços no período em estudo (2009/2010 – 2012/2013) e por ano hidrológico	289
Figura II.IV.II.8 – Sequência temporal (provisória) do funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico de Degracias-Sicó (na resposta a um episódio de precipitação) elaborada a partir dos resultados obtidos na análise correlacional e espectral das séries diárias da precipitação e do caudal	295
Figura II.IV.II.9 – O hidrossistema cársico de Degracias-Sicó segundo a classificação proposta por Mangin (1975) a partir das análises correlatória e espectral das séries temporais do caudal e da precipitação (Nota: a tracejado, a classe onde se insere o hidrossistema em estudo)	296
Figura II.IV.III.1 – Esquema gráfico e expressões matemáticas da análise da curva de recessão de uma surgência de acordo com o método de Mangin (1975)	302
Figura II.IV.III.2 – Evolução, em percentagem, do escoamento rápido e do escoamento de base entre t_0 e t_1 em dois anos de características hidrológicas muito diferentes nos Olhos d'Água do Anços (recessão de 2011/2012 – ano muito seco; recessão de 2012/2013 – ano húmido)	304
Figura II.IV.III.3 – Recessão de 2010/2011 nos Olhos d'Água do Anços com pequeno pico de caudal (A) e após a eliminação desse pico (B). Hidrograma do ano hidrológico 2010/2011 (C) ..	306
Figura II.IV.III.4 – Esquema teórico da relação entre a forma do hidrograma, a quantidade de escoamento rápido / escoamento de base e o tipo de hidros-sistema e circulação associada (combinada – A; difusa – B; em condutas – C) perante precipitação idêntica	308
Figura II.IV.III.5 – Representação das cinco recessões em estudo: a diminuição do caudal diário médio no tempo (dias, desde o início da recessão) – imagem A; esvaziamento percentual do hidrossistema (<i>idem</i>) – imagem B. Representação gráfica linear (lado esquerdo) e semi-logarítmica (lado direito)	309
Figura II.IV.III.6 – Decomposição das curvas de recessão dos Olhos d'Água do Anços em três funções exponenciais, de acordo com a técnica de Forkasiewicz e Paloc (1967)	320
15	
Figura II.IV.III.7 – Evolução diária da função i durante o período de decrescimento para todas as recessões estudadas nos Olhos d'Água do Anços	320
Figura II.IV.III.8 – Volume diário drenado acumulado, em Mm^3 , de escoamento rápido e escoamento de base, ao longo de cada recessão	323
Figura II.IV.III.9 – Volume diário drenado acumulado, em Mm^3 , de escoamento rápido – A e de escoamento de base – B. Percentagem de volume drenado diariamente relativamente ao volume total armazenado para escoamento rápido – C e para escoamento de base – D	324
Figura II.IV.III.10 – Classificação do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó através da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços segundo a análise da curva de recessão (método de Mangin, 1975). Comparação relativa com outros sistemas cársicos (A) e representação no esquema classificativo de todas as curvas de recessão analisadas (B)	327
Figura II.IV.IV.1 – Representação dos valores diários de caudal (m^3/s) e da temperatura da água ($^{\circ}C$) nos Olhos d'Água do Anços, da temperatura diária média do ar ($^{\circ}C$) e precipitação diária (mm) na Sra. da Estrela nos anos hidrológicos de 2009/2010 a 2012/2013	332
Figura II.IV.IV.2 – Sedimentos em suspensão indicando a existência de circulação hipogea em regime turbulento (em condutas), no seguimento de recarga abundante e concentrada (111 mm de precipitação nos dois dias anteriores). Dia 17/11/2009, 12h; caudal instantâneo: 4,56 m^3/s	339
Figura II.IV.IV.3 – Evolução dos valores diários da condutividade eléctrica, da temperatura e do caudal dos Olhos d'Água do Anços e da precipitação na Sra. da Estrela nos anos hidrológicos de 2011/2012 (A) e 2012/2013 (B)	343
Figura II.IV.IV.4 – Representação gráfica da forma como a condutividade eléctrica recupera para os valores pré-evento pluvioso. Desenho esquemático (extraído de Auzmendi, 1988) – A e situação real ocorrida nos Olhos d'Água do Anços (Dezembro de 2012) – B	348
Figura II.IV.IV.5 – Distribuição das frequências da condutividade eléctrica da água drenada pelos Olhos d'Água do Anços nos anos hidrológicos de 2011/2012, 2012/2013 e no conjunto da série)	355
Figura II.IV.IV.6 – Evolução horária do caudal, temperatura e condutividade eléctrica das águas dos Olhos d'Água do Anços e precipitação horária na Sra. da Estrela durante o Outono em cada um dos anos de estudo (2011/2012 e 2012/2013). Em Novembro de 2011 (A) e Dezembro de 2012 (B)	355
Figura II.IV.IV.7 – Evolução horária do caudal, temperatura e condutividade eléctrica das águas dos Olhos d'Água do Anços e precipitação horária na Sra. da Estrela de Janeiro a Maio de 2013. Representação do período completo (A) e por episódio (restantes gráficos)	359
Figura II.IV.IV.8 – Representação esquemática dos atrasos da resposta da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços para alguns episódios de recarga em diferentes contextos hidrometeorológicos de 2011/2012 e 2012/2013	363
Figura II.IV.IV.9 – Sequência temporal (completa) do funcionamento hidrológico do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó na resposta a um episódio de recarga elaborada a partir dos resultados da análise do hidrograma e do comportamento da temperatura e da condutividade eléctrica da água da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços	366
Figura III.1.1 – As sub-bacias do rio Arunca e do rio Anços e o hidrossistema cársico de Degracias-Sicó no conjunto da bacia hidrográfica do rio Arunca. Mapa hipsométrico (A) e mapa de declives (B) com a localização das estações hidrométricas (EH) e climatológicas (EC) em cada um dos sub-sectoros em estudo	375
Figura III.1.2 – A litologia e a rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Arunca	376

Figura III.1.3 – Hidrograma dos caudais diários médios do rio Arunca (secção do Sobral) e da precipitação em Santiago de Litém (A); hidrograma conjunto do rio Arunca e da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços (B); hidrogramas dos Olhos d'Água do Anços com a precipitação da Sra. da Estrela e do rio Arunca com a precipitação de Santiago de Litém, por ano hidrológico	382
Figura III.1.4 – Representação dos caudais diários médios na exsurgência dos Olhos d'Água do Anços e no rio Arunca por ano hidrológico (A) e na totalidade da série (B).	385
Figura III.1.5 – Caudais horários médios do rio Arunca (Sobral) e da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços	390
Figura III.1.6 – A resposta do rio Arunca (sub-bacia, sector não-cársico) e do rio Anços (sector cársico) à ocorrência de precipitação	395
Figura III.1.7 – O tempo de resposta dos sectores cársico e não-cársico da bacia hidrográfica do rio Arunca a partir da representação de episódios de cheia em diferentes contextos hidrometeorológicos, com base no caudal horário médio (m^3/s) do rio Arunca (Sobral) e da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços e na precipitação horária de Santiago de Litém (Pombal) e da Sra.da Estrela	398
Figura III.1.8 – Decrescimento do caudal horário médio no rio Arunca (Sobral) após a ponta de cheia: nas 48 horas posteriores (A); nas primeiras 6 horas (B) e depois de 10 horas após a ponta de cheia (C)	403
Figura III.1.9 – Decrescimento do caudal horário médio no rio Arunca (Sobral) e na exsurgência dos Olhos d'Água do Anços no mesmo episódio hidrometeorológico	405

RESUMO

As características hidrogeológicas das regiões cársicas são complexas e significativamente diferentes das dos meios porosos e fissurados. Estruturas subterrâneas compostas por poros, fissuras, fracturas e condutas de várias dimensões e formas, e com uma significativa descontinuidade e variabilidade dos parâmetros hidráulicos, originam condições de circulação subterrânea profundamente complexas e de grande especificidade. Por isso, o estudo das características hidrodinâmicas à escala regional constitui um enorme desafio devido à complexidade, originalidade e heterogeneidade destes meios.

Este trabalho procura aprofundar o conhecimento do comportamento hidrodinâmico cársico segundo uma perspectiva funcional (caudal, temperatura e condutividade eléctrica nas exsurgências). Simultaneamente, este estudo procura inferir algumas características gerais da drenagem hipogea, em particular a sua estruturação e funcionalidade, e do próprio hidrossistema, nomeadamente a sua capacidade de armazenamento e grau de carsificação interna. Esta perspectiva de análise fornece resultados muito relevantes, uma vez que a água drenada por uma surgência traz impresso o funcionamento global interno do hidrossistema cársico. Por essa razão, o funcionamento hidrodinâmico é entendido e analisado neste trabalho numa perspectiva de análise *input-output* de sistemas, estabelecendo relações entre a precipitação/recarga (*input*) e o caudal (*output*), sendo, por isso, o hidrossistema considerado como uma 'caixa-negra'.

No presente estudo, utiliza-se uma combinação de três métodos de análise profusamente aplicados e testados na investigação do funcionamento hidrogeológico cársico: a análise das séries temporais da precipitação e do caudal (análise correlatória e espectral), a análise da curva de recessão e a interpretação hidrodinâmica da variação da temperatura e da condutividade eléctrica da água numa exsurgência.

O período de estudo e a recolha de dados estenderam-se por quatro anos (2009/2010 – 2012/2013), à excepção da condutividade eléctrica, em que foram apenas considerados dois anos, tendo sido o registo de dados, em todas as variáveis, efectuado com uma periodicidade de 20 minutos.

A área de estudo é o hidrossistema cársico de Degraças-Sicó, localizado na região centro-oeste de Portugal, totalizando uma área de, aproximadamente, 120 Km², constituído por calcários do Dogger, extremamente fracturados e com um elevado grau de carsificação no seu bordo ocidental. A área de recarga situa-se sobretudo entre os 300 m - 550 m de altitude e é bastante aplanada, embora seja significativamente heterogénea do ponto de vista da espessura do solo/epicarso bem como da distribuição das formas cársicas com influência na infiltração (por exemplo lapíás e algares). Os principais locais de descarga do

19

hidrossistema são exsurgências tanto de carácter permanente como temporário, localizadas entre os 40 m e os 70 m ao longo do bordo oeste, sendo a principal, a exsurgência dos Olhos d'Água do Anços, com um caudal anual médio de 1,3 m³/s e significativas oscilações entre o caudal drenado na estiagem (0,2 m³/s) e o caudal drenado em situação de cheia invernal (5 m³/s ou mais).

No que se refere à estrutura da tese, a primeira parte é constituída por dois capítulos: o primeiro dedicado às questões teóricas da hidrologia cársica e à revisão da literatura científica da especialidade, contemplando os principais temas debatidos e estudados nas últimas décadas, enquanto o segundo capítulo é dedicado à caracterização geográfica, geomorfológica e climática da área em estudo. A segunda parte da tese centra-se na investigação do funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico e encontra-se dividida em dois tipos de análise: a da recarga do hidrossistema (quantificação e distribuição temporal ao longo do ano hidrológico; repartição espacial) e a abordagem minuciosa da descarga com a aplicação de três métodos, sendo dada particular ênfase à determinação do atraso da resposta da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços a um episódio pluvioso, de modo a quantificar o atraso *input-output*. A terceira, e última parte, demonstra a especificidade do funcionamento hidrodinâmico cársico por comparação com a dinâmica hidrológica fluvial da sub-bacia do rio Arunca (parte não-cársica do conjunto da bacia hidrográfica do rio Arunca).

Os resultados obtidos revelam um comportamento hidrodinâmico bimodal, o que mostra a dualidade do hidrossistema em estudo: por um lado, o pequeno atraso entre a ocorrência de um episódio de precipitação e a resposta da exsurgência expressa a existência de uma rede funcional de condutas, que rapidamente drenam o hidrossistema (escoamento rápido). Por outro lado, o carácter de grande inércia traduzido no seu elevado efeito de memória, elevada capacidade de armazenamento, forte não-linearidade, boa capacidade de filtragem e esvaziamento lento das reservas. Finalmente, a análise comparativa com a sub-bacia do rio Arunca prova o carácter específico e complexo desta hidrodinâmica cársica.

O contributo deste estudo para a análise hidrológica e compreensão dos hidrossistemas cársicos reside em mostrar que este tipo de análise, baseada em mais do que um método, constitui uma excelente abordagem na investigação dos hidrossistemas cársicos. No entanto, algumas questões relativas ao funcionamento hidrodinâmico permanecem ainda pouco claras, o que significa que a investigação deve prosseguir, com recurso a outras técnicas (análise hidrogeoquímica, por exemplo) e as séries de dados mais extensas.

Palavras-chaves: hidrossistema cársico; funcionamento hidrodinâmico; análise de séries temporais; análise da curva de recessão; características físicas das águas das exsurgências; escoamento rápido; escoamento de base; carsificação.

ABSTRACT

Hydrogeological characteristics of the karst terrains are complex and significantly different from the characteristics of granular media. Underground structures of pores, fissures, fractures and conduits of various size and forms with significant spatial and temporal variability and discontinuity of hydraulic and geometric parameters create complex hydrogeological conditions for groundwater flow. Therefore, the regional study of hydrodynamic characteristics of karst aquifers is challenging due to this complexity and specificity.

This thesis aims to provide a deeper knowledge of the hydrodynamic behaviour of a karst aquifer from a functional point of view (spring flow, water temperature and electrical conductivity). Furthermore, this study intends to infer some general characteristics of the structure of the karst aquifer, mainly in terms of functionality of network drainage system, storage capacity and internal degree of karstification. This approach provides valuable results because spring response reflects a composite of everything that happens upstream. As a result, water discharging from a karst spring carries an imprint of the global functioning of the aquifer. For that reason, the hydrodynamic behaviour of the karst aquifer is studied here from an input/output systems analysis viewpoint, establishing the relationship between hydrometeorological inputs and the spring discharge as outputs. From this point of view, karst aquifer is considered as a black-box.

This study applies a combined approach of three methods, which are widely used on the investigation of the hydrogeological functioning of karst water systems: time series analysis of rainfall and discharge rate (correlation and spectral analysis); recession curve analysis and, finally, the hydrodynamic interpretation of water temperature and electrical conductivity variations at spring flow. The data of rainfall and spring water temperature and discharge was collected for four hydrological years (1st October 2009 to 30th September 2013) and the spring water electrical conductivity for two years only (1st October 2011 to 30th September 2013). The data loggers register each every twenty minutes.

The study area is the Degraças-Sicó karst aquifer, which lies at the central-western part of Portugal and has an area around 120 square kilometers. Concerning its geology, Degraças-Sicó karst aquifer consists in Dogger limestones with a high level of karstification and extremely faulted at western shore. The recharge area altitude is around 300 – 550 meters a.s.l. and is quite flat but heterogeneous in terms of soil/epikarst thickness spatial distribution and karst surface forms as well. The discharge points are intermittent and perennial springs at 40-70 meters a.s.l. thus the vertical flow is predominant in this karst aquifer. The main outlet of the system is Olhos d'Água do Anços that presents a significant annual discharge flow variations (0.2 m³/s at low waters to 5 m³/s at winter floods).

21

In terms of thesis structure, the first part has two chapters: the first presents a resumed theoretical perspective of karst hydrology and a wide state-of-the-art of main subjects that has been discussed over last decades. The second chapter deals with the geographical, geomorphological and meteorological characteristics of the study area, which conditioned the input and output processes. The second part of thesis concentrates the investigation of the karst aquifer hydrodynamic functioning and is divided in two main themes: the recharge analysis (quantification and temporal patterns; spatial distribution) and the spring discharge analysis with the application of three methodological approaches. Special attention was dedicated to estimate the lag time and response time of spring flow in order to quantify the delay input-output. Third part compares this karstic hydrodynamics to the hydrological behaviour of Arunca river (non-karstic basin).

The results demonstrate a bimodal hydrodynamic behaviour, which indicates the duality of the studied karst aquifer: a short delay between rainfall and spring response reveals a functional karst conduits network, which quickly drains the aquifer (*quickflow*). On the other hand an inertial character produced by its long memory effect, high storage capacity, strong non-linearity, good filtering effect and slow emptying of the reserves (*baseflow* dominance). Finally, the conclusions of the comparative hydrological analysis of karstic system and Arunca river system prove the high complexity and very specific functioning of karst system.

The improvements on the knowledge of the hydrodynamic behaviour of the studied karst aquifer reflect that this methodological approach provides an excellent method to research hydrological karst systems. However, some questions on hydrodynamic functioning of Degraças-Sicó karst system remain poor understood, what means the investigation with other methodologies (especially hydrochemistry) and longer data series have to proceed.

Key words: karst aquifer; karst hydrodynamic functioning; time series analysis; recession curve analysis; spring water physical characteristics; quickflow; baseflow; karstification

INTRODUÇÃO

A água proveniente dos hidrossistemas cársicos constitui uma das mais importantes fontes de abastecimento hídrico para a crescente população mundial. Estima-se que cerca de 20 a 25% da população de todo o mundo dependa, larga ou inteiramente, da água fornecida por estes meios (Ford e Williams, 2007), enquanto, em alguns países europeus, essa percentagem ascende aos 50% (COST 65, 1995). Este último valor, embora pareça elevado, decorre do facto de 35% da superfície liberta de gelo na Europa ser constituída por rochas carbonatadas (Geyer, 2008).

Para além destes valores impressionantes, a importância que estes hidrossistemas assumem em algumas regiões com elevada carência de água e em climas semi-áridos (na bacia mediterrânica, por exemplo) tem orientado os esforços da investigação, no intuito de um conhecimento mais aprofundado e pormenorizado destes meios, tão cruciais quanto complexos (Bakalowicz, 2005; White, 2002).

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 meios porosos e fracturados. A principal particularidade destes hidrossistemas é a presença de um terceiro tipo de permeabilidade (o sistema de condutas) com elevada condutividade hidráulica. O desenvolvimento dessa rede de canais preferenciais de drenagem introduz uma elevada anisotropia e uma enorme variabilidade temporal e espacial nos parâmetros hidráulicos, realidade apresentada por vários autores

23

numa perspectiva de dualidade funcional e estrutural do hidrossistema cársico, segundo a qual, as propriedades hidráulicas destes meios se aproximam de um sistema fissurado de baixa permeabilidade mas com grande capacidade de armazenamento, drenado por uma rede de condutas de elevada permeabilidade mas reduzida capacidade de retenção e acumulação de água (Mohrlok e Sauter, 1999).

Devido às suas características hidrogeológicas únicas, o estudo dos hidrossistemas cársicos, ainda que numa perspectiva integrada (entendendo o hidrossistema como um todo) requer dados e métodos específicos, ao que acresce o facto de, em muitos casos, os métodos utilizados pela hidrogeologia clássica (estudo de poços, ensaios de bombagem, métodos geofísicos, modelização, entre outros) não se poderem aplicar nestes meios. As dificuldades e as restrições que se colocam, em termos metodológicos e práticos, no estudo destes meios tão específicos, fazem da análise das respostas das surgências um método apropriado, consistente e de relativa simplicidade na compreensão dos processos hidrodinâmicos que aí ocorrem. Nesta perspectiva, o hidrossistema cársico é estudado numa concepção funcional, segundo a qual é caracterizado e analisado a partir das suas respostas naturais, com métodos e técnicas específicas (*perspectiva funcional de análise*).

Estes sistemas constituem, portanto, um objecto de estudo desafiante do ponto de vista da ciência hidrológica, mais precisamente no domínio da hidrogeologia, e da própria ciência geográfica, em particular na gestão dos recursos hídricos e no ordenamento e planeamento do território, dada a grande susceptibilidade destes meios à contaminação.

O presente estudo surge neste contexto de ligação entre as ciências hidrológica e geográfica, procurando conhecer e compreender o comportamento hidrodinâmico de um maciço cársico até agora pouco estudado do ponto de vista hidrológico, em função da reduzida (e descontinua) informação quantitativa existente (apenas medições pontuais de caudal em algumas exsurgências) e dos escassos estudos que abrangeram esse domínio temático (Crispim, 1986; Carreira, 1986; Rebelo, 1987; Cunha, 1988; Almeida, 2000).

Essa é a ideia-base que norteia este estudo e que irá sobressair desde os primeiros capítulos: a tentativa de conhecer, de modo mais aprofundado, o funcionamento hidrodinâmico do aqui designado 'hidrossistema cársico de Degraçias-Sicó' a partir das suas repostas naturais. Procuraremos, pois, com base em métodos de análise cientificamente comprovadas, o estudo minucioso dos registos digitais do caudal, da temperatura e da condutividade eléctrica da água do principal exutório deste hidrossistema – a exsurgência dos Olhos d'Água do Anços (bordadura ocidental do maciço cársico, ao longo do vale do rio Anços). Investigaremos, a partir da monitorização contínua dessas variáveis (periodicidade de 20 minutos), o funcionamento hidrodinâmico deste sistema cársico em diversos contextos hidrometeorológicos ao longo de quatro anos hidrológicos (2009/2010 – 2012/2013). Os vincados contrastes quantitativos e de distribuição temporal da precipitação durante este

período constituem uma mais-valia que sobressairá da análise aqui apresentada por fornecer informação relevante para o conhecimento da dinâmica hidrogeológica deste complexo hidrossistema, em diferentes contextos hidrometeorológicos.

No decurso do trabalho iremos deparar-nos com algumas dificuldades na interpretação de resultados, decorrentes de constrangimentos que, apesar de não invalidarem a análise, a limitaram de forma, por vezes, significativa. A primeira contrariedade surgirá logo no início do estudo de caso devido à interferência, nos registos da exurgência do Ourão, do represamento artificial da água drenada por este exutório e às sucessivas interferências antrópicas no seu mecanismo de drenagem. Deste modo, o amortecimento dos picos de caudal no período húmido e o aumento da vazão em águas baixas, bem como os comportamentos infundados na evolução do caudal (por acção antrópica) são responsáveis por não termos considerado esta exurgência na análise de pormenor da relação recarga – descarga. O seu contributo será apenas considerado em situações hidrológicas circunstanciais para confirmar comportamentos que se verificam nos Olhos de Água do Anços e que se assumem, a partir daí, como uma característica do próprio hidrossistema.

Assim sendo, a análise que aqui se efectua não permitirá conhecer de forma aprofundada e fundamentada a espacialização dos processos de circulação interna do sistema cársico, detectáveis no hidrograma e nas características das águas drenadas. Esta limitação na análise espacial da drenagem subterrânea será notada em alguns pontos deste trabalho em resultado da impossibilidade de realização de traçagens artificiais, uma importante contrariedade neste tipo de estudos.

A investigação que aqui se apresenta incide, quase inteiramente, sobre a resposta natural do hidrossistema, registada no seu principal exutório – a exurgência dos Olhos d'Água do Anços (variação do caudal, da temperatura e da condutividade eléctrica da água). Tendo por base estes registos, os objectivos que se estabelecem e que procuraremos concretizar no decurso desta investigação podem apresentar-se do seguinte modo:

(i) numa perspectiva geral, procurar compreender a relação *input-output*, que se estabelece ao longo do ano hidrológico, entre a água que cai e se infiltra na área de recarga (Serras de Sicó e Rabaçal e Planalto Degracias-Alvorge) e os principais exutórios do hidrossistema, na sua bordadura ocidental;

(ii) de uma forma mais pormenorizada, procurar conhecer o modo como o hidrossistema responde a diferentes quantitativos de recarga (em termos de duração e intensidade) em diferentes momentos do ano hidrológico, tentando obter mais informação, em particular sobre a circulação subterrânea e, a partir daí, inferir algumas características físicas do hidrossistema.

Numa perspectiva mais individualizada, ao longo deste estudo procuraremos:

25

(i) conhecer a resposta do hidrossistema a um sinal de *input* em diferentes contextos hidrometeorológicos ao longo do ano hidrológico, determinando o atraso da resposta e a duração dessa mesma resposta;

(ii) entender o processo de recarga (quantidade e ritmo) e o modo como as características da área de recarga o influenciam (distribuição espacial da recarga);

(iii) compreender o funcionamento do hidrossistema no período de águas altas, particularmente em situação de cheia e com diferentes valores de precipitação acumulada até à data;

(iv) identificar parâmetros quantitativos (através da *análise de séries temporais* e da *análise da curva de recessão*) que permitam conhecer os diferentes momentos (e tipos de escoamento associados) na drenagem interna do hidrossistema e interpretar o seu significado hidrogeológico;

(v) compreender (através da análise da condutividade eléctrica e da temperatura da água) a proveniência da água drenada pelas exurgências, identificando, ainda que de modo relativo, o tempo de residência no interior do hidrossistema em diferentes contextos hidrometeorológicos ao longo do ano hidrológico;

(vi) determinar as reservas do hidrossistema e identificar tendências a longo prazo nos caudais, de forma a poder prever o comportamento em situação de seca;

(vii) inferir o grau de carsificação do hidrossistema com base na informação fornecida pelo execução dos objectivos precedentes e, se possível, espacializar essa carsificação com o auxílio de ferramentas e exercícios cartográficos;

(viii) provar a especificidade da hidrodinâmica cársica mediante a comparação do comportamento da exurgência dos Olhos d'Água do Anços com o regime do rio Arunca (correspondendo à drenagem do sector não-cársico da bacia hidrográfica deste curso de água).

No intuito de uma plena concretização destes objectivos serão utilizados três métodos de análise, profusamente aplicados com sucesso no estudo da hidrodinâmica cársica: (i) a análise das séries temporais (diárias) da precipitação e do caudal; (ii) a análise da curva de recessão; (iii) a análise da variação da condutividade eléctrica e da temperatura das águas drenadas pelos Olhos d'Água do Anços. A utilização dos dois primeiros métodos procurará explorar, respectivamente, a análise estrutural das séries cronológicas e a análise detalhada da parte descendente do hidrograma (decréscimo e esgotamento). Com a aplicação do último método focar-nos-emos na evolução pormenorizada do comportamento das características físicas da água, particularmente em situação de resposta a um episódio pluvioso. Tentaremos, pois, com a conjugação destes três métodos, demonstrar o grau de organização da drenagem cársica subterrânea mediante a relação *input-output* dado que

assim se considera, em simultâneo, as características da precipitação/recarga (*input*) e o poder regulador dos hidrossistema.

A disposição sequencial dos métodos ao longo deste estudo seguirá uma ordem de escala do menor para o maior pormenor. Nos dois primeiros métodos centrar-nos-emos na análise do hidrograma, tentando identificar, mediante as análises correlatória e espectral, variações cíclicas nas séries dos dados diários da precipitação e do caudal. Por se definir como um método que deve situar-se logo no início deste tipo de abordagem conjunta de vários métodos, procuraremos que os resultados obtidos nos forneçam as primeiras informações sobre o funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico em estudo. Para além disso, ao considerar o conjunto do ano hidrológico, a análise de séries temporais fornecerá, também, informação sobre os comportamentos hidrodinâmicos a nível anual, sazonal, mensal até ao nível diário, para que consigamos, simultaneamente, identificar padrões e tendências temporais e relações relativamente pormenorizadas entre a precipitação e o caudal.

A aplicação do segundo método – análise da curva de recessão – completará o anterior no estudo do hidrograma e permitirá a confirmação de algumas das características do hidrossistema, já emanadas da análise de séries temporais. Centrando-se na curva de recessão (decrescimento e esgotamento), este método reveste-se de enorme importância neste trabalho, já que fornecerá informação valiosa sobre o modo como decorre o esvaziamento progressivo do hidrossistema e sobre o volume das reservas da zona saturada, aspecto fulcral na gestão dos recursos hídricos destas regiões.

O último método apresentará muito maior pormenor (dados horários), uma vez que se pretende examinar, pormenorizadamente, a resposta da exurgência dos Olhos d'Água do Anços a episódios de precipitação de variada intensidade e duração, em diferentes contextos sazonais. Esta abordagem, centrada na variação da temperatura e da condutividade eléctrica da água desta exurgência, completará a análise realizada até este ponto e, acima de tudo, permitirá que se retirem conclusões devidamente fundamentadas sobre o funcionamento hidrodinâmico deste sistema cársico.

No que se refere à sua estruturação, o trabalho encontra-se distribuído ao longo de três partes, perfeitamente individualizadas e com dimensões substancialmente diferentes: a Parte I será dedicada ao enquadramento e discussão teóricos do tema em análise (Capítulo I) e à caracterização da área de estudo (Capítulo II), em particular no que respeita às características geomorfológicas, litológicas e climatológicas que interferem, de forma preponderante, em todo o processo de recarga – descarga. A Parte II constituirá o cerne deste trabalho, com a análise aprofundada do funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico de Degracias-Sicó, primeiramente com o estudo da recarga, a que se seguirá a aplicação de cada um dos métodos utilizados nesta investigação e a apresentação das

27

respectivas conclusões. A Parte III encerrará a investigação, apresentando um carácter fortemente comparativo, no intuito de comprovar a especificidade da hidrodinâmica cársica. O exercício empreendido nesta parte final do trabalho centrar-se-á na análise do comportamento hidrológico, em simultâneo, da exurgência dos Olhos d'Água do Anços e da sub-bacia do rio Arunca (sector não-cársico da bacia do rio Arunca), perante cenários hidrometeorológicos variados.

O capítulo inicial será dedicado ao enquadramento teórico deste estudo, onde se procurará discutir a terminologia que molda estes temas, as várias perspectivas conceptuais de 'hidrossistema cársico' e os modelos utilizados no seu estudo, sendo dado particular realce aos modelos de 'caixa-negra'. Neste capítulo, procuraremos evidenciar e sublinhar a complexidade, a heterogeneidade e a especificidade destes meios, de forma a enquadrar os desafios e as dificuldades da presente investigação.

O segundo capítulo da Parte I englobará a apresentação do hidrossistema em estudo bem como a sua caracterização física. O início do capítulo será marcado pela apresentação dos critérios que presidem à sua delimitação, tarefa complexa neste tipo de hidrossistemas. A caracterização do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó ocupará a maior parte deste capítulo, dada a crucial influência que características físicas como a litologia, a fracturação, a carsificação, o declive, o tipo de solo, a vegetação, bem como as características climáticas da área, exercem sobre a sua hidrodinâmica. A apresentação e a discussão que se farão neste capítulo têm um carácter essencial na tentativa de interpretação do comportamento do hidrossistema, que a seguir se estuda detalhadamente.

A Parte II iniciar-se-á com a discussão da abordagem e esquematização metodológicas que presidem a este trabalho, bem como do modo de obtenção das séries de dados a utilizar de seguida. O Capítulo II constituirá o início do estudo de caso, com a análise da precipitação registada no período 2009/2010 – 2012/2013 a diferentes escalas temporais (ano, mês, dia). Os resultados obtidos serão reportados à série de referência – a estação udográfica de Degracias - cuja série de registos de quase 30 anos (1979/1980 – 2006/2007), embora sem coincidência temporal com o período em estudo, constitui uma excelente referência pela proximidade geográfica e idêntica posição altitudinal face à estação udográfica que instalámos no sector ocidental da área de recarga (estação da Sra. da Estrela).

O terceiro capítulo será inteiramente dedicado ao processo de recarga, iniciando-se com a necessária discussão sobre o cálculo da evapotranspiração nas regiões cársicas e os processos de cálculo da recarga que, no presente estudo, são o método do balanço hidrológico e o método de Kessler. Procuraremos, ainda, neste capítulo, definir a espacialização da recarga com base em exercícios cartográficos em ambiente SIG, com ponderação do grau de influência dos diferentes factores físicos neste processo, de acordo com as bases

metodológicas do modelo APLIS. Este modelo, acrónimo dos termos Altitude, Declive (Pendientes), Litologia, Áreas de Infiltração Preferencial e Tipo de Solo, será ajustado às características da área de estudo, e permitirá, em simultâneo, a determinação da taxa de recarga e a visualização da sua distribuição espacial.

O extenso Capítulo IV englobará a análise completa do *output* mediante a aplicação dos três métodos considerados para o efeito. Após a caracterização das exurgências do bordo ocidental do hidrossistema, em especial dos Olhos d'Água do Anços, iniciaremos o estudo com a análise das séries de dados diários da precipitação e do caudal. O hidrossistema é, portanto, equipado a uma 'caixa-negra', onde a precipitação e o caudal representam, respectivamente, o sinal de entrada e o sinal de saída, avaliando-se o grau de transformação do sinal de entrada a partir das características do sinal de saída. Seguir-se-á a análise da curva de recessão, cuja forma, sendo uma função das características da circulação na zona não-saturada e da quantidade de água existente na zona saturada, permitirá obter informações bastante relevantes sobre a capacidade de retenção temporária e de armazenamento bem como do modo como ocorre o seu esvaziamento.

O estudo das curvas de recessão será elaborado com base na sua decomposição em várias funções exponenciais, de acordo com a técnica proposta por Forkasiewicz e Paloc (1967) e na decomposição em duas funções, tal como proposto por Mangin (1975). Serão analisadas cinco curvas de recessão, correspondentes ao período de águas baixas e estiagem (de Maio a Outubro) nos quatro anos e ao período invernal de 2011/2012, traduzindo, esta última, a situação anómala de seca meteorológica que caracterizou esse período. Por último, será empreendida uma análise minuciosa (dados horários) da temperatura e da condutividade eléctrica da água drenada pela exurgência dos Olhos d'Água do Anços. Com a avaliação destes dois parâmetros, tentaremos confirmar e compreender ainda melhor a origem, o percurso e o tempo de residência da água no interior do sistema cársico e, assim, retirar informações cruciais sobre o funcionamento do hidrossistema (desenvolvimento e organização da rede de drenagem e, conseqüentemente, o grau de carsificação no interior do hidrossistema). Esta parte nuclear do presente estudo permitirá compreender e, simultaneamente, provar a heterogeneidade e a complexidade de que se reveste a dinâmica hidrológica destes hidrossistemas, sublinhando a sua especificidade.

Na Parte III, após termos demonstrado as principais características do funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico de Degracias-Sicó, reforçaremos a sua especificidade mediante a comparação do hidrofuncionamento cársico com a dinâmica fluvial, representada pelo rio Arunca (sub-bacia que ocupa o sector não-cársico da bacia hidrográfica do rio Arunca, bacia à qual pertence também o hidrossistema cársico em estudo). Depois de apresentadas, de forma breve, as principais características físicas desse sector não-cársico

far-se-á a comparação entre os hidrogramas do hidrossistema de Degracias-Sicó e do rio Arunca já muito próximo da sua parte vestibular, mas ainda sem o contributo do sector cársico. Tentaremos abranger, nesta análise, um diversificado conjunto de situações hidrometeorológicas e respectivos comportamentos hidrodinâmicos.

Não obstante os obstáculos e as limitações de vária ordem que foram surgindo, e que serão notadas no decurso deste trabalho, consideramos que o presente estudo constitui um ponto de partida no estudo do hidrossistema de Degracias-Sicó. Um contributo para se compreender e explicar cientificamente o que os moradores desta região – as amáveis 'gentes do carso' – empiricamente descrevem como sendo um fenómeno divino que o homem não é capaz de decifrar.

PARTE I

**ENQUADRAMENTO TEÓRICO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA
DO MACIÇO CÁRSICO DE SICÓ E REGIÃO ENVOLVENTE**

CAPÍTULO I

HIDROSSISTEMAS CÁRSICOS: UM DOMÍNIO HIDROLÓGICO COM GRANDE ESPECIFICIDADE

1. Estrutura e funcionamento

1.1. Os conceitos de *aquífero cársico* e *hidrossistema cársico*. Terminologia utilizada

Na sua acepção mais abrangente, *aquífero cársico* inclui qualquer unidade geológica carsificada que contenha água subterraneamente (circulação e armazenamento) – Perrin (2003). No entanto, a designação *aquífero cársico* é geralmente utilizada como sinónimo de *aquífero carbonatado*, restringindo-se, assim, a rochas calcárias e dolomíticas¹.

O conceito de *aquífero cársico* tem sido amplamente discutido, sem que, no entanto, se chegue a uma definição consensual, havendo autores que consideram a noção de 'aquífero' demasiado limitativa e até simplista para uma entidade hidrogeológica tão complexa (Marsaud, 1996; Worthington e Ford, 2009; Gunn, 2010). Alguns autores optam, por isso, pela utilização de *sistema cársico* (Mangin, 1975; Marsaud, 1996) ou *hidrossistema cársico* (Bailly, 2009).

De acordo com Gunn (2010), o termo 'aquífero' aplicado ao carso pode, inclusive, induzir em erro, uma vez que, no seu sentido mais comum, significa um simples corpo de rochas permeáveis que comporta uma zona saturada, onde se armazena e circula água, que se movimenta segundo um determinado gradiente hidráulico até um ponto de saída.

¹ No presente estudo, o termo *aquífero cársico* é ainda mais restrito, referindo-se apenas a rochas calcárias mesozóicas (calcários do Dogger).

Nesta perspectiva, os aquíferos são maioritariamente analisados e modelados como um meio poroso, condições que raramente se aplicam a rochas carbonatadas devido ao desenvolvimento, por dissolução, de redes organizadas de canais de drenagem subterrânea.

Esta interpretação decorre dos trabalhos de Mangin (desde a década de 70 do século passado), que considerou a definição de 'aquífero' demasiadamente restritiva quando aplicada ao carso, tendo, conseqüentemente, proposto a utilização de *sistema cársico* que definiu como um "conjunto no qual os escoamentos subterrâneos do tipo cársico se organizam para constituir uma unidade de drenagem". Para além de uma definição mais ajustada às características complexas e específicas da drenagem em meios cársicos introduziu a noção de 'bacia hidrogeológica' de uma surgência ou de um grupo de surgências com ligação hidráulica (Soullos, 1991) e englobou as áreas não-cársicas, de onde provém o escoamento que se perde nos sumidouros (Marsaud, 1996).

A designação *aquífero cársico* tem sido aplicada em âmbitos variados, por vezes com um sentido bastante restrito, noutros casos com um sentido muito mais lato. No primeiro caso, restringe-se a um corpo rochoso de condutas de dissolução onde ocorre um regime de escoamento turbulento (Atkinson e Smart, 1981 in Gunn, 2010) e, no segundo caso, alarga-se a um corpo rochoso em que a permeabilidade é dominada por uma rede de condutas de dissolução conectadas e organizadas, estrutura que evoluiu como consequência da dissolução (Huntoon, 1995 in Gunn, 2010). De acordo com Worthington e Ford (2009), que discutem esta questão, a primeira definição é demasiadamente restritiva, já que nem sempre é possível determinar se se trata efectivamente de um regime turbulento mesmo quando as velocidades de circulação subterrânea são elevadas, sendo, por isso, preferível a utilização da perspectiva mais abrangente.

Os mesmos autores referem, ainda, que mais importante do que chegar a um consenso sobre a definição de *aquífero cársico*, é o facto de existir uma aceitação generalizada das principais características destes meios, ou seja, a noção de uma formação rochosa com uma rede de drenagem interna organizada (desde a simples fissura a condutas) resultante de processos de dissolução, onde a circulação da água pode ser bastante rápida (10^{-1} m/s, em condutas, ou seja, vários quilómetros por dia – Grasso e Jeannin, 2002).

Embora a designação *sistema cársico* possa ser mais precisa dada a forte heterogeneidade espaço-temporal destes meios (em particular da sua drenagem interna), é o termo *aquífero cársico* o mais utilizado na vasta bibliografia da especialidade, tendo já adquirido um significado hidrogeológico próprio, muito para além da simples noção de aquífero. Para além disso, a noção de *sistema cársico* surge mais associada às formações rochosas e às suas características físicas (perspectiva geomorfológica) – Labat *et al.* (2000), enquanto *aquífero cársico* é preferido na análise da hidrodinâmica dessas formações rochosas. No entanto, como refere White (2007), ambas as perspectivas conceptuais têm

coexistido confortavelmente até à actualidade, uma vez que cedo se reconheceu que tratar o sistema cársico com aquífero requeria que se reconhecesse a sua especificidade, particularmente ao nível da permeabilidade – modelo da tripla permeabilidade (Worthington, 1999; White e White, 2005; Worthington e Ford, 2009).

No presente estudo, dado o enfoque na circulação hídrica no interior de um sistema cársico, a terminologia utilizada será, preferencialmente, *hidrossistema cársico*, designação que encerra, em primeiro lugar, uma perspectiva hidrodinâmica à escala regional (o sistema como unidade de referência, em analogia às bacias de drenagem de superfície). Ao considerar o sistema no seu todo, estão implícitas neste conceito a heterogeneidade, a complexidade e a especificidade, características destes meios. O termo *aquífero cársico* será também utilizado (com o mesmo significado hidrogeológico do termo supra-referido), uma adopção literal do conceito mais utilizado na literatura científica e que, como vimos, encerra, em si mesmo, as características supramencionadas. O termo *sistema cársico* será igualmente utilizado, mas com uma conotação mais geomorfológica, ou seja, relacionado com as características físicas dos maciços cársicos.

Ainda no que respeita à terminologia usada neste trabalho, de realçar outro importante termo, intrinsecamente relacionado com o anterior e que merece algumas considerações: *exurgência*. Embora se trate de um conceito extremamente utilizado e perfeitamente definido pela comunidade científica, considerámos que, nesta parte teórica, o devemos substituir, na maior parte dos casos, pelo de *urgência* ou *exutório*. A justificação para esta alteração prende-se com o facto de estes dois últimos conceitos serem muito mais abrangentes, incorporando tanto situações de exurgência como de ressurgência, situações que, muitas vezes, aparecem associadas. Ou seja, o caudal/descarga que surge à superfície (*output*) pode ser constituído tanto por água proveniente da precipitação que se infiltra no maciço cársico e que surge à superfície num único ponto de saída (exurgência) quanto por água de um rio que se perde num sumidouro e que volta à superfície (ressurgência) juntamente com água de infiltração difusa.

No entanto, esta adaptação terminológica é válida apenas para a parte teórica do trabalho, uma vez que, por um lado, estamos a conceptualizar e a apresentar características e situações genéricas da hidrologia cársica e, por outro lado, a referir estudos (estado da arte) onde ocorre com bastante frequência a situação de vários tipos de recarga a confluir para o mesmo exutório. A utilização da palavra *exurgência* seria, por isso, bastante redutora das realidades apresentadas e analisadas nesses estudos.

Porém, na segunda parte do presente trabalho (estudo de caso) o termo mais correcto a aplicar será exactamente o de *exurgência* (ou *nascente cársica*), dado não existir qualquer contributo de rio que se perde e ressurge à superfície, mas apenas água proveniente da

35

infiltração, circulação e armazenamento subterrâneos no Maciço Cársico de Sicó e que aparece à superfície, pontualmente, ao longo da sua bordadura.

1.2. Principais características de um hidrossistema cársico

O hidrossistema cársico é o único que possui um carácter evolutivo, sendo a água de circulação a responsável pelo gerar dos ocos internos e criação de características hidráulicas e hidrodinâmicas muito específicas (Bakalowicz, 1999). A carsificação (originada pela circulação da água no interior dos maciços) não é um simples processo de alargamento de fissuras, é antes um processo evolutivo que estabelece, progressivamente, uma estrutura de drenagem hipogea organizada (Marsaud, 1996). Deste modo, a estrutura e o funcionamento de um hidrossistema cársico são indissociáveis, estabelecendo-se uma complexa e 'intrincada relação circular de causa-efeito' (*positive feedback loop*) que resulta numa evolução dinâmica do hidrossistema cársico, fazendo com que possa ser considerado, pelo menos em parte, um sistema auto-regulado (Király, 2002).

A complexidade da referida relação pode clarificar-se do seguinte modo: a estrutura do maciço cársico influencia o funcionamento do hidrossistema, o qual vai, por sua vez, influenciar a estrutura (configuração do padrão de drenagem subterrânea). Ou seja, a existência de uma rede de fracturas e de pequenos vazios num maciço carbonatado vai permitir a entrada e circulação da água ao longo dessas estruturas pré-existentes, alargando-as progressivamente através da dissolução dos carbonatos; este processo de dissolução, e conseqüente alargamento de fissuras, fracturas e vazios, vai aumentando a permeabilidade do maciço; o aumento da permeabilidade vai comandar o processo de dissolução, criando um novo padrão de drenagem interna. Esta dinâmica complexa entre o efeito da circulação hídrica subterrânea na permeabilidade e o efeito da permeabilidade no padrão de drenagem subterrânea resulta no estabelecimento de uma rede estruturada e hierarquizada de condutas em permanente evolução². Essa rede de drenagem hipogea apresenta diferentes dimensões em função do tipo de rocha e das características da água em circulação.

Como referem vários autores (por exemplo Salomon, 2006; Fournier, 2006), a instalação de uma rede de drenagem subterrânea nada tem de anárquico: ela obedece a um princípio de base segundo o qual as descontinuidades mais propícias à circulação são utilizadas – as mais abertas e com maior inclinação. No conjunto, a rede de drenagem tende a organizar-se no interior do maciço cársico, desde as condutas mais pequenas e

² Assim sendo, nos hidrossistemas cársicos a condutividade hidráulica e a distribuição das cavidades que existem actualmente resultam não só da história geológica dos maciços rochosos, mas também da própria evolução da rede de drenagem subterrânea (Király, 2002).

numerosas, mais a montante, até à conduta principal que drena directamente para o exutório, estrutura, portanto, muito semelhante a uma rede de drenagem superficial. Esta hierarquização é não só espacial mas também temporal, ligada à evolução do próprio carso.

Para além de aumentar a condutividade hidráulica (e diminuir a resistência à circulação interna), o processo descrito anteriormente eleva igualmente o armazenamento de água no próprio hidrossistema cársico, à medida que as interconexões dos vazios secundários se multiplicam devido à dissolução e alargamento de fissuras e vazios pré-existentes. Assim, à medida que a capacidade de armazenamento aumenta, o nível piezométrico desce e o gradiente hidráulico diminui, pelo que, numa área cársica, o nível piezométrico pode estar a uma profundidade considerável e o seu declive ser fraco.

Os hidrossistemas cársicos possuem, assim, características físicas e hidrodinâmicas complexas e originais, o que lhes confere uma enorme **especificidade**, o que os torna muito diferentes de outros aquíferos. Em termos hidrogeológicos, o meio cársico é o único onde os regimes de circulação de água superficial e subterrâneo estão fortemente interconectados, constituindo, na maior parte dos casos, um único sistema de drenagem (White, 1993).

No entanto, a sua grande especificidade, o que os distingue de qualquer outro tipo de sistema hidrogeológico, é a existência de uma rede subterrânea de condutas, de elevada condutividade hidráulica, provocada pelo alargamento (dissolução pela água em circulação) de fissuras e fracturas pré-existentes (Marsaud, 1996; Kovács, 2003; Goldscheider e Drew, 2007; Geyer, 2008). As condutas constituem, assim, uma terceira forma de permeabilidade e porosidade, completamente distintas dos poros intergranulares (matriz da rocha) e das fissuras e fracturas, embora estejam com eles conectadas.

A permeabilidade e a porosidade terciárias são, aliás, uma das grandes especificidades do hidrossistema cársico, existindo mesmo uma oposição em termos hidráulicos e hidrodinâmicos entre as três estruturas que o constituem (Mangin, 2008; Bailly, 2009), ou seja:

- (i) blocos rochosos, microfissurados, com grande capacidade de armazenamento, mas pouco transmissivos, cujo comportamento hidráulico se assemelha ao de um meio poroso;
- (ii) rede de canais/drenos de diferentes formas e dimensões, bem organizada, com pouca capacidade de armazenamento mas com excelente condutividade hidráulica (velocidades elevadas – dezenas a centenas de metros por hora), e cuja geometria varia de montante (numerosas pequenas fissuras) para jusante (condutas acessíveis ao ser humano);
- (iii) zona saturada com enorme capacidade de armazenamento e drenos que asseguram a circulação da água (função transmissiva), por vezes em regime turbulento.

Deste modo, desde a área de recarga até ao exutório, o hidrossistema cársico surge como uma verdadeira rede hidrográfica 3D organizada e estruturada, onde a circulação ocorre predominantemente em pequenas fissuras e fracturas, confluindo para jusante, originando condutas cada vez mais largas, mas menos numerosas, à semelhança de uma

37

rede de drenagem de superfície. As características específicas dos hidrossistemas cársicos comparativamente aos aquíferos porosos e fracturados encontram-se sumarizadas no Quadro I.1.1.

Quadro I.1.1 – Características e especificidade dos hidrossistemas cársicos relativamente aos aquíferos porosos e fracturados (adaptado de Taylor e Greene, 2008)

Propriedades do aquífero	Tipo de aquífero		
	Poroso	Fracturado	Cársico
Permeabilidade	Primária	Secundária	Tripla (secundária modificada por dissolução), poros, juntas de estratificação, fracturas, condutas e grutas
Matriz	Poros e interstícios	Poros e interstícios	Poros e interstícios
Fracturas	-	Juntas, fracturas, juntas de estratificação	Juntas, fracturas e juntas de estratificação alargadas por dissolução. Abertura < 1cm
Condutas	-	-	Rede de condutas com várias dimensões (diâmetro de 1cm a dezenas de metros)
Isotropia	Mais isotrópico	Provavelmente anisotrópico	Altamente anisotrópico
Homogeneidade	Mais homogéneo	Menos homogéneo	Fortemente heterogéneo
Regime de circulação	Lento, laminar	Possivelmente rápido e possivelmente turbulento	Principalmnte rápido e turbulento
Estudo da circulação	Normalmente aplica-se a lei de Darcy (comportamento linear)	A lei de Darcy pode não se aplicar (pode haver desvios em relação ao comportamento linear)	Raramente se aplica a lei de Darcy (turbulento e não-linear) ¹
Recarga	Difusa	Principalmnte difusa, podendo existir alguns pontos de recarga	Varia de totalmente difusa a totalmente concentrada
Resposta a episódio de recarga	Lenta	Moderada	Rápida
Armazenamento	Na zona saturada	Na zona saturada	Tanto na zona saturada quanto no epícarso
Variação do nível piezométrico	Variação mínima	Variação moderada	Variação moderada a extrema
Variação hidroquímica	Variação mínima	Variação mínima a moderada	Variação moderada a extrema

¹ Quando a abertura das fracturas é superior a 1cm deixa de se aplicar a Lei de Darcy

O hidrossistema cársico é, por isso, conceptualmente representado como uma rede de condutas cársicas interligadas e bem conectadas com o exutório (com uma elevada condutividade hidráulica e elevadas velocidades de circulação) ‘imersa’ num meio de baixa condutividade hidráulica com baixas velocidades de circulação (Eisenlohr *et al.*, 1997; Kiraly, 2002; Grasso e Jeannin, 2002).

A existência 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; Gárfias-Soliz *et al.*, 2010).

Consequentemente, resultados obtidos por medições espacialmente pontuais, por ensaios de bombagem ou por traçagens tendem a ser representativos das condições hidro-lógicas das imediações desse ponto. Por isso, raramente podem ser extrapolados para representar o comportamento geral do hidrossistema (Goldscheider e Drew, 2007; Fleury *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2010), já que, no interior do mesmo, existem partes em que circulação é

do tipo difuso e outras em que é mais concentrado (Teutsch e Sauter, 1991). Vários autores (White, 1993; Larocque *et al.*, 1998; Raeisi, 2008) sublinham, inclusive, que a maior parte dos hidrossistemas cársicos possuem os dois tipos de fluxo (concentrado e difuso) alertando, assim, para o problema da utilização da dicotomia entre hidrossistemas fortemente carsificados³ (com domínio de fluxo rápido em condutas – *conduit flow aquifers*) e hidrossistemas pouco carsificados³ (com predomínio de fluxo difuso – *diffuse flow aquifers*).

A forte heterogeneidade dos hidrossistemas cársicos (particularmente os bastante carsificados) manifesta-se na **dualidade** dos principais processos hidrológicos que aí ocorrem (Smart e Hobbs, 1986; Kiraly, 2002; Kovács, 2003; Birk *et al.*, 2006) – Figura I.1.1.

(i) dualidade dos processos de infiltração (infiltração lenta/difusa nas áreas de baixa permeabilidade em contraposição à infiltração rápida/concentrada para a rede subterrânea de canais);

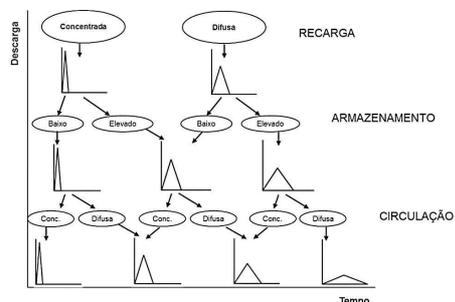


Figura I.1.1 – A dualidade dos processos de recarga, armazenamento e circulação num hidrossistema cársico e respectivo efeito no hidrograma das surgências (adaptado de Smart e Hobbs, 1986)

³ A adjectivação de um hidrossistema como "bastante/muito/extremamente carsificado" ou "pouco carsificado" prende-se com o grau/estágio de desenvolvimento das suas funções recarga/circulação/armazenamento. Ou seja, o maior ou menor desenvolvimento/maturidade das formas cársicas de superfície (recarga concentrada ou difusa) e, sobretudo, da rede subterrânea de canais/condutas que comanda o tipo de circulação (domínio de circulação rápida e concentrada ou de circulação lenta e difusa) e o armazenamento (nas condutas freáticas ou em fissuras/matriz da rocha). De acordo com Samani (2001), um "elevado grau de carsificação significa o desenvolvimento e a existência de características espeleológicas como algares, galerias interconectadas e canais de dissolução". Segundo Doerfliger *et al.* (1999) um sistema cársico bem desenvolvido possui uma rede de canais de tamanho métrico a decamétrico, que estão bem conectados e raramente se encontram obstruídos. Do ponto de vista hidrológico, Gabrovsek e Dreybrodt (2001) afirmam que um curso bem desenvolvido significa a presença de condutividades hidráulicas extremamente heterogéneas (10^{-10} a mais de 10^{-1} m/s), correspondendo as baixas condutividades (10^{-10} m/s) à matriz da rocha e a pequenas fissuras e as mais elevadas ($> 10^{-1}$ m/s) às largas condutas que drenam o sistema. Consequentemente, segundo os autores, um curso deste tipo é marcado pela ausência total de escoamento à superfície. Por outro lado, um curso pouco desenvolvido apresenta uma rede interna de drenagem composta por pequenas condutas (pouco conectadas ou obstruídas/preenchidas) ou composta por pequenas aberturas (decimétricas ou ainda menores). A propósito, ver também: Smart e Hobbs (1986), Teutsch (1993), Bonacci (1993), Bakalowicz (1999).

(ii) dualidade dos processos de circulação subterrânea (baixas velocidades nas partes de baixa permeabilidade contrastam com as altas velocidades na rede de condutas);

(iii) dualidade no armazenamento (mínimo na rede de condutas da zona não-saturada, elevado na matriz da rocha e nos sectores fissurados e máximo 'nos sistemas anexos de drenagem' na zona saturada);

(iv) dualidade das condições de descarga (modo difuso proveniente dos sectores de baixa permeabilidade do hidrossistema relativamente à descarga concentrada nas surgências proveniente da rede de condutas).

As propriedades físicas específicas e a forte heterogeneidade dos hidrossistemas cársicos são responsáveis por, do ponto de vista hidrodinâmico, serem considerados como meios fortemente **não-lineares** e **não-estacionários**. A ausência de um comportamento linear do hidrossistema é comprovada pelo facto de um determinado quantitativo de recarga poder não ter um efeito proporcional no aumento do caudal das surgências e também pelo facto de perante quantitativos semelhantes de recarga a resposta poder ser diferente. O carácter não-estacionário dos hidrossistemas cársicos prende-se com a sua permanente evolução temporal em resultado do contínuo processo de dissolução interna e de alterações no seu ambiente geográfico e geomorfológico (posição do exutório, posição do nível de base, condições climáticas, grau de fracturação, entre outros).

1.3. O modelo conceptual de circulação subterrânea e o funcionamento hidrodinâmico

Apesar dos vários modelos conceptuais que têm sido propostos e desenvolvidos nas últimas quatro décadas (e sumarizadas por alguns autores – por exemplo Perrin, 2006; Garry, 2007), a caracterização e o estudo de um hidrossistema cársico têm sido elaborados, fundamentalmente, com base em duas perspectivas de análise: a **perspectiva funcional** (*functional approach*) e a **perspectiva estrutural** (*structural approach*).

A **perspectiva funcional** foi aplicada pela primeira vez por Mangin (1975) – Figura I.1.2.A e parte do princípio que a estrutura do hidrossistema não é conhecida *a priori*, sendo a partir da observação temporal do seu funcionamento, que se deduzem as suas características internas gerais. Esta concepção muito particular baseia-se na definição do hidrossistema cársico através do seu funcionamento (Marsaud, 1996), ou seja, apenas numa fase final do estudo, o funcionamento é interpretado em termos de características estruturais do aquífero (sobretudo de modo qualitativo). Para além disso, não tem em consideração os parâmetros de distribuição espacial – heterogeneidade espacial (Kovács, 2003), já que trabalha à escala do conjunto do hidrossistema.

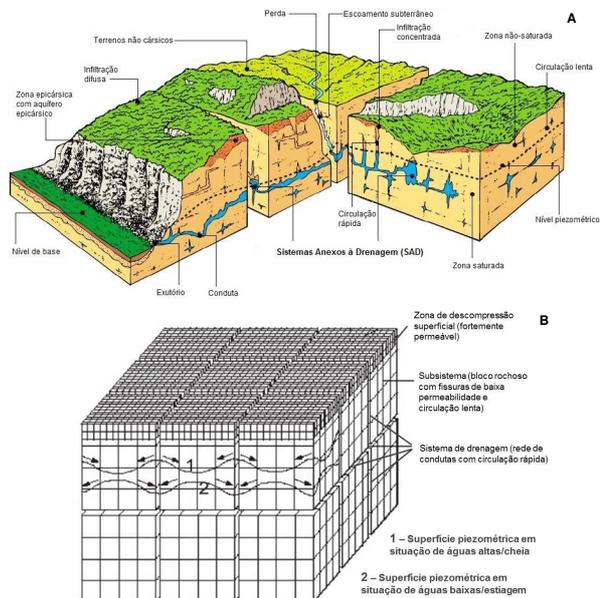


Figura 1.1.2 – Modelo conceptual de um hidrossistema cársico segundo Mangin (1975) – A e Drogue (1974) – B

A **perspectiva estrutural** foi utilizada pela primeira vez por Kiraly (1975) e baseia-se na concepção do hidrossistema cársico como o prolongamento de um aquífero fracturado, diferenciando-se deste unicamente pela existência de estruturas de grande dimensão (condutas) que percorrem internamente o aquífero e o drenam. Este autor considerava que a forma mais eficiente de estudo destes meios era uma descrição detalhada das características geológicas, principalmente do padrão de fracturação (Bakalowicz, 2005).

O modelo esquemático para esta abordagem foi fornecido por Drogue (1974) – Figura 1.1.2.B e assemelha o hidrossistema cársico a um aquífero fracturado, constituído por blocos fissurados e fracturados separados por condutas que asseguram a drenagem do conjunto.

41

Cada um desses blocos encontra-se dissecado por uma rede de fracturas de tamanho decamétrico de baixa permeabilidade, onde a circulação é lenta. A rede de drenagem hipogea consiste em condutas de elevada permeabilidade (que separam blocos de dimensões hectométricas) onde o escoamento se processa de forma rápida.

Drogue (1974) defendia tratar-se de um meio contínuo devido à regularidade da distribuição da rede de fracturas, facto comprovado pela existência incontestável de um nível piezométrico (Marsaud, 1996). O funcionamento do hidrossistema cársico é, assim, explicado pela diferença de permeabilidade existente entre os dois tipos de estruturas (blocos fracturados e condutas). Na época de águas altas, a rede de condutas alimenta os blocos capacitivos (fracturados), pelo que o nível piezométrico é mais elevado nas condutas do que nos referidos blocos (Figura 1.1.2.B – situação 1). No período de águas baixas, a água armazenada nos blocos alimenta o escoamento da rede de condutas, dando-se a inversão do sentido de escoamento (Figura 1.1.2.B – situação 2). No caso de situações hidrológicas extremas (cheia ou estiagem), o gradiente hidráulico pode atingir valores elevados.

A principal diferença entre o modelo de Mangin e o modelo de Drogue (posteriormente desenvolvido e modificado por Kiraly) reside na função de armazenamento/reservatório do hidrossistema cársico (zona saturada), aspecto que desenvolveremos um pouco mais à frente. Porém, como sublinha Fournier (2006), conciliando ambas as perspectivas, nos hidrossistemas cársicos a estrutura e o funcionamento são indissociáveis. Contrariamente a outros aquíferos, a circulação da água, como já referido, aumenta em permanência a permeabilidade do hidrossistema cársico e, como consequência, modifica gradualmente o seu sistema interno de drenagem. A capacidade dos hidrossistemas cársicos em armazenar água aumenta à medida que as interconexões dos vazios secundários da rocha se multiplicam devido a dissolução e ao alargamento das fissuras e condutas. Simultaneamente, a resistência à circulação no interior do hidrossistema diminui.

Deste modo, e independentemente da perspectiva conceptual, os hidrossistemas cársicos podem ser divididos em duas partes (subsistemas) principais, estruturadas verticalmente e de características hidrodinâmicas (condutividade e armazenamento) muito específicas. Assim, e descendo em profundidade pode-se distinguir a **Zona não-saturada**, onde se inclui o **epicarso** (zona subsuperficial) e a **zona vadosa** (entendida aqui como a parte profunda da zona não-saturada, imediatamente abaixo do epicarso) e a **Zona saturada** (onde ocorre o armazenamento). No caso dos hidrossistemas das regiões de clima mediterrânico, deve ainda considerar-se um terceiro subsistema – a **Zona epissaturada** (ou epifreática), que em hidrossistemas cársicos espessos pode ser considerável, dada a elevada oscilação sazonal do nível piezométrico em função do carácter marcadamente sazonal da recarga.

Zona não-saturada

a) Epicarso

Conceito introduzido por Mangin (1975), o epicarso (também conhecido como 'zona subcutânea'), corresponde à parte superior do endocarso, sendo uma zona muito fracturada e meteorizada, localizada imediatamente abaixo da superfície ou do solo (quando existente) ou exposta à superfície (Williams, 2008). A sua espessura característica ronda os 10 m, valor que pode variar consideravelmente consoante as condições climáticas, as características dos afloramentos rochosos e respectiva evolução geomorfológica, podendo, por isso, estender-se de alguns metros a dezenas de metros (White, 1999; Klimchouk, 2004; Williams 2008).

Segundo Doerfliger *et al.* (1999), o epicarso pode ser extremamente desenvolvido, moderadamente desenvolvido ou insignificante (ou mesmo ausente). No primeiro caso, pode constatar-se a existência de poços, algares, dolinas, *karrenfields* e elevada fracturação (visível em taludes de estradas ou em pedreiras). O tipo intermédio surge apenas em áreas de alinhamento de dolinas, vales secos (Figura I.1.3. A) e apresenta uma fracturação não muito desenvolvida. Por último, quando o epicarso é praticamente inexistente, não se observa a presença de qualquer forma cárstica e a densidade de fracturação é muito baixa.

Por se encontrar extremamente carsificada, esta epizona possui uma elevada porosidade e permeabilidade secundárias⁴, que decrescem exponencialmente em profundidade, conduzindo à acumulação de água na sua base (Figura I.1.3. B e C). As diferenças de porosidade e permeabilidade entre o epicarso e a rocha subjacente têm, assim, um papel decisivo no funcionamento hidrológico de toda a zona não-saturada e do próprio hidrossistema, no seu conjunto.

Segundo Williams (2008) e Kogovsek (2010) o entendimento actual de epicarso surge da convergência de estudos sobre as suas características biológicas, a sua função hidrológica e a sua importância geomorfológica. No primeiro caso, em vários estudos citados pelos autores foi identificada fauna característica que indica, inequivocamente, a existência de uma zona saturada entre as galerias subterrâneas e a superfície que permite a sua sobrevivência.

Mangin (1975) introduziu a noção de 'epicarso' e Bakalowicz (1979) identificou a sua função retardadora no processo de circulação da água desde a superfície até à zona vadosa. Por seu lado, Williams (1983, 1985 citado por Williams, 2008) reconheceu a importância dos processos subcutâneos na evolução das formas superficiais, tendo, posteriormente, acrescentado interpretações hidrológicas (Figura I.1.3. A e B).

⁴ Porosidade secundária de 10 a 30% (Williams, 2008).

43

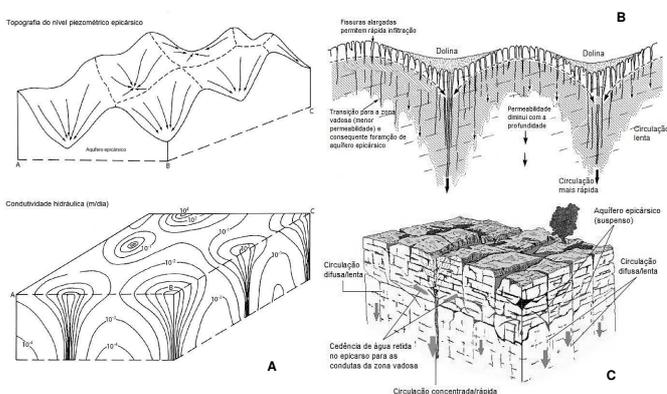


Figura I.1.3 – Características e funcionamento hidrológico do epicarso (A e B – adaptado de Williams, 2008; C – adaptado de Mangin, 1975)

Numa concepção abrangente, *epicarso* pode definir-se como a parte superior e mais meteorizada de um maciço carbonatado, que apresenta porosidade e permeabilidade mais desenvolvidas e mais homogêneas do que a massa rochosa subjacente. Em termos hidrogeológicos, define-se como um subsistema com funções de armazenamento e de divisão da recarga autogénica em vários componentes, temporalmente distribuídos, em direcção à zona vadosa (Klimchouk, 2004).

Num simpósio dedicado inteiramente ao epicarso (Jones *et al.*, 2004), este conceito foi amplamente debatido e aperfeiçoado tendo sido definido como "uma interface heterogênea entre os materiais não consolidados da superfície (incluindo solo, rególito, sedimentos e restos de vegetação) e a rocha carbonatada subjacente, alterada por dissolução. É uma zona que se encontra parcialmente saturada e é capaz de armazenar água ou atrasar o processo de infiltração e, localmente, reencaminhar essa água infiltrada em direcção às condutas da zona vadosa"⁵.

⁵ A evolução do conceito de 'epicarso' é discutida em Bakalowicz (2004) e Williams (2004). A revisão sobre os conhecimentos actuais das funções hidrológica e geomorfológica é apresentada por Ford e Williams (2007). Recentes e importantes contributos para um melhor conhecimento do epicarso podem encontrar-se nos trabalhos de Perrin (2003), Treck (2003), Klimchouk (2004), Palmer (2004), William (2008) e Kogovsek (2010).

Correspondendo à parte superior da zona não-saturada, é, em termos funcionais, de uma enorme importância na recarga do aquífero, sendo-lhe apontadas duas importantes funções, aparentemente antagónicas: (i) condução rápida da água infiltrada em direcção às condutas verticais da zona vadosa; (ii) armazenamento temporário de água na sua base, devido à sua elevada permeabilidade quando comparada com o maciço rochoso subjacente. Sauter (1992) refere, inclusive, que o epicarso pode ser entendido como um sistema com duplo comportamento: o sistema rápido é activado durante a fase inicial do evento de recarga enquanto o sistema lento funciona como um factor retardador da recarga do hidrossistema e só posteriormente vai cedendo a água armazenada.

Na sua função de encaminhamento da água para a zona vadosa, o epicarso processa a divisão dessa recarga em escoamento rápido (*quick flow*) e escoamento lento (*slow flow*), ou, de modo mais detalhado, em escoamento em condutas verticais (*shaft flow*), escoamento vadoso concentrado (*vadose flow*) e escoamento vadoso difuso (*vadose seepage*) – Figura I.1.4.

De acordo com Kiraly (2002) mais de 50% da infiltração difusa no epicarso chega à zona vadosa de forma concentrada, directamente para as condutas verticais. A justificação está na progressiva diminuição da permeabilidade em profundidade (até à base do epicarso) o que causa uma considerável componente lateral no fluxo no interior do epicarso, convergindo, assim, para as principais fracturas e condutas verticais que penetram até maiores profundidades. Valores semelhantes foram obtidos por Jeannin e Grasso (1995) em vários contextos hidrometeorológicos.

Os trabalhos espeleológicos de Klimchouk na Ásia Central (citados em Klimchouk, 2004), comprovaram estas características da zona epicársica, ao revelarem a existência de inúmeras condutas verticais na base do epicarso e ao mostraram a presença de um substancial escoamento ao longo destas condutas verticais, que se estendem pela zona vadosa, após longos períodos sem precipitação. Esta última constatação evidencia a retenção temporária da água infiltrada e a considerável mistura que aí ocorre.

O epicarso é, igualmente, reconhecido como um importante subsistema de armazenamento temporário de água, pelo que alguns autores afirmam, inequivocamente, a existência de um aquífero epicársico, onde a água pode permanecer de alguns dias a vários meses (por exemplo Mangin, 1975; Perrin *et al.*, 2003; Klimchouk, 2004; Trcek, 2007; Williams, 2008; Kogovsek, 2010). Mohrlock e Sauter (1999), por exemplo, através da análise da

45

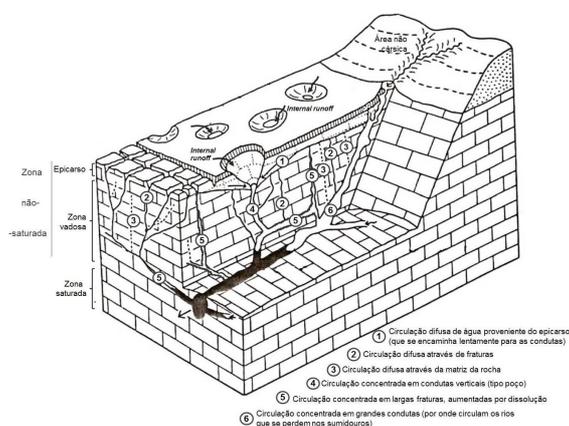


Figura I.1.4 – Esquema dos principais tipos de circulação através da zona não-saturada (adaptado de Gunn, 1986)

temperatura da água em galerias subterrâneas, concluíram que o tempo de residência da água no epicarso é suficientemente longa para se adaptar à temperatura deste meio.

Alguns estudos sugerem, inclusive, que esse armazenamento pode ser superior ao da zona saturada (Perrin *et al.*, 2003), dependendo, contudo, de factores internos como a espessura e o carácter contínuo do epicarso; a sua porosidade; a condutividade hidráulica no seu interior e a sua conexão com a rede de drenagem vadosa.

Deste modo, é de aceitação geral que parte da água escoada pelas surgências, em diferentes contextos hidrometeorológicos, é proveniente do armazenamento no epicarso. Por exemplo, Trcek (2007) demonstrou que, durante eventos pluviosos, o escoamento proveniente do epicarso (*epiflow*)⁶ pode significar até 50% do caudal das nascentes cársicas. Estes resultados revelam, por isso, o importante papel do epicarso no processo de recarga do hidrossistema.

⁶ *Epiflow* pode definir-se como um escoamento relativamente rápido que resulta da mistura de água recém-infiltrada (e temporariamente concentrada na base do epicarso) com água pré-evento pluvioso (armazenada no epicarso). Esta água, de características hidroquímicas muito específicas devido ao tempo de retenção no epicarso, dirige-se para a rede de condutas da zona vadosa, onde se pode misturar, ainda, com água recém-infiltrada proveniente de infiltração em algares, por exemplo.

Por seu lado, Petric (2002), através de diferentes metodologias e vários modelos comprovou e confirmou a dupla função hidrogeológica do epicarso: permite a entrada e o encaminhamento da água da precipitação para a rede de drenagem da zona vadosa, com o conseqüente aumento rápido da descarga das surgências. Por outro lado, possibilita o armazenamento temporário de água durante a estação húmida (em sectores menos permeáveis) água que, posteriormente, vai ser cedida sob a forma de escoamento lento. Esta recarga lenta, que se dirige para a zona saturada, vai assegurar que o esvaziamento do hidrossistema seja progressivo, ao longo da estação seca.

b) Zona vadosa

Esta zona, não-saturada, permite a transferência vertical da água infiltrada para a zona saturada. A circulação da água através desta zona é altamente anisotrópica e, na maior parte das vezes, muito rápida. A drenagem através da zona vadosa inclui (White, 1999; Ford e Williams, 2007): (i) descarga de aquíferos epicársicos (infiltração retardada); (ii) circulação vertical através de fissuras e fracturas na base do epicarso; (iii) percolação lenta através da matriz da rocha; (iv) circulação através de condutas verticais (tipo poço), que transportam o escoamento gerado na superfície cársica (*internal runoff*); (v) movimento turbulento em largas fracturas, aumentadas por dissolução; (vi) grandes condutas que transportam a água dos rios provenientes de áreas não-cársicas – Figura I.1.4.

A circulação nesta zona é, portanto, muito heterogénea, ocorrendo ao longo de um sistema interconectado e organizado de pequenas fissuras, de fracturas alargadas por dissolução e de condutas, pelo que o tempo de circulação neste sistema pode ser bastante curto, de apenas algumas horas por quilómetro. No entanto, esta transferência pode ocorrer de modo difuso e muito lento, facto concluído através de vários estudos hidroquímicos referidos por Garry (2007) e pelos trabalhos de Kogovsek na Eslovénia (citados em Kogovsek, 2010), que verificaram que as infiltrações lentas se encaminham, em parte, para os canais onde ocorre circulação rápida e que pode ocorrer escoamento difuso mesmo após alguns meses sem precipitação (constatado pelo gotejar do tecto das cavidades subterrâneas, na zona vadosa).

Esta zona pode ser mais ou menos desenvolvida (espessa) consoante a evolução do próprio carso, sendo frequente a existência de testemunho de antigos padrões de drenagem (resultado, por exemplo, da alteração do nível de base) que, embora inactivos actualmente, detêm um papel importante na drenagem do maciço principalmente em águas altas (situações de *trop plein*). Num hidrossistema fortemente carsificado, os sistemas de condutas (verticais e horizontais) estendem-se por grandes distâncias e podem, inclusive, apresentar padrões variados, o que aumenta, ainda mais, o carácter heterogéneo e

47

fortemente anisotrópico do hidrossistema, em geral, e desta zona, em particular. Este sistema complexo de condutas está intimamente relacionado com o gradiente hidráulico, sendo que um elevado gradiente tende a originar um sistema de condutas mais linear (de desenvolvimento essencialmente vertical devido à maior espessura da zona vadosa) enquanto um baixo gradiente favorece o desenvolvimento de um sistema muito mais complexo (condutas de carácter essencialmente horizontal).

Zona saturada

A zona saturada pode ser mais ou menos desenvolvida consoante o tipo de aquífero considerado, mas constitui em todos eles a parte mais activa na drenagem do maciço cársico. Esta zona tem uma dupla função, com autonomia e características próprias: por um lado drenar, através de uma rede de condutas de elevada condutividade hidráulica, a água armazenada no seu interior e a proveniente da circulação na zona vadosa. Por outro lado, armazenar água, sendo esta a função mais desconhecida e a que maior discussão suscita.

A função de armazenamento/reservatório de água no hidrossistema constitui, pois, o tema de maior discussão e divergência conceptual na comunidade científica que investiga a hidrodinâmica cársica. Tal como referimos anteriormente, esta é a principal diferença entre o modelo de Mangin e o modelo de Drogue (posteriormente desenvolvido e modificado por Kiraly) – Figura I.1.2.

Assim, e de acordo com o modelo conceptual de Mangin (1975) – Figura I.1.2.A., a zona saturada compreende um sistema de drenagem constituído por galerias (ou áreas muito transmissivas mas com pouca capacidade de armazenamento) e, de ambos os lados do eixo de drenagem⁷ (Dreno da Figura I.1.6), por cavidades de várias dimensões, anastomosadas, organizadas numa sucessão de conjuntos bem delimitados e independentes uns dos outros, mas todos em comunicação com as condutas de drenagem – são os sistemas anexos à drenagem (*systemes annexes au drainage – SAD*) – Marsaud (1996), Bailly (2009). Estes espaços ociosos são o lugar de armazenamento das reservas do aquífero. De acordo com este modelo, o enorme contraste (diferença de várias ordens de grandeza) entre a permeabilidade da matriz rochosa e a das condutas⁸ é responsável pela ausência de trocas entre elas, tornando o armazenamento na matriz rochosa negligenciável (dado

⁷ O eixo de drenagem é definido por Marsaud (1996) como sendo a ossatura à volta do qual se organiza a zona freática. É composto por um conjunto de condutas e pode desenvolver-se na parte superior da zona saturada (carso tipo jura) ou em profundidade sob o nível do exutório (carso vauculiano). O escoamento, normalmente turbulento, é muito rápido (vários metros por segundo aquando das cheias). Na estagiar, assegura a drenagem dos sistemas anexos à drenagem, assegurando o carácter perene de algumas surgências.

⁸ Condutividade hidráulica da matriz em calcários compactos: $K = 10^{-9} - 10^{-11}$ m/s (White, 2007) e em calcários fracturados: $K = 10^{-7} - 10^{-1}$ m/s; condutividade hidráulica nas condutas: $K = 10^{-1}$ m/s (Grasso e Jeannin, 2002).

ocorrer nos SAD), pelo que a zona saturada seria hidraulicamente descontínua (Mangin, 1994; Bakalowicz, 2005).

De modo quase oposto, o modelo conceptual de Drogue (1974), desenvolvido por Kiraly (1975, 2002)⁹ e por Kiraly *et al.* (1995), assume que o armazenamento subterrâneo de água ocorre na matriz da rocha, ou seja, porosidades primária e secundária. Este modelo pressupõe que a zona saturada é um meio hidraulicamente contínuo, podendo considerar-se como uma matriz porosa saturada drenada por condutas. Assim, na época de águas baixas, o nível freático nos blocos fissurados é mais alto do que nas condutas, o que faz com que a água se encaminhe para as condutas, que drenam, deste modo, até ao exutório a água armazenada na matriz da rocha. Na época de águas altas, ou imediatamente a seguir a um episódio de elevada pluviosidade, o gradiente hidráulico inverte-se, sendo o nível piezométrico mais elevado nas condutas que, assim, fornecem água à matriz rochosa envolvente, que a armazena (Figura I.1.2. B). Esta realidade foi testada e comprovada por Kiraly (2002) através de modelos 3D.

A conceptualização do hidrossistema cársico como uma unidade onde interagem uma rede de canais hierarquicamente organizada com elevada condutividade hidráulica e uma matriz rochosa fissurada de baixa permeabilidade e elevada porosidade é-nos fornecida por Doerfliger e Zwahlen (1995) – Figura I.1.5.

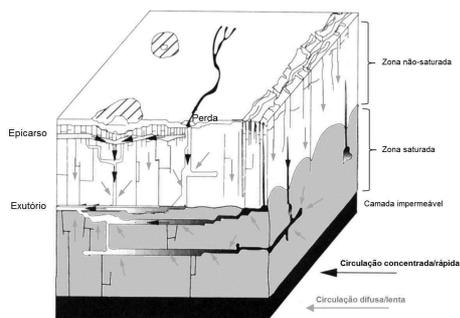


Figura I.1.5 – Modelo conceptual de um hidrossistema cársico onde se encontram integradas as perspectivas de Mangin, Drogue e Kiraly (adaptado de Doerfliger e Zwahlen, 1995)

⁹ O modelo conceptual de Kiraly (1975, 2002) baseia-se não só na perspectiva estrutural de Drogue, mas também no modelo funcional de Mangin (1975). Esta questão encontra-se explicada de forma mais aprofundada em Kovács (2003).

A organização e estruturação internas do hidrossistema cársico que vimos apresentando têm importantes consequências na sua hidrodinâmica, a qual, decorrente das várias perspectivas conceptuais, pode ser sintetizada da seguinte forma (Figura I.1.6):

- (i) zona não-saturada que, dada a especificidade dos hidrossistemas cársicos, se pode dividir em:
 - epicarso, onde a circulação de água tem uma forte componente horizontal, devido à diferença de permeabilidade em relação à zona vadosa (muito menos permeável, no conjunto, exceptuando as condutas), ocorrendo armazenamento temporário na sua base (aquífero epicársico);
 - zona vadosa, onde predomina a circulação de carácter vertical;
- (ii) – na zona saturada a circulação da água tem uma forte componente horizontal, com uma grande importância das condutas, onde o escoamento pode ser turbulento;
- (iii) – alteração do sentido do fluxo ou alteração do gradiente hidráulico (entre as condutas e os blocos adjacentes) entre as águas baixas/estiagem e as águas altas/cheias.

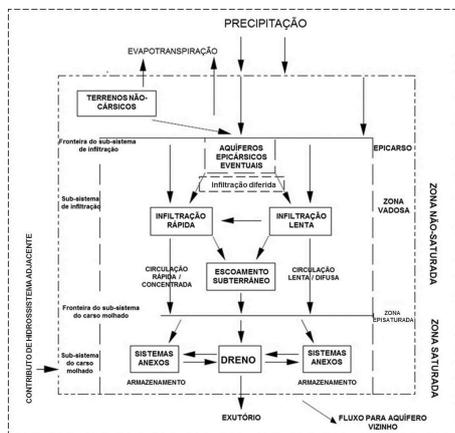


Figura I.1.6 – Esquematisação do funcionamento de um hidrossistema cársico (adaptado de Marsaud, 1996)

1.4. As diferentes classificações

A classificação dos hidrossistemas cársicos, entendidos como sistemas altamente heterogêneos, tem em consideração importantes características destes meios como sejam o tipo de recarga, os sistemas de drenagem subterrânea, o modo de circulação, o tipo de condutas, o armazenamento (capacidade local de armazenamento) e a resposta do caudal das surgências a um episódio de recarga.

De facto, os hidrossistemas cársicos têm sido estudados e classificados em grupos com base em diversos métodos, entre os quais se destacam a análise de série temporais, a análise hidroquímica, a análise da linearidade do sistema ou ainda a análise da curva da recessão, tendo todos eles por base o caudal das surgências (Rashed, 2012).

Uma das primeiras classificações foi proposta por Mangin (1975) a partir do estudo do caudal de várias nascentes cársicas em França e baseava-se no grau de estruturação interna do hidrossistema (a qual estava ligada ao grau de carsificação), pelo que os hidrossistemas cársicos se podiam enquadrar entre os pobremente drenados (sistemas pouco carsificados¹⁰) e, no outro extremo, os muito bem drenados (sistemas bastante carsificados¹⁰). Figura I.1.7.A. As características de cada hidrossistema cársico eram inferidas a partir do estudo das séries de caudais (análise espectral e correlacional) de alguns hidrossistemas cársicos, bem conhecidos e tidos como referência e que deram nome aos quatro tipos.

Assim, num dos extremos da classificação encontra-se o **tipo Aliou** – sistema não-linear, extremamente bem drenado, de resposta muito rápida a episódios de recarga com hidrograma muito pontiagudo, fraca memória do sistema¹¹; pelo que seria característico de sistemas muito carsificados com uma rede de drenagem subterrânea funcional. Na outra extremidade está o **tipo Torcal** – sistema inerte, pobremente drenado, elevada memória do sistema, resposta demorada a episódios de recarga com hidrograma unitário achatado e alongado, correspondendo a sistemas pouco carsificados (muito mais próximos de aquíferos fissurados). Entre estes extremos, encontram-se as situações intermédias – os tipos **Badget** e **Fontestorbes**.

Esta classificação continua a ser muito aplicada ainda hoje, particularmente por quem utiliza a análise de séries temporais como método de estudo dos hidrossistemas cársicos, pese embora pequenos ajustamentos pontuais propostos por alguns autores (Kovacic, 2010; El-Hakim e Bakalowicz, 2007). O próprio Mangin (1994) sublinha, referindo-se ao tipo

¹⁰ Ver nota de rodapé 3 acerca do significado de hidrossistema 'muito carsificado' e 'pouco carsificado'.

¹¹ Estas características dos aquíferos, decorrentes da análise de séries temporais, serão desenvolvidas de forma aprofundada na Parte II deste estudo (estudo de caso), sendo aí individualmente explicadas e contextualizadas.

Torcal, que pode igualmente corresponder a hidrossistemas com considerável carsificação, mas com uma rede de drenagem pouco funcional.

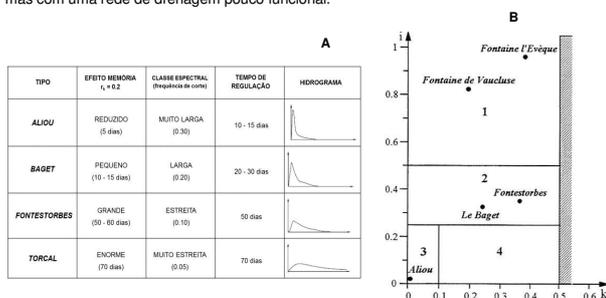


Figura I.1.7 – Classificação dos hidrossistemas cársicos com base na análise de série temporais (A) e com base na análise da curva de recessão (B) – Mangin (1975)

Para além desta classificação, Mangin (1975, 1994) propôs uma outra, bastante próxima (a ser utilizada quando não fosse possível a aplicação da análise correlacional e espectral) baseada no estudo da curva de recessão, que permitiria a obtenção de informação relativa à forma como as diferentes zonas do aquífero se configuram, bem como a determinação quantitativa da espessura de algumas dessas zonas. Este método permitia, por isso, algum conhecimento quanto ao grau de organização interna do hidrossistema.

O autor considerou, portanto, cinco classes, baseado em dois índices: a extensão da zona saturada (índice k) e as condições de infiltração (índice i)¹². O primeiro índice evidencia o poder regulador da zona saturada no caudal das surgências, já que quanto mais extensa for a zona saturada, maior será o seu poder regulador sobre a descarga. Mangin (1975, 1994) considerou que os hidrossistemas cársicos tinham de apresentar valores de k inferiores a 0.5, enquanto que nos aquíferos porosos e fracturados k deveria estar na classe 0,5-1, sendo 1 o limite máximo. Este limite foi, porém, alterado posteriormente devido a estudos que revelaram hidrossistemas cársicos com valores de k superiores a 1. É o caso dos trabalhos de El-Hakim e Bakalowicz (2007) no Líbano e Liu *et al.* (2010), na China, em

¹² As bases matemáticas encontram-se explicadas mais adiante neste trabalho (Parte II – estudo de caso) com base no exposto em Mangin (1975, 1994); Padilla *et al.* (1994); El-Hakim e Bakalowicz (2007); Ford e Williams (2007).

hidrossistemas cársicos de grandes dimensões que possuem uma zona saturada extrema e anormalmente desenvolvida, com tempos de residência da água superiores a 1 ano ($k > 1$).

O índice i é chamado de 'infiltração retardada' (representa a diferença temporal entre a infiltração e a descarga) e a sua aplicação inicia-se apenas dois dias a seguir ao pico de cheia ($t = 2$ dias). Apresenta valores entre 0 e 1, pelo que facilmente permite a distinção entre hidrossistemas caracterizados principalmente por infiltração rápida (i aproxima-se de 0) ou por infiltração lenta (i aproxima-se de 1). Assim:

- (i) $k < 0.5$ e $i > 0.5$ (sistemas cársicos complexos, extensos e constituídos por vários subsistemas);
- (ii) $k < 0.5$ e $0.25 < i < 0.5$ (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) $k < 0.1$ e $0 < i < 0.25$ (sistemas intensamente carsificados na zona não-saturada e na zona saturada, com uma rede de condutas bem desenvolvida, directamente 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)

Tendo por base a relação intrínseca entre grau/evolução da carsificação e funcionamento hidrogeológico, Marsaud (1996) propõe uma outra classificação, onde a palavra-chave é a *funcionalidade* do hidrossistema, numa tentativa de conjugação das perspectivas funcional e estrutural. O autor agrupa os diferentes hidrossistemas segundo a sua estrutura seja, ou não, cársica e a sua rede de drenagem subterrânea seja, ou não, funcional. Assim, e de um modo simplificado:

Tipo 1 – Sistemas não-funcionais e com estrutura pouco cársica. São hidrossistemas cársicos não-funcionais, uma vez que a carsificação ainda não é suficientemente evoluída/desenvolvida para que a estrutura de drenagem tenha um efeito notável na hidrodinâmica. Pode, por isso, ser assemelhado a um meio fissurado. Nestes sistemas nem os ocos nem a drenagem interna se encontram organizados, pelo que raramente existe um exutório individualizado.

Tipo 2 – Sistemas funcionais e com estrutura cársica. São hidrossistemas que possuem uma estrutura de drenagem hipogea evoluída e organizada, pelo que apresentam um comportamento hidrológico tipicamente cársico (grandes velocidades de escoamento interno). Trata-se, portanto, de hidrossistemas onde os ocos e a drenagem interna se

53

encontram organizados e conectados, traduzindo-se numa drenagem mais ou menos fácil das reservas subterrâneas.

Tipo 3 – Sistemas não-funcionais e com estrutura cársica. São hidrossistemas com uma estrutura cársica que já não se encontra activa devido a uma modificação das condições externas (alteração do nível de base, actuação da tectónica), que determinam baixas velocidades de escoamento. Deste modo, o escoamento já não é controlado pela estrutura interna do hidrossistema mas por condições externas, pelo que, mesmo havendo organização interna da drenagem, o escoamento não reflecte esta organização. Ou seja, trata-se de um hidrossistema cársico que já não é funcional, assemelhando-se a um meio poroso homogéneo e contínuo.

2. Métodos de análise¹³ e caracterização da relação *input-output*

As características hidrogeológicas peculiares e o funcionamento hidrológico extremamente específico dos hidrossistemas cársicos fazem com que o seu estudo seja bastante mais complexo e de maior incerteza do que o de qualquer outro tipo de aquífero. Como tal, a análise hidrológica no carso não pode ser efectuada adequadamente usando métodos hidrológicos clássicos aplicados noutros meios (Goldscheider e Drew, 2007; Andreo *et al.*, 2008; Taylor e Greene, 2001, 2008). Segundo estes autores, os métodos tradicionais de caracterização de um aquífero baseados na perspectiva Darciana (Lei de Darcy) fornecem informação inadequada (ou mesmo errada) quando aplicados às características de um hidrossistema cársico.

O estudo da estrutura e das propriedades físicas dos hidrossistemas cársicos coloca problemas práticos de investigação devido à sua natureza anisotrópica e muito heterogénea e à escassez da informação sobre as suas características físicas. Pelo facto de a observação directa e monitorização do endocarso se restringir a grutas e algares (e as restantes propriedades físicas terem de ser inferidas), as surgências são o único lugar onde é possível obter informação sobre todo o sistema e, conseqüentemente, sobre a organização da circulação e do armazenamento hipogeos.

Deste modo, de entre as técnicas de investigação mais utilizadas para caracterizar os hidrossistemas cársicos encontram-se as que se baseiam no caudal das surgências, uma vez que permitem, desde logo, determinar se o *output* é influenciado sobretudo por um regime de circulação rápida, por um regime de circulação lenta ou, então, por ambos. Cons-

¹³ O vasto conjunto de métodos de caracterização e de estudo dos hidrossistemas cársicos e da sua hidrodinâmica e, conseqüentemente, o elevado número de artigos científicos existentes levaram a que optássemos, neste ponto do trabalho, por: (i) abordar apenas os métodos mais utilizados, os de maior consenso científico e os mais presentes na literatura; (ii) aprofundar apenas os métodos que serão utilizados neste estudo.

cientes desta questão, apresentaremos e discutiremos, em seguida, alguns dos métodos mais utilizados e mais úteis na obtenção de informação sobre a hidrodinâmica e a estrutura interna dos hidrossistemas cársicos a partir dos valores de caudal medidos nas surgências. O destaque será dado, em particular, aos métodos que usaremos neste trabalho.

No estudo da circulação nos hidrossistemas cársicos, os métodos numéricos estão entre os mais utilizados, constituindo uma das principais ferramentas na obtenção de informação (em alguns casos quantitativa) para melhor se compreender o funcionamento de componentes individuais da hidrogeologia cársica e se prever o funcionamento global do hidrossistema (Taylor e Greene, 2001).

Assim sendo, e de acordo com a literatura da especialidade, existem duas perspectivas metodológicas para o estudo e a caracterização dos hidrossistemas cársicos: os **métodos globais** e os **modelos distributivos**.

2.1. Os métodos globais

Os métodos globais consistem na análise matemática das séries de caudal das surgências, cujo comportamento (variações no caudal, na temperatura da água, na condutividade eléctrica e na composição química ou isotópica) representa a resposta global do hidrossistema cársico a eventos de recarga e reflecte a sua configuração interna (Kovács, 2003). Pelo facto dos dados 3D sobre a estrutura interna destes hidrossistemas serem muito limitados ou praticamente inexistentes, a metodologia mais simples e mais utilizada é a inferência de características físicas e de processos hidrodinâmicos (infiltração, circulação subterrânea, parâmetros hidráulicos e grau de carsificação do sistema) a partir das variações temporais do *output* (Király, 2002; Grasso e Jeannin, 2002).

Uma das principais vantagens deste método prende-se com o facto da aquisição de dados ser relativamente simples, pelo que têm sido utilizados desde o início do século passado (por exemplo Boussinesq, 1904; Mailliet, 1905). Outra vantagem reside no facto deste método, ao considerar a resposta do exutório, inclui o conjunto da bacia hidrogeológica que para aí drena, ao contrário dos testes em poços que apenas consideram uma pequena parte do hidrossistema e as traçagens que, normalmente, se referem à circulação em condutas (Geyer, 2008).

Uma das principais críticas a este método reside no facto de que, tratando-se de uma resposta global do hidrossistema, se negligencia a heterogeneidade interna destes meios e a sua interpretação é apenas qualitativa, não fornecendo, por isso, informação directa sobre as suas características hidráulicas. No entanto, em situações de inacessibilidade às bacias cársicas (caso de algumas bacias alpinas – Rehrk e Birk, 2010) ou de quase inexistência de informação espeleológica sobre determinados sistemas cársicos, a aplicação de métodos

55

globais constitui uma excelente (e praticamente única) forma de caracterização hidrogeológica de um hidrossistema cársico.

Os métodos globais podem dividir-se em dois sub-tipos (Jeannin e Sauter, 1998; Goldscheider e Drew, 2007): **análise de séries temporais** (*time series analysis*) e **modelos de eventos singulares** (*análise da curva de recessão*). Contudo, antes de explicarmos em que consiste cada um deles, introduziremos um dos modelos utilizados nos métodos globais: o modelo de caixa negra (*black-box methods*).

2.1.1. A particularidade dos modelos de 'caixa negra'

Os modelos de 'caixa-negra' são modelos de análise linear de sistemas e são, normalmente, utilizados na ausência total de informação acerca das características físicas internas do sistema cársico¹⁴. No estudo da relação *input-output*, estes modelos centram-se na análise das séries temporais de caudal (análise do hidrograma) enquanto resposta do hidrossistema a eventos de recarga (difusa ou concentrada). Assim, a partir dos resultados obtidos, é possível, por um lado, simular ou prever a função de descarga (*output*) do aquífero a partir dos valores conhecidos para a recarga (Taylor e Greene, 2008). Por outro lado, permitem também a obtenção de informação, ainda que de carácter predominantemente semi-quantitativo sobre a sua hidrodinâmica e qualitativo sobre a estrutura interna e respectiva organização do hidrossistema cársico (Ford e Williams, 2007).

Estes modelos são utilizados nos métodos globais de estudo dos hidrossistemas cársicos, não requerendo informação relativa à estrutura do aquífero ou a parâmetros hidrodinâmicos e sendo o seu principal objectivo a caracterização da relação global entre a recarga (*input*) e a descarga (*output*) e, a partir daí, inferir qualitativamente características do hidrossistema cársico. Deste modo, o hidrossistema cársico é considerado, no seu conjunto, como um filtro temporal e sequencial, que transforma o sinal de *input* (água de recarga) num sinal de *output* (caudal das surgências), num processo designado por função de transferência (*transfer function*)¹⁵. Como sublinha Larocque *et al.* (1998), o hidrossistema cársico é considerado como um filtro que transforma, retém ou elimina o sinal de *input* num sinal de *output*, sendo o grau de transformação do sinal de *input* que fornece informação preciosa sobre a natureza da circulação no hidrossistema.

¹⁴ Se as propriedades físicas do sistema cársico forem minimamente conhecidas, permitem a aplicação de modelos de 'caixa-cinzenta' (*grey-box models*).

¹⁵ *Transfer function* – é uma representação matemática no domínio das frequências espaciais e temporais da relação entre o *input* e o *output* de um sistema linear e temporalmente não variável e em condições iniciais de equilíbrio zero.

No entanto, como referem Jeannin e Sauter (1998) a partir de trabalhos anteriormente realizados (Grasso e Jeannin, 1994; Eisenlohr *et al.*, 1997), mesmo sendo um bom método, é necessário alguma prudência na utilização dos resultados obtidos por estes métodos para inferir a estrutura dos sistemas cársicos e a sua classificação (tal como efectuado inicialmente por Mangin, 1975, mas corrigida posteriormente). Segundo aqueles estudos, as interpretações e conclusões derivadas destes métodos nunca devem ser rígidas, já que a frequência dos episódios de precipitação, a dimensão da bacia ou a densidade da rede de drenagem hipogeia podem alterar significativamente o 'efeito-memória' do sistema, apesar de se supor que este comportamento do sistema depende apenas da sua capacidade de armazenamento.

Conscientes desta limitação, vários autores sublinham a necessidade de se utilizarem outros métodos que reforcem e completem a informação extraída da análise de séries temporais, como por exemplo o estudo de dados hidro-físico-químicos (condutividade eléctrica, temperatura da água, quantidade de iões dissolvidos, de isótopos) ou, ainda, a aplicação de traçagens, entre outros (por exemplo, Bakalowicz e Mangin, 1980; Raëisi e Karami, 1997; Grasso, 1999; López-Chicano *et al.*, 2001; Grasso e Jeannin, 2002; Andreo *et al.*, 2002; Ozyourt e Bayari, 2007; Bicalho *et al.*, 2012).

Outros autores, mantendo a perspectiva de análise do sistema cársico como uma 'caixa-negra' propõem a utilização de outras ferramentas matemáticas (curva de recessão, funções de transferência – *transfer functions*, análise em onda curta – *wavelet analysis*) que permitam a obtenção de informação quantitativa sobre o sistema a partir de modelos de *input-output* (por exemplo Labat *et al.*, 1999 e 2000; Mathevet *et al.*, 2004; Chinarro *et al.*, 2010, Hao *et al.*, 2012). Estes estudos, mesmo utilizando os modelos de 'caixa-negra', tentam simular a resposta das surgências à recarga modelando o sistema cársico como um sistema não-linear e não-estacionário, procurando uma maior aproximação à realidade destes hidrossistemas e, assim, compreender e caracterizar com maior exactidão e fiabilidade as suas características físicas, organização interna e hidrodinâmica.

Nos modelos de 'caixa-negra', a obtenção de informação quantitativa é feita a partir da análise da recessão (já anteriormente discutida) e das funções de transferência (*transfer functions*) simples ou complexas (convolução/deconvolução – *kernel functions*). Estas técnicas permitem compreender a hidrodinâmica de diferentes partes do hidrossistema cársico (Tritz *et al.*, 2011) bem como os tipos de escoamento que compõem o hidrograma – escoamento rápido e escoamento de base (Long, 2009).

Na implementação destes modelos, a convolução é um dos métodos mais utilizados, sendo particularmente útil nos hidrossistemas cársicos, onde a complexa geometria da rede de condutas e das áreas porosas não são bem conhecidas, mas podem ser representadas por uma 'função de impulso-resposta' com muito poucos parâmetros iniciais. Trata-se de um

57

método matemático de séries temporais que tem sido amplamente utilizado nos modelos de recarga-descarga para simular a resposta das surgências à infiltração. As formas lineares e não lineares da convolução têm sido amplamente aplicadas à hidrologia cársica de modo a decifrar o comportamento geral do aquífero (por exemplo, Dreiss, 1982, 1983; Larocque *et al.*, 1998; Long e Derickson, 1999; Labat *et al.*, 1999, 2000; Pinault *et al.*, 2001; Denic-Jukic e Jukic, 2003; Padilla e Pulido-Bosh, 2008; Long, 2009; Tritz *et al.*, 2011; Long e Mahler, 2013).

A convolução é particularmente útil para analisar sistemas hidrogeológicos cársicos, os quais respondem rapidamente a alterações na recarga, mas para os quais é muito difícil a simulação com base em modelos distributivos (falta de informação sobre parâmetros físicos). A convolução estima a função impulso-resposta (*impulse-response function – IRF*), a qual caracteriza o funcionamento subterrâneo do hidrossistema cársico independentemente dos *inputs*¹⁶ (Long e Mahler, 2013).

Deste modo, a utilização dos modelos de 'caixa-negra' permite inferir alguns dos processos hidrodinâmicos que ocorrem no interior do hidrossistema bem como algumas das suas próprias características, uma vez que o modo como o hidrossistema cársico modifica o sinal de *input* está fortemente relacionado com as suas propriedades físicas.

No entanto, este método pressupõe a linearidade do sistema cársico, facto, por vezes apontado como uma limitação, dada a forte heterogeneidade espacial e interna dos hidrossistemas cársicos, o que faz com que os efeitos do *input* no *output* não sejam lineares (um episódio de recarga pode não ter um efeito proporcional no caudal das surgências).

2.1.2. Análise de séries temporais (*time series analysis*)

A análise de séries temporais foi introduzida no domínio da hidrologia cársica por Mangin (1971, 1975, 1981, 1984) e, posteriormente, desenvolvida em termos matemáticos por Padilla e Pulido-Bosch (1995). Tem por base operações matemáticas sobre a resposta global do hidrossistema cársico (caudal das surgências) a uma sucessão de eventos de recarga, pelo que não podem ser directamente relacionados com fenómenos físicos que ocorrem no interior do aquífero (Kovács, 2003).

Os métodos utilizados na análise de séries temporais¹⁷ são a análise univariada (autocorrelação e análise espectral) e a análise bivariada (correlação cruzada e análise

¹⁶ Se se considerar que a resposta do sistema cársico está dependente do *input*, então utilizam-se outros métodos, como sejam a análise espectral de Fourier, a análise correlatória e a análise de ondas curtas (*wavelet analysis*).

¹⁷ Os métodos utilizados na análise de séries temporais e na análise do hidrograma (fórmulas matemáticas e respectiva interpretação) serão apresentados detalhadamente na Parte II deste trabalho, já que constituem um dos métodos escolhidos no presente estudo.

espectral cruzada), combinando, assim, o domínio "tempo" (correlações) e o domínio "frequência" (análise espectral). Na análise univariada estuda-se a estrutura interna de cada uma das séries (precipitação e caudal), de forma a identificar variações cíclicas (autocorrelação) e periodicidades (análise espectral).

A análise bivariada, por seu lado, permite a comparação quantitativa entre o *input* e o *output*, fornecendo informação acerca da transformação, no interior do hidrossistema cársico, da recarga (precipitação) em descarga (caudal das nascentes cársicas). Este método, tal como referido anteriormente, possibilita a inferência, ainda que de modo limitado e não espacializado, de algumas propriedades físicas do sistema cársico e do seu funcionamento hidrogeológico global, já que a interpretação dos resultados pode, por vezes, estar relacionada com algumas características geométricas e hidráulicas do próprio hidrossistema cársico (Kovács e Sauter, 2008; Fiorillo e Doglioni, 2010).

Esta metodologia composta por análise correlatória e espectral das séries temporais da precipitação e do caudal tem sido aplicada por vários autores com grande sucesso (Padilla e Pulido-Bosch, 1995; Angelini, 1997; Eisenloh *et al.*, 1997; Larocque *et al.*, 1998; Mathevet *et al.*, 2004; Rahnamaei *et al.*, 2005; Panagopoulos e Lambrakis, 2006; Jemcov e Petric, 2009; Fiorillo e Doglioni, 2010; Kovacic, 2010; Jukic e Denic-Jukic, 2011). A análise multifractal é outra das técnicas utilizadas (Majone *et al.*, 2004; Robledo e Durán, 2006) bem como a análise em componentes principais, aplicada a séries de dados hidroquímicos (López-Chicano *et al.*, 2001; Mudarra e Andréo, 2010; Wong *et al.*, 2012).

Assim, todos os métodos supra-referidos procuram, directa ou indirectamente, inferir informação sobre a estrutura interna do hidrossistema cársico e respectiva hidrodinâmica baseando-se no seu *output* (valores de caudal e características hidroquímicas). Uma compilação e revisão crítica aprofundada destes métodos podem encontrar-se, por exemplo, em Jeannin e Sauter (1998), Palmer *et al.* (1999) e, mais recentemente, em Kovács e Sauter (2008).

2.1.3. Os modelos de eventos singulares – análise da curva de recessão

Os modelos de eventos singulares¹⁸ baseiam-se em técnicas de análise do hidrograma no intuito de estudar e compreender a resposta hidrológica global do aquífero a um único evento de recarga (precipitação). Muitos destes métodos baseiam-se numa simples ou, por vezes, mais complexa 'cascata de reservatórios' e envolvem fenómenos físicos, pressupondo que, na resposta global do hidrossistema cársico, se manifestam as suas três funções: recarga, circulação interna e armazenamento (Kovács, 2003). Deste modo, como

¹⁸ Ver nota de rodapé anterior.

salientam Kovács e Perrochet (2008), as técnicas de análise do hidrograma têm o potencial de estimar parâmetros hidráulicos efectivos e características geométricas internas dos sistemas cársicos.

Em resposta a um evento de precipitação (*input*), o hidrograma apresenta um pico de descarga, com algum atraso relativamente a esse evento, pico esse que é, normalmente, decomposto em três componentes principais: a curva de crescimento, a curva de decrescimento e a curva de esgotamento. Esta última é a parte mais estável do hidrograma porque pode ser assumida como a parte do hidrograma menos influenciada pelas variações temporais e espaciais da infiltração (Kovács e Sauter, 2008).

Algumas técnicas analíticas de eventos singulares centram-se na análise da curva de recessão (parte descendente do hidrograma, a seguir à ponta de cheia, que engloba a curva de decrescimento e a curva de esgotamento). Esta curva fornece as características mais importantes da resposta global do hidrossistema cársico, sendo a análise quantitativa do período de recessão um dos métodos mais simples e úteis no estudo destes hidrossistemas.

De um modo geral, as formas da curva de recessão são similares de um hidrossistema para outro (redução do caudal com o tempo). A configuração da curva é determinada pelas propriedades do aquífero, tais como a condutividade hidráulica, o coeficiente de armazenamento, o gradiente hidráulico, as características geomorfológicas da bacia de recarga e, no caso dos hidrossistemas cársicos, pelo epicarso e pela zona vadosa (Rehr e Birk, 2010). Através do estudo da curva de recessão é possível identificar se a circulação, no conjunto do hidrossistema, é dominada por circulação rápida (domínio da circulação em condutas), por circulação lenta (domínio da circulação difusa) ou por circulação mista. É possível também avaliar/identificar o momento e a magnitude das alterações no caudal das surgências que correspondem à mudança entre estes regimes de circulação (Taylor e Greene, 2008).

Os dois métodos mais comuns são os que consideram a curva de recessão como uma única curva (curva de recessão simples) e os que consideram que a curva de recessão deve ser decomposta em vários troços (curva de recessão composta).

No primeiro caso, assume-se que a **curva de recessão simples** representa as características de um grande reservatório que fornece água paulatinamente (modelos de um só reservatório – *exponential reservoir model* – Maillet, 1905; Marsaud, 1996). Assim sendo, o modelo proposto por Maillet (1905) baseia-se no esvaziamento gradual de um reservatório e supõe que a descarga da surgência é uma função do volume de água armazenada. Este comportamento é descrito pela seguinte equação exponencial:

$$Q_t = Q_0 e^{-at}$$

em que, Q_t é o caudal num tempo t e Q_0 é a descarga inicial num tempo anterior e α é o coeficiente de recessão, normalmente expresso em dias. Se a curva for representada num gráfico em que o caudal é projectado em escala logarítmica e o tempo em escala aritmética, obtém-se uma linha contínua, com um determinado declive – α , entendido como o coeficiente de recessão. Esta equação é adequada, sobretudo, para a caracterização de sistemas cársicos em situação de águas baixas, sendo que quando se verifica um ajustamento quase perfeito da curva de recessão a uma função exponencial (como a da fórmula) a circulação hipogeia tem uma componente de escoamento vertical muito importante (Dewandel *et al.*, 2003).

Por outro lado, há autores que consideram que a curva de recessão deve ser decomposta em vários segmentos – **curva de recessão compósita** (modelos de vários reservatórios – *composite exponential reservoir model* – Forkasiewicz e Paloc, 1967; Sauter, 1992; Baedke e Krothe, 2001; Amit *et al.*, 2002; Kovács, 2003; Kovács *et al.*, 2005). 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 (Király, 1998). 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 exsurgência, o que explica que, normalmente, surjam apenas três funções exponenciais na análise da curva de recessão (Kovács e Perrochet, 2008).

Vários estudos elaborados ao longo do século passado (esquemáticos em Pulido-Bosch, 1987 e explicados em Dewandel *et al.*, 2003) e outros, realizados mais recentemente, mostram que a mudança no declive da recta de recessão, e os diferentes coeficientes α associados, podem ser explicados com a drenagem de diferentes tipos de meios no interior de um hidrossistema cársico – condutas, fracturas, pequenas fissuras e poros. Uma discussão interessante sobre as causas na mudança dos valores dos coeficientes de recessão encontra-se em Bonacci (1993).

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 nascente cársica 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

61

escoamento de base, sendo o caudal das surgências composto por água armazenada no hidrossistema. Cada um destes segmentos tem o seu valor de α característico, como se pode ver na tabela-síntese elaborada por Taylor e Greene (2008) a partir de literatura da especialidade e no hidrograma unitário da Figura 1.1.8.

A ideia de que a curva de recessão compósita pode fornecer informação valiosa sobre o hidrossistema cársico tem sido comprovada por inúmeros estudos. Trabalhos como os de Király e Morel (1976) e Király (1985) concluíram, através de modelação computacional (modelos distributivos híbridos 2-D), que o aumento da densidade da rede de condutas resulta em altos coeficientes de recessão. Os trabalhos de Tallaksen (1995) provaram, igualmente, que a curva de recessão (que compreende um conjunto de exponenciais), representa o esvaziamento de um reservatório específico, sendo a condutividade hidráulica proporcional a α , pelo que os valores mais elevados de α correspondem a condutas (maior condutividade hidráulica) e os valores mais baixos se relacionam com a matriz rochosa (baixa condutividade hidráulica).

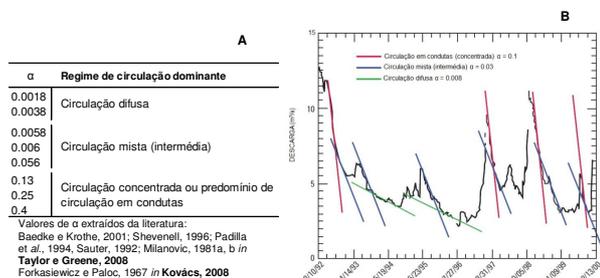


Figura 1.1.8 – Valores característicos do declive da curva de recessão (α) para determinar os regimes de circulação num hidrossistema cársico (A). Hidrograma de uma surgência com decomposição da curva de recessão em vários troços, representativos dos diferentes tipos de circulação hipogeia (B). (adaptado de Taylor e Greene, 2008)

Posteriormente, as simulações realizadas por Eisenlohr *et al.* (1997) e Cornaton (1999) vieram comprovar os resultados anteriores, concluindo que um aumento na condutividade da rede de condutas resulta numa subida dos valores de α . Para além disso, um aumento simultâneo do armazenamento tanto na matriz rochosa (de baixa permeabilidade) 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).

Outros autores propuseram, contudo, descrever o processo de recessão empregando funções matemáticas diferentes ou aproximações metodológicas diferentes (Ford e Williams, 2007). Drogue (1974), por exemplo, descreveu todo o processo de recessão usando uma simples fórmula hiperbólica. No entanto, este método apenas fornece informação qualitativa sobre o hidrossistema cársico, não sendo possível deduzir nenhuma informação física sobre os sistemas de drenagem (Jeannin e Sauter, 1998).

Por seu lado, Mangin (1975) considerou que a distinção deveria ser feita entre duas entidades hidrológicas no interior do hidrossistema cársico: o escoamento rápido proveniente da zona não-saturada representado pela função Ψ , (componente não-linear) e o escoamento de base proveniente da zona saturada representado pela função Φ , (componente linear).

Este método, pela separação que faz entre as condições de infiltração e as condições da zona saturada, fornece importante informação acerca das características dos diferentes subsistemas do hidrossistema cársico, sendo, por isso, profusamente utilizado até hoje, tanto em trabalhos académicos quanto em estudos práticos (por exemplo, Mathevet *et al.*, 2004; Fleury *et al.*, 2007; El-Hakim e Bakalowicz, 2007; Ebrahimi *et al.*, 2007; Bakalowicz *et al.*, 2008; Civita, 2008; Liu *et al.*, 2010; Mudarra e Andreo, 2011). Nestes trabalhos, o método da análise das curvas de recessão compósitas permitiu compreender melhor a hidrodinâmica dos aquíferos, estimar o grau de carsificação dos maciços cársicos, avaliar as reservas hídricas e estabelecer perímetros de protecção dos hidrossistemas cársicos, entre outros.

2.2. Modelos distributivos¹⁹

A aplicação de modelos distributivos torna-se necessária para a caracterização quantitativa das variações espaço-temporais dos fenómenos hidrogeológicos, já que, como vimos anteriormente, os métodos globais, apesar de muito utilizados, fornecem, sobretudo, informação qualitativa sobre as propriedades físicas e a hidrodinâmica dos hidrossistemas cársicos. Os métodos globais estão associados aos chamados *lumped parameters models*,

¹⁹ Pelo facto de não contemplarmos neste estudo a utilização destes modelos computacionais, eles serão aqui apenas apresentados de forma muito breve, sem o desenvolvimento que nos mereceram os anteriores métodos que constituem o cerne deste trabalho (Parte II).

ou seja, modelos que analisam o hidrossistema de forma agregada (como um todo) no processo *input – output*.

Em contrapartida, os modelos distributivos (*distributive parameters models*) possibilitam a análise com maior pormenor das heterogeneidades no interior dos hidrossistemas (Geyer, 2008). Os modelos distributivos consistem, portanto, na divisão do hidrossistema em sub-unidades homogêneas, cada uma delas com parâmetros hidráulicos característicos, e no cálculo do escoamento subterrâneo aplicando equações derivadas de leis básicas da física. O facto de considerarem as variações temporais e espaciais da recarga, dos parâmetros hidráulicos e da descarga, estes modelos conseguem uma caracterização mais detalhada dos sistemas e dos processos de circulação nos hidrossistemas cársicos.

No entanto, a sua desvantagem, relativamente aos métodos globais (e aos *lumped parameters models*), é que necessitam de uma enorme quantidade de informação pormenorizada como sejam dados sobre a geometria do hidrossistema, parâmetros hidráulicos diversos ou ainda condições de recarga. Essa informação é muitas vezes difícil de obter, o que aliado à enorme heterogeneidade espacial dos hidrossistemas cársicos e à sua não-linearidade e não-estacionariedade, torna a aplicação destes modelos um grande esforço de investigação.

Os modelos distributivos incorporam dois conceitos: *discrete approaches* (descreve a circulação nas redes de fracturas ou condutas) e *continuum approaches* (trata da heterogeneidade dos parâmetros a introduzir nos modelos e da sua distribuição espacial). Estes dois conceitos podem ser combinados, resultando em cinco perspectivas de modelação, a saber:

- *Discrete Fracture Network Approach (DFN)*
- *Discrete Channel Network Approach (DCN)*
- *Equivalent Porous Medium Approach (EPM)*
- *Double Continuum Approach (DC)*
- *Combined Discrete-Continuum (Hybrid) Approach (CDC)*

Cada um destes métodos matemático-computacionais (de simulação das características e funcionamento de um hidrossistema cársico) tem sido aplicado ao longo das últimas décadas, sendo os modelos híbridos aqueles que parecem adequar-se melhor ao estudo dos hidrossistemas cársicos. Isto porque os *Discrete models* podem ser utilizados para a representação de características como falhas e condutas enquanto os *Continuum models* representam os outros componentes (matriz porosa e/ou rede densa de finas fissuras).

Recentes revisões e discussões detalhadas de cada uma destas perspectivas podem ser encontradas em Kiraly (1998), Teutsch e Sauter (1998), Kovács (2003), Geyer (2008), Kovács e Sauter (2008); Rehr e Birk (2010).

2.3. As características físico-químicas das águas²⁰ – o caso da temperatura e da condutividade eléctrica

A caracterização do sistema cársico e do seu funcionamento hidrogeológico, tal como referido anteriormente, deve ser efectuada com base em vários métodos (por exemplo análise do hidrograma e análise hidroquímica), de modo a que se consiga, por um lado obter a maior informação possível e, por outro lado, que essa informação seja o mais exacta e correcta possível para não haver interpretações erradas sobre o sistema cársico.

As variações do caudal numa surgência são acompanhadas quase sempre por alterações nas características físico-químicas da água (iões em solução, condutividade eléctrica, temperatura, pH, isótopos ambientais e sedimentos em suspensão – turbidez). O uso individual ou combinado destas propriedades (e respectivas variações) fornece, portanto, informação sobre as características hidrogeológicas e sobre a hidrodinâmica dos hidrossistemas cársicos. Isto porque essas propriedades físico-químicas são fortemente influenciadas pelas litologias que as águas atravessam, os processos físico-químicos que aí predominam, o tempo de residência da água no interior do hidrossistema e as várias condições e formas de circulação que aí coexistem.

De acordo com vários estudos citados por López-Chicano *et al.*, (2001); Ford e Williams (2007); Mudarra e Andreo (2010); Wong *et al.* (2012) e trabalhos reunidos em Andreo *et al.* (2010), a interpretação do comportamento hidroquímico das surgências permite: (i) distinguir vários mecanismos de circulação, normalmente agregados em dois tipos (circulação difusa e em condutas); (ii) calcular o tempo de residência da água no interior do hidrossistema cársico; (iii) determinar a proveniência da água (de evento pluvioso, de armazenamento freático ou de aquífero epicársico); (iv) quantificar os diferentes tipos de recarga (difusa ou concentrada); (v) calcular o tempo que um determinado impulso de recarga leva a atravessar o hidrossistema – *water transit time*; (vi) conhecer características exteriores ao sistema cársico (tipo de solo e respectiva espessura, importantes nos processos de infiltração/recarga); (vii) inferir o grau de carsificação do sistema; (viii) determinar o grau de participação das zonas não-saturada e saturada no funcionamento do hidrossistema cársico; (ix) classificar os hidrossistemas cársicos.

Na vasta literatura da especialidade, algumas das conclusões sobre as características físicas do hidrossistema cársico e respectiva hidrodinâmica são retiradas a partir de estudos feitos principalmente às variações dos principais iões (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), do total de carbono orgânico (TCO), da condutividade eléctrica e da temperatura.

²⁰ Dado o largo espectro de trabalhos e temas abordados no domínio da hidroquímica das surgências e, consequentemente, o elevado número de referências bibliográficas faremos aqui apenas referência aos temas mais presentes na literatura, aos principais trabalhos e também aos aspectos sobre os quais nos debruçaremos neste estudo: condutividade eléctrica e temperatura.

O conteúdo em Mg^{2+} , por exemplo, informa sobre o tempo de residência da água no hidrossistema, em particular na zona saturada (Batiot *et al.*, 2003; Emblanch *et al.* 1998) apesar de a sua concentração depender também de outros parâmetros, tais como a pureza mineralógica e química dos calcários e a presença de dolomite (Mudarra e Andreo, 2010).

O total de carbono orgânico, traçador orgânico não-conservativo, originado no solo, é bastante utilizado, dado que, não sendo de origem antropogénica e a sua mineralização ocorrendo rapidamente (poucas semanas) serve como um indicador da velocidade de infiltração das águas de recarga. Assim, através do cálculo laboratorial do seu decaimento exponencial, concluiu-se que quanto mais elevado o valor de TCO, mais rápida é a infiltração e menor é o tempo que a água leva a atravessar o hidrossistema (Pronk *et al.*, 2006; Charlier *et al.*, 2010; Mudarra *et al.*, 2011).

Porém, os parâmetros mais utilizados são, indiscutivelmente, a **condutividade eléctrica** e a **temperatura** das águas das surgências, pela facilidade de aquisição dos dados e pela valiosa informação que fornecem sobre o funcionamento hidrogeológico do sistema cársico.

O contributo destes parâmetros reside na diferenciação que fazem entre a 'água nova', recentemente infiltrada, e a 'água antiga', armazenada no sistema. Esta 'água antiga,' anterior ao evento pluvioso, é empurrada pela nova água de recarga, num processo designado por 'efeito de pistão' (Bakalowicz e Mangin, 1980; Grasso, 1999). A diferenciação entre estes dois tipos de água descarregada pelas surgências fornece grandes esclarecimentos sobre a origem e o tempo de residência dessa água, informação essa que o hidrograma por si só não fornece. A água recentemente infiltrada é, geralmente caracterizada por valores de condutividade eléctrica mais baixos, enquanto a água mais antiga apresenta valores bem mais elevados devido a uma mais prolongada interacção água-rocha (Ravbar *et al.*, 2010). Assim, é possível distinguir o escoamento rápido (*quickflow*) do escoamento de base (*baseflow*), o que, em termos interpretativos, possibilita a análise, ainda que qualitativa do desenvolvimento da rede de drenagem hipogea e, consequentemente, o estimar do grau de 'carsificação funcional' do hidrossistema (Liñán Baena *et al.*, 2009; Mohammadi e Field, 2009; Barberá e Andreo, 2010).

A condutividade eléctrica da água reflecte a quantidade total de sólidos dissolvidos, o que nos sistemas cársicos é controlado principalmente pelo equilíbrio do carbonato de cálcio. Os valores de condutividade eléctrica são influenciados pela circulação e armazenamento subterrâneos da água e, consequentemente, pelo tempo de residência e respectivos processos químicos envolvidos (Massei *et al.*, 2007). A variação da condutividade eléctrica nas surgências reflecte as variadas contribuições de diferentes massas de água que circulam no sistema (por exemplo a água de rios que se perdem em sumidouros, infiltração difusa, infiltração concentrada, água armazenada nas fracturas e na matriz da rocha). Deste

modo, a condutividade eléctrica característica de uma massa de água depende da sua origem, do seu percurso e do tempo que permanece armazenada no sistema cársico (tempo de residência).

As variações da condutividade eléctrica podem ser representadas através de uma curva (curva de distribuição de frequências – CDF) que mostra a distribuição, por classes, das frequências relativas da condutividade eléctrica. Se a curva apresenta uma forma unimodal com uma significativa uniformidade, indica-nos um baixo grau de funcionalidade do hidrossistema cársico. Em contrapartida, se predomina uma situação multimodal mas sem um modo definido, então estamos perante um sistema hidrogeológico cársico de elevada funcionalidade – Figura 1.1.9 (Mudarra e Andréo, 2010).

De acordo com os trabalhos de Maqsood (1996), Plagnes (1997) e Bakalowicz (1979), citados por Massei *et al.* (2007), as curvas de distribuição de frequências servem para classificar, ainda que qualitativamente, o grau de carsificação dos sistemas e, mais precisamente, a eficiência da rede de drenagem subterrânea.

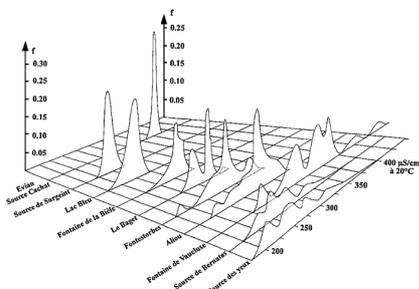


Figura 1.1.9 – Curvas de distribuição de frequências (CDF) para vários hidrossistemas bastante carsificados (Bakalowicz, 1979 citado por Massei *et al.*, 2007)²¹.

Assim, e de acordo com os valores de condutividade eléctrica (em conjugação com o hidrograma) é possível identificar tipos e fases nas respostas das surgências (Ford e Williams, 2007; Ravbar *et al.*, 2010), embora nem sempre se registem todas as fases e possa haver diferenças de pormenor. Assim:

²¹ Bakalowicz associava os diferentes picos do gráfico a diferentes tipos de água que chegavam ao exutório e sugeriu que o número de picos e a distância entre eles era um indicador da eficiência da rede de drenagem hipogea dos hidrossistemas cársicos.

Fase 1 – Após o início de um episódio de precipitação intensa, normalmente a surgência leva algumas horas até mostrar uma resposta ('lag phase').

Fase 2 – Subsequentemente, a descarga, por norma, aumenta rapidamente, enquanto a condutividade eléctrica e a temperatura das águas continuam estáveis, o que é explicado pelo facto da circulação durante esta fase se fazer em condutas. Pode ocorrer turvação das águas devido à mobilização de sedimentos das condutas cársicas.

Fase 3 – Subida temporária da condutividade eléctrica (que se observa imediatamente antes ou durante o pico de descarga) que pode ser explicada pela chegada de águas de outras partes do hidrossistema devido à alteração das relações de pressão entre as condutas e o sistema de fissuras/matriz da rocha. Esta água pode advir do epicarso ou do volume de rochas fissuradas adjacente às condutas (zona saturada). A temperatura mantém-se estável, porque se trata de 'água antiga'. As fases 2 e 3 juntas são, normalmente, designadas de 'efeito-pistão' porque o mecanismo principal é o deslocamento da água por impulso de pressão (*pressure pulse*).

Fase 4 – A chegada de 'água nova' normalmente ocorre durante o pico de cheia ou no período de decrescimento e é marcada pela descida da condutividade eléctrica ('efeito de diluição') e por alterações na temperatura.

Fase 5 – Finalmente, o caudal e os outros parâmetros voltam, progressivamente, às condições de escoamento de base.

A variação da temperatura da água é outro critério que pode ser usado para distinguir os diferentes modos de circulação subterrânea. Quando a água circula de forma turbulenta por largas condutas no hidrossistema cársico, a temperatura da água das surgências é afectada pela temperatura do ar. Contudo, quando a circulação ocorre de forma difusa ao longo de pequenas fissuras a temperatura da água não é afectada pelas oscilações da temperatura do ar devido às trocas de calor entre a água e a massa rochosa (Raеisi e Karami, 1997; Kogovsek e Petric, 2010).

A temperatura da água pode ser usada, portanto, como um traçador natural que revela a estrutura da circulação hipogea (Bonacci, 1987; Genthon *et al.*, 2005; Luhmann *et al.*, 2011). Trata-se de um parâmetro que transporta consigo informação sobre as condições hidráulicas e termais do interior do sistema cársico. Por isso, pode ser considerado como um traçador não-conservativo e interactivo devido às trocas de temperatura entre a água e a rocha ao longo do percurso subterrâneo. A intensidade dessas trocas é controlada pelas características térmicas das rochas, pelas características das condutas, pela velocidade de circulação (Renner e Sauter, 1997; Covington *et al.*, 2011) pelo tipo de fracturação (Liedl *et al.*, 1998) ou ainda pelo local onde a água fica temporariamente armazenada (Mohrlök e Sauter, 1999). Isto deve-se ao facto de a água tender a estabelecer um equilíbrio de temperatura com a rocha circundante.

Os sinais térmicos da água das surgências assumem um importante papel, uma vez que fornecem informação sobre a estrutura interna dos hidrossistemas. Os trabalhos que têm sido realizados neste domínio mostram que a variação da temperatura permite inferir/conhecer o modo de infiltração, estimar a velocidade de circulação, a condutividade hidráulica, a espessura do sistema cársico, os tempos de residência, as trocas entre as condutas e a matriz rochosa, a geometria e o volume das condutas (Sauter, 1992; Renner e Sauter, 1997; Martin e Dean, 2001; Luetscher e Jeannin, 2004; Sreaton *et al.* 2004; Birk *et al.*, 2004, 2006; Long e Gilcrease, 2009; Covington *et al.*, 2011; Luhmann *et al.*, 2011). Por exemplo a diferença temporal (*atraso*) entre a resposta do caudal e a resposta da temperatura tem sido utilizada para estimar o volume do sistema de condutas. Contudo, e como salientam muitos destes autores, a informação contida nos sinais térmicos nas surgências ainda não estão totalmente compreendidos e estudados.

Um dos estudos mais extensos sobre esta temática foi elaborado por Luhmann *et al.* (2012) que concluíram que, em geral, a resposta térmica das nascentes cársicas é determinada pela 'eficácia' com que ocorrem as trocas de calor entre o hidrossistema e a água que o percorre. Partindo dessa premissa e tendo em consideração o tipo de infiltração, o modo e a velocidade de circulação, os autores estabeleceram padrões térmicos (4 padrões) para o comportamento térmico das surgências (Figura I.I.10).

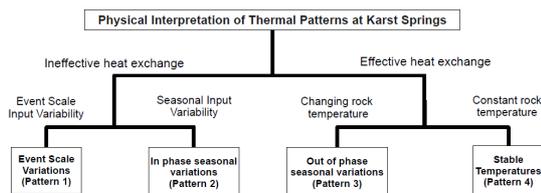


Figura I.I.10 – Padrões térmicos de uma surgência segundo Luhmann *et al.* (2012)

A explicação e interpretação físicas desses padrões são, resumidamente, as seguintes:

Padrões 1 e 2 – flutuações de curto prazo (após eventos de recarga ou totalmente em consonância com as variações da temperatura à superfície). Reflectem um modo de infiltração predominantemente concentrado e um percurso subterrâneo rápido, feito ao longo de condutas, onde as trocas térmicas são ineficazes (maior velocidade de circulação e

69

menos superfície rochosa – paredes das condutas – em contacto com a água). Deste modo, a insignificante interação térmica água-rocha permite a penetração em profundidade da água recém-infiltrada e em desequilíbrio térmico, que vai chegar até ao exutório sem ter transferido a sua 'carga térmica' para a rocha.

Padrões 3 e 4 – flutuações de longo prazo (estabilidade térmica no padrão 4), não coincidentes com as variações sazonais da temperatura. Espelham uma infiltração difusa, em que a água vai sendo filtrada ao atravessar estruturas da zona não-saturada termicamente eficazes (matriz da rocha, fissuras e fracturas muito estreitas) antes de entrar no sistema de condutas. O percurso é muito mais lento, permitindo a troca de calor entre a água e o hidrossistema, estabelecendo-se um maior equilíbrio entre ambos e desvirtuando fortemente o sinal térmico exterior transportado pela água.

Os autores referem ainda que, como um hidrossistema cársico tipicamente possui quer percursos termicamente eficazes quer ineficazes, a relação infiltração difusa/infiltração concentrada exerce uma forte influência na resposta térmica das surgências. Finalmente, salientam que o padrão observado num determinado momento numa surgência é o somatório da resposta de todos os percursos, variando apenas o peso percentual de cada percurso.

Muitos têm sido os estudos que utilizam a temperatura da água das surgências juntamente com outros parâmetros hidroquímicos como forma de, em conjunto com o hidrograma, caracterizarem o funcionamento hidrogeológico dos hidrossistemas cársicos. Normalmente, os autores focam-se nas variações dos parâmetros químicos causados por um evento de elevada precipitação de modo a conhecerem e compreenderem os factores internos e externos envolvidos no processo (desde a infiltração até ao exutório). Uma grande parte desses trabalhos e respectivos resultados encontram-se referidos, para além dos trabalhos já citados no início deste ponto, em Liñán Baena *et al.* (2009); Mohammadi e Field (2009); Luhmann *et al.* (2012).

alguns locais, bastante para além desse limite de superfície (bacia hidrográfica do rio Anços), situação que ocorre ao longo dos limites leste e norte (Figura I.II.1 B).

A definição do limite da área em estudo constituiu, por isso, o primeiro desafio nesta investigação, uma vez que, nas regiões cársicas, o limite topográfico da bacia hidrográfica à superfície quase nunca corresponde ao limite da bacia hidrogeológica, dado que o sistema de drenagem tem, nestas áreas, um desenvolvimento essencialmente subterrâneo. Para além disso, é frequente em áreas com um endocarso bastante desenvolvido, a alteração dos padrões de circulação subterrânea conforme o posicionamento do nível piezométrico ao longo do ano hidrológico. Assim sendo, podem ocorrer casos em que, sazonalmente, hidrossistemas cársicos recebam ou forneçam escoamento subterrâneo de/para sistemas adjacentes ou, ainda, situações em que uma exsurgência pode servir, temporariamente, de exutório para vários hidrossistemas, drenando água proveniente da totalidade ou apenas de parte desses sistemas cársicos.

No hidrossistema em estudo, o facto de a sua delimitação se fazer por condicionamento tectónico (limitação por falha) e por rochas de baixa permeabilidade (rochas margosas) faz com que essas alterações piezométricas e de circulação hipogea não tenham expressão, embora não se possam excluir por completo trocas residuais e pontuais com aquíferos vizinhos, mas sem significado relevante do ponto de vista da sua dinâmica hidrogeológica e consequente implicação no caudal das exsurgências. Assim sendo, o exercício de delimitação tornou-se menos complexo, tendo-se baseado sobretudo em critérios morfo-estruturais, fundamentais neste processo: (i) uma grande homogeneidade litológica, já que esta área, pertencente ao Maciço de Sicó, é integralmente constituída por calcários do Dogger (Batoniano e Bajociano, no caso do hidrossistema em estudo); (ii) a presença de alinhamentos tectónicos que delimitam muito bem este Maciço a ocidente e a norte e que assumem um papel determinante na condução da circulação subterrânea em direcção às exsurgências da bordadura oeste (vale do rio Anços); (iii) uma diferença altitudinal considerável (mais de 300 m) entre a área de recarga e o nível das exsurgências, responsável pela verticalização do sistema de drenagem subterrâneo ao longo da espessa zona não-saturada (existência de um forte gradiente hidráulico) auxiliando o percurso da água até ao exutório principal (exsurgência dos Olhos d'Água do Anços) e evitando a sua dispersão lateral, tal como acontece em hidrossistemas de desenvolvimento predominantemente horizontal. De salientar, ainda, como factor de auxílio na delimitação, o facto de a recarga provir apenas da precipitação, sem qualquer tipo de contributo proveniente de áreas não-cársicas (por exemplo, cursos de água que se perdem em sumidouros).

Porém, se as características físicas da região facilitaram a tarefa, aspectos houve que nos obrigaram a ponderar mais demoradamente sobre a definição geográfica da área a estudar. O primeiro deles foi a inexistência de cartografia geológica detalhada (1/50 000) de

73

praticamente toda a metade leste da área e de os limites da carta geológica 1/500 000 serem, atendendo à escala, pouco precisos. Somam-se também os poucos estudos que têm sido empreendidos nesta área na perspectiva da hidrodinâmica cársica¹, pelo que a informação decorrente, por exemplo, de traçagens artificiais (crucial no estabelecer dos limites das bacias hidrogeológicas) é praticamente inexistente².

Em alguns sectores (principalmente oeste e sul), o limite da área de estudo decalca o limite dos calcários do Dogger. O limite norte também não se afigurou de grande dificuldade, uma vez o alinhamento de direcção SW-NE na área de Tapéus (imediatamente a norte da Serra do Rabaçal) constitui, por um lado, uma barreira à progressão da água e, por outro lado, um caminho preferencial de escoamento subterrâneo.

As maiores incertezas centram-se na parte leste, onde a passagem litológica gradual, sem condicionamento tectónico, dos calcários do Batoniano para os calcários margosos do Aaleniano torna muito difícil a delimitação, situação referida também por Crispim (1986), sobre a dificuldade de definição do limite cartográfico da sua área de estudo em Ansião. Acresce, ainda, a existência de pequenas exsurgências temporárias, cuja bacia de alimentação é contígua à que alimenta as exsurgências do bordo oeste, sem que se perceba com clareza a fronteira entre ambas. Assim sendo, decidimos incluir essa estreita faixa de calcários margosos do Aaleniano, considerando-a parte integrante do hidrossistema em estudo (tal como Almeida *et al.*, 2000), mas excluí-la da área de recarga das exsurgências da bordadura oeste (vale do rio Anços), uma vez que a precipitação que cai sobre estes materiais se dirigirá para leste, escoando-se através das referidas exsurgências do bordo leste. Consideramos, por isso, na delimitação da área de recarga, o limite dos calcários do Dogger, ocasionando, deste modo, um ligeiro desfasamento na parte mais oriental do Planalto de Degraças-Alvorge entre a área total do hidrossistema em estudo (cerca de 120 Km²) e a área de recarga do principal conjunto de exsurgências do hidrossistema e que será o objecto de estudo (aproximadamente 112 Km²) – Figura I.II.1B. De forma idêntica, surgiram dúvidas no limite sul e sudeste, na passagem dos calcários do Dogger para o Malm.

Deste modo, os critérios para a delimitação da área de estudo foram essencialmente estruturais e litológicos, seguindo o esboço de circulação hipogea apresentado por Cunha

¹ Os estudos que têm sido realizados no Maciço de Sicó são de carácter quase exclusivamente geomorfológico, sendo a hidrologia cársica abordada apenas de relance e na perspectiva das formas (em particular as exsurgências ou os sistemas espeleológicos) e não da hidrodinâmica. Para além disso, muitos desses trabalhos (à excepção de Cunha, 1988) são de carácter genérico e, por vezes, aplicado (caso do "património geomorfológico"), em que a área em estudo não surge como o tema central, mas antes englobada no carso português ou carso do centro-litoral de Portugal. De destacar, a propósito, alguns trabalhos que abordam, com maior ou menor pormenor, a área em estudo: Crispim (1986; 2010a; 2010b); Cunha e Soares (1987); Cunha (1996; 2003); Cunha e Dimuccio (2014); Soares (2001; 2008); Vieira e Cunha (2006).

² No domínio da hidrodinâmica cársica, de referir a existência apenas de alguns estudos na região de Ansião, a sudeste da área em estudo (Crispim, 1986), alguns trabalhos antigos (Carreira, 1986; Rebelo, 1987) e, mais recentemente, Paiva *et al.* (2012).

(1988) – Figura I.II.1.2. A área definida para estudo corresponde, grosso modo, à Serra do Rabaçal, à quase totalidade do Planalto de Degracias-Alvorge (à excepção do limite mais oriental) e ainda a parte norte da Serra de Sicó. A sua extensão territorial e a necessidade de lhe conferir um carácter espacial bem definido levaram a que designássemos a área de estudo como 'hidrossistema cársico de Degracias-Sicó', tendo-se, assim, adoptado o nome de uma das principais localidades dentro dos limites da área (Degracias) e o nome da serra que a limita, a sul.

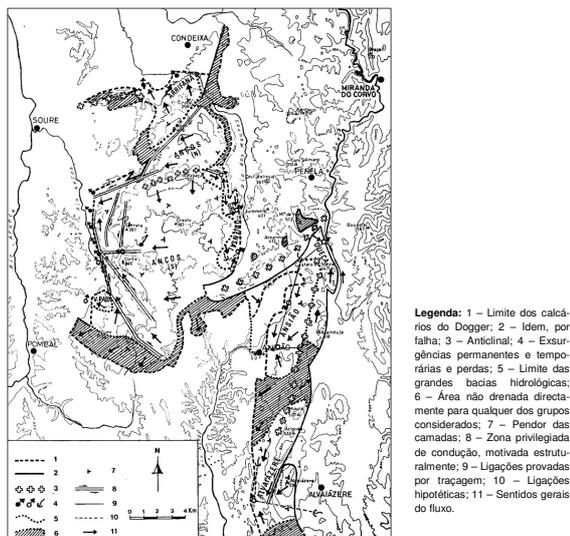


Figura I.II.1.2 – Esquema (provisório) da circulação hipogea nas serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere. Fonte: Cunha (1988)

O hidrossistema em estudo encontra-se compartimentado em duas sub-bacias hidrogeológicas, separadas pela Serra do Rabaçal: a maior, de localização meridional, é constituída pela Serra do Sicó e pelo Planalto de Degracias-Alvorge e drena principalmente para

75

os Olhos d'Água do Anços e uma outra sub-bacia setentrional, bastante mais pequena, que drena para a exsurgência do Ourão³ (Figura I.II.1.B).

A compartimentação do hidrossistema pela Serra do Rabaçal explica-se pelo núcleo essencialmente margoso, que limita a circulação subterrânea no Maciço Calcário. Contudo, poderá verificar-se transferência de água entre estes dois sectores devido à elevada fracturação na frente ocidental do Maciço, favorecendo a passagem de água da 'bacia de drenagem' dos Olhos d'Água do Anços para a exsurgência do Ourão, realidade favorecida pela posição topográfica inferior desta exsurgência relativamente às restantes exsurgências do vale do rio Anços.

2. Enquadramento hidrogeológico

Em termos hidrogeológicos, o hidrossistema em estudo corresponde à metade setentrional do hidrossistema cársico Sicó-Alvaiázere, que se estende, longitudinalmente, ao longo de cerca de 56 Km, ocupando, na totalidade, uma área de 332 Km² e que engloba dois sectores principais distintos: a metade setentrional, a maior e mais importante, correspondente ao Maciço Calcário de Sicó, onde a drenagem subterrânea se processa, sobretudo, para oeste (onde se localizam as principais exsurgências) e a metade meridional, de menor expressão, com uma forma muito mais alongada e estreita, onde a drenagem se processa principalmente para sul (exsurgências dos Olhos d'Água de Ansião e do Olho do Tordo – Alvaiázere) e, em parte, para leste, emergindo já em formações do Liásico (Olhos d'Água do Dueça) - Figura I.II.1.3.

O seu funcionamento hidrológico é tipicamente cársico (Almeida *et al.*, 2000), sendo, por isso, a drenagem composta por uma vasta e complexa rede de condutas e fissuras subterrâneas que encaminham a água até ao conjunto de exsurgências que bordejam o hidrossistema.

A circulação hipogea desta área cársica parece ser determinada pela estrutura, designadamente pelas grandes linhas de fracturação, locais de circulação preferencial das águas subterrâneas, e pelas deformações tectónicas, de onde se destacam os anticlinais do Rabaçal, Torre de Vale de Todos (de direcção ENE – WSW) e de Campo-Camporez (de direcção submeridiana), cujos núcleos margosos constituem importantes obstáculos à circulação subterrânea da água (Cunha, 1988) – Figura I.II.1.2.

³ Esta compartimentação foi por nós observada no campo aquando da turvação das águas afluentes à exsurgência do Ourão decorrente de trabalhos numa pedra localizada na vertente norte da serra do Rabaçal, turvação que não ocorreu nos Olhos d'Água do Anços, a sul do anticlinal do Rabaçal, o que prova o seu carácter de importante barreira subterrânea à circulação das águas.

Como se pode observar na Figura I.II.1.3, a drenagem subterrânea na parte setentrional do sistema aquífero Sicó-Alvaiázere, pode dividir-se em dois sectores, de dimensões muito desiguais: o bordo leste, onde, no contacto com os calcários margosos menos permeáveis do Aaleniano, existe apenas um pequeno número de exsurgências de carácter temporário e de caudal muito reduzido (Alvorge, Alcalamouque e Legação) e a bordadura oeste, que constitui o principal exutório do sistema, através de um conjunto de exsurgências que se estendem ao longo do vale do rio Anços, sendo as principais saídas os Olhos d'Água do Anços e o Ourão. Na parte oeste, para além destas duas importantes exsurgências permanentes, existem várias outras, subsidiárias, com caudais bastante mais baixos, tanto

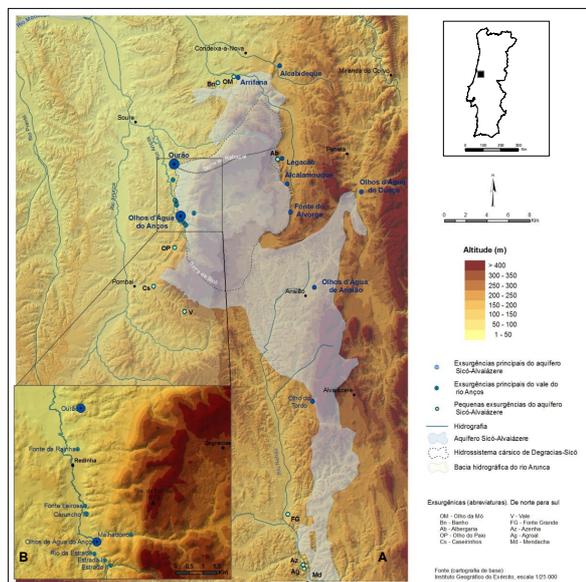


Figura I.II.1.3 – O enquadramento da área de estudo na bacia do rio Arunca e no aquífero Sicó-Alvaiázere. Localização das saídas naturais do sistema aquífero – A. As exsurgências do vale do rio Anços (em destaque) – B

77

de carácter temporário como permanente (a montante e a jusante dos Olhos d'Água do Anços, respectivamente).

Estas exsurgências, 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 (Figura I.II.1.3), situadas no contacto dos calcários do Dogger com os materiais gresosos ocidentais mais recentes (vale do rio Arunca). A sua localização está, portanto, relacionada com questões estruturais e parece indicar a inclinação do tecto das zonas hidrológicas subterrâneas para oeste, acompanhando o pendor das camadas (por si só orientador do escoamento), o que parece ser atestado pela diferença altimétrica e de caudal entre as exsurgências do bordo leste (posicionadas a cotas de 225 m, 245m e 310 m) e as do bordo oeste (situadas a cotas entre os 40 e os 75 m)⁴.

3. As principais exsurgências do vale do rio Anços (Olhos d'Água do Anços e Ourão) no conjunto do hidrossistema cársico de Sicó-Alvaiázere

Nos trabalhos académicos que, de algum modo, englobam as exsurgências que bordejam o extenso hidrossistema de Sicó-Alvaiázere (Carreira, 1986; Rebelo, 1987; Cunha, 1988; Almeida, 2000) existe unanimidade quanto ao facto de a maior parte da água que circula nos calcários do Dogger (formações principais deste sistema cársico) drenar para o vale do rio Anços, onde se localiza não só a maior parte das exsurgências, mas também as mais importantes (Olhos d'Água do Anços e Ourão).

Segundo Cunha (1988), essas exsurgências serão responsáveis pela drenagem de mais de metade das águas que circulam no interior dos calcários do Dogger. Mais recentemente, Peixinho de Cristo (1997) refere que cerca de 68% da descarga anual média do hidrossistema Sicó-Alvaiázere ocorre na sua parte setentrional. No intuito de confirmar estas ideias, começámos por pesquisar e recolher informação relativa ao caudal, nas duas últimas décadas, das exsurgências mais importantes do sector setentrional do hidrossistema de Sicó-Alvaiázere⁵: Olhos d'Água do Anços e Ourão (bordo oeste); Arrifana (limite norte); Alcalamouque (bordo leste). Deste modo, tentámos determinar, o mais aproximadamente possível (dado só existir informação para estas exsurgências), qual a percentagem de água drenada pelas duas principais exsurgências do vale do rio Anços ao longo do ano

⁴ A única excepção é a exsurgência do Malhadoiro (no vale do Poio), a uma altitude de 140 m, mas que funciona apenas em anos excepcionalmente pluviosos, como uma espécie de "trop plein" do hidrossistema.

⁵ Os dados utilizados neste estudo foram gentilmente cedidos pela equipa de hidrometria da antiga Direcção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território, responsável pela medição dos caudais destas exsurgências, pelo que conhecemos com pormenor a data da realização de cada medição. De salientar, portanto, que os valores de caudal analisados não resultam de médias obtidas a partir de registos continuados; são valores obtidos por medições com micro-molinete e molinete, pelo que são pontuais.

hidrológico e, conhecer, assim, a sua real importância no contexto da dinâmica hidrogeológica deste maciço cársico.

Do ponto de vista metodológico, de salientar dois aspectos importantes na determinação da percentagem de água escoada pelos Olhos d'Água do Anços e pelo Ourão no conjunto das principais saídas naturais da parte setentrional do hidrossistema. Em primeiro lugar, deve sublinhar-se a impossibilidade de comparação contínua do valor de caudal das quatro exsurgências ao longo da série considerada (1999/2000 a 2007/2008) devido às lacunas existentes nas séries de dados e ao grande desfasamento temporal entre as medições, por vezes de várias semanas. Por conseguinte, procurou-se períodos coincidentes (em que existissem dados para todas as exsurgências) para efectuar uma análise mais pormenorizada, tentando que: (i) a diferença temporal entre as medições não excedesse mais de uma semana; (ii) não tivesse ocorrido precipitação significativa – superior a 20 mm – no intervalo entre as medições⁶.

Em termos quantitativos, as exsurgências com maior caudal são, destacadamente, os Olhos d'Água do Anços e o Ourão (bordadura oeste), sendo que, no caso da primeira, se verifica uma enorme diferença quantitativa entre o caudal no trimestre invernal (extremamente elevado quando comparado com as restantes exsurgências) e o caudal durante os meses de estio (valores mensais médios inferiores a 0,5 m³/s) – Figura I.II.1.4. No caso do Ourão essa diferença é muito menor, embora nos pareça um pouco fictícia, dado que esta exsurgência assume a forma de uma represa e os valores de caudal (medido a jusante) são amortecidos em período de águas altas e aumentados na estação seca.

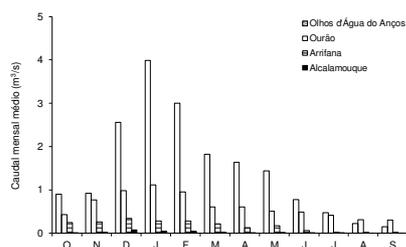


Figura I.II.1.4 – Caudal mensal médio (m³/s) no período 1999/2000 – 2007/2008

⁶ Utilizámos a estação udográfica de Degraçias (precipitação diária) como referência.

Ainda na metade setentrional, de salientar as exsurgências de Arrifana (limite norte) e de Alcalamouque (bordo leste), cujo caudal é bastante inferior aos Olhos d'Água do Anços e ao Ourão, chegando mesmo a desaparecer (Alcalamouque) ou a reduzir-se a algumas dezenas de litros por segundo de Junho a Setembro (Arrifana).

Não obstante as diferenças quantitativas entre o caudal das exsurgências analisadas, o ritmo inter e intra-anual é muito semelhante, indicando que se trata de um hidrossistema com funcionamento hidrológico relativamente homogéneo, ou seja, não parece existir nenhum sector com características hidrogeológicas muito diferenciadas⁷, mesmo no sector meridional do hidrossistema. No entanto, sublinhamos que se trata de uma consideração genérica que só poderia ser conclusiva se tivéssemos a monitorização, em simultâneo, das principais saídas naturais.

No entanto, mais do que a caracterização baseada em valores totais, assume particular interesse o estudo da percentagem de água debitada por cada uma das quatro exsurgências consideradas, uma vez que permite conhecer a importância de cada uma delas enquanto exutórios do hidrossistema e, assim, compreender, ainda que de forma indirecta, o padrão geral da circulação subterrânea no Maciço Cársico. Nesta análise começámos por considerar os valores mensais de caudal medido ao longo de três anos hidrológicos consecutivos, de características udométricas distintas: 2002/03 (ano húmido); 2003/04 (ano médio) e 2004/2005 (ano extremamente seco).

Comparando o valor de caudal medido no mesmo mês nas quatro exsurgências ao longo desses três anos, os Olhos d'Água do Anços e o Ourão destacam-se, drenando, conjuntamente, mais de 75% da água que circula na metade setentrional do hidrossistema de Sicó-Alvaiázere (Figura I.II.1.5), sendo que, na grande maioria dos meses considerados (86%) debitam mais de 80% da água que circula nesse sector⁸. Esta concentração é particularmente notória nos meses mais secos (de Junho a Setembro), representando estas duas exsurgências praticamente a única saída de água, o mesmo sucedendo em anos hidrológicos muito secos, tal como 2004/2005, ao longo do qual representaram mais de 94% do total de descarga do hidrossistema. Esta situação justifica-se não só pela área de recarga destas duas exsurgências ser muito superior à das restantes exsurgências, (principalmente a dos Olhos d'Água do Anços) como também pela sua posição altimétrica

⁷ Esta hipótese é confirmada também pelos dados referentes às exsurgências dos Olhos d'Água do Dueça (alimentada em parte pelo aquífero Sicó-Alvaiázere) e dos Olhos d'Água de Ansião (parte meridional do aquífero).

⁸ De acordo com os dados apresentados por Peixinho de Cristo (1997), os Olhos d'Água do Anços e o Ourão drenam, em conjunto, 80% da água de toda a metade setentrional do hidrossistema de Sicó-Alvaiázere, enquanto as exsurgências do vale do rio Anços (bordadura ocidental) drenam, no total, 91%. Resta, portanto, cerca de 8 a 9% da água deste sector norte com drenagem para a parte leste (exsurgências de Legação, Alcalamouque e Alvorge).

(cotas inferiores a 70 m), ao que acresce a inclinação geral das camadas calcárias para oeste (exceptuando apenas algumas pequenas áreas devido a deformação tectónica).

De referir, também, a grande importância dos Olhos d'Água do Anços como principal ponto de descarga do hidrossistema nos períodos de maior precipitação (caso dos meses do fim do Outono, do Inverno e do início de Primavera), em que o caudal desta exsurgência representa, por si só, mais de 70% da descarga deste sector norte, particularmente em anos bastante húmidos. Nos meses de estiagem e também em anos secos, em que o caudal dos Olhos d'Água do Anços diminui muito significativamente, passa a ser a exsurgência do Ourão a drenar uma parte significativa da água armazenada, embora, como referimos anteriormente, os valores percentuais estejam um pouco deturpados devido à sua forma em represa. De qualquer modo, na totalidade, a bordadura oeste representa, nos períodos mais secos, mais de 90% da água drenada, tal como vimos anteriormente.

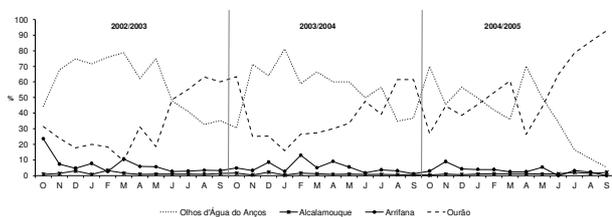


Figura I.III.5 – Percentagem mensal de água drenada ao longo de três anos hidrológicos (2002/2003 – 2004/2005) por cada uma das quatro principais exsurgências do sector setentrional do hidrossistema cársico de Sicó-Alvaiázere

Os resultados são muito semelhantes quando procedemos a uma análise mais pormenorizada, relativa a uma mesma campanha de medições em todas as exsurgências num curto período, seguindo os critérios metodológicos anteriormente referidos. Nessa análise tivemos ainda em consideração o estado hídrico do sistema cársico através da quantidade de precipitação acumulada até à data e as características do ano hidrológico anterior (particularmente na análise do mês de Outubro).

Deste modo, pode concluir-se que de Novembro a Maio, no conjunto das quatro exsurgências consideradas, os Olhos d'Água do Anços descarregam, por si só, mais de 50% da água que circula no interior do maciço cársico, à excepção apenas de anos

extremamente secos (caso de 2004/2005), em que o seu caudal se reduziu drasticamente, não ultrapassando 0,4 m³/s, mesmo no Inverno – Quadro I.III.1.

Nos anos húmidos ou muito húmidos, a exsurgência dos Olhos d'Água do Anços é responsável por mais de 60% (ou mesmo 70%) da água descarregada do sector setentrional, o que acontece também em anos hidrológicos normais.

Quadro I.III.1 – Percentagem mensal de água escoada através das principais exsurgências da parte setentrional do hidrossistema Sicó – Alvaiázere, por mês, em anos hidrológicos de características pluviométricas diferentes, no período 1999/2000 – 2007/2008

	OAA %	Alcal. %	Arifana %	Ourão %	Caudal mensal médio (m³/s)	Precipitação acumulada (mm)	Prec. acu./ total anual %	Módulo/ (m³/s)	Caudal mensal médio/ Módulo	OAA+ Ourão %	Alcal.+ Arifana %	
Out.	2003	30	1	5	63	0,5	101	8*	1,2	94	6	
	2004	70	0	3	27	2,7	32	8	6,8	97	3	
	2007	18	1	4	77	0,3	14*	3*	0,9	94	6	
Nov.	1999	55	1	7	38	1,3	244	22*	2,6	93	7	
	2001	58	1	5	36	0,5	253	27*	1,0	94	6	
Dez.	2001	69	3	9	19	10,1	665	33	10,2	88	12	
	2003	64	2	9	25	4,3	468	28	4,4	89	11	
Jan.	2004	81	0	3	16	5,9	578	50	4,4	97	3	
	2005	50	1	4	46	0,8	126	32	0,6	95	5	
	2006	63	0	8	29	2,3	430	46	1,7	92	8	
Fev.	1999	54	1	6	40	1,2	355	36	1,1	94	6	
	2000	67	1	4	28	1,6	546	49	1,5	95	5	
	2008	76	0	1	23	1,4	229*	40	1,3	99	1	
Mar.	2001	69	1	10	20	9,7	1750	86	14,5	89	11	
	2003	76	1	10	12	3,4	1309	77	5,0	88	12	
Abr.	1999	52	8	5	36	1,1			0,6	1,8	88	12
	2002	61	1	7	31	1,4			2,4	92	8	
Mai.	1999	63	1	4	31	1,7			0,5	3,2	95	5
	2000	70	1	11	18	6,4			12,0	88	12	
	2001	68	1	5	27	2,3			4,3	95	5	
Jun.	1999	49	1	4	46	0,7			0,3	2,1	95	5
	2001	67	1	3	30	1,5			4,5	97	3	
	2004	49	1	4	47	0,8			2,5	96	4	
Jul.	1999	44	1	2	53	0,6	1998/99	993	0,2	2,6	97	3
	2000	57	0	4	39	1,0	1999/00	1123	0,2	4,4	96	4
	2004	57	1	4	39	0,3	2000/01	3915	0,1	1,5	96	4
	2000	40	1	4	55	0,6	2001/02	943	0,1	4,6	94	6
	2001	41	1	4	53	0,7	2002/03	1686	0,1	7,1	95	5
Ago.	2004	34	4	3	60	0,6	2003/04	1161	0,1	5,5	92	7
	2001	40	1	3	56	0,5	2004/05	396	0,1	4,3	95	5
	2003	35	3	1	60	0,5	2005/06	938	0,1	4,5	95	5
	2004	37	1	1	62	0,4	2006/07	1089	0,1	3,0	98	2
	2007	17	1	2	80	0,9	2007/08	579*	0,1	7,3	97	3

OAA - Olhos d'Água do Anços
Módulo do período 1998/1999 - 2007/2008

* valores de precipitação diária muito elevados
* dados relativos à estação udométrica de Pombal



Nos meses de Junho e Julho, a percentagem de água descarregada através dos Olhos d'Água do Anços diminui bastante, significando menos de metade do total de água escoada do hidrossistema, à excepção apenas dos anos húmidos (em que se registou uma elevada entrada de água no sistema) ou dos anos considerados normais, mas com uma entrada adicional de água no mês de Maio (pico primaveril de precipitação).

Durante o estio (Agosto e Setembro), com a quase ausência de precipitação, o caudal da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços reduz-se ao mínimo, significando, em termos percentuais, menos de metade da água escoada, passando a ser a exsurgência do Ourão o principal ponto de descarga do hidrossistema. Apesar da sua forma em represa poder contribuir para esta inversão relativamente aos Olhos d'Água do Anços, a sua localização a cotas inferiores àquela exsurgência (30 metros abaixo) poderá constituir a principal razão da superioridade de descarga do Ourão nos meses hidrologicamente mais secos, já que representa o ponto de saída mais baixo de toda a bordadura oeste. No mês de Outubro verifica-se uma grande oscilação, apesar de, em termos gerais, ser ainda a exsurgência do Ourão o principal exutório, já que é frequente a indigência dos caudais nos Olhos d'Água do Anços prolongar-se por este mês. Contudo, a ocorrência de um período (ainda que de apenas alguns dias) de elevados quantitativos pluviométricos, faz com que os Olhos d'Água do Anços retomem a sua função de principal ponto de descarga, evidenciando, desde logo, um sistema composto, em parte, por uma rede organizada de condutas que rapidamente encaminham a água até esta exsurgência.

Deste modo, e apesar das inversões sazonais do ponto principal de saída do hidrossistema, estas duas exsurgências (Olhos d'Água do Anços e Ourão) representam na maioria das medições estudadas (79%) mais de 90% do total de água drenada, principalmente nos meses de menor caudal (de Junho a Outubro). Embora reconheçamos que existe, particularmente no período mais chuvoso, uma ligeira sobrestimação dos valores percentuais destas duas exsurgências (dada a existência de pequenas exsurgências permanentes e outras temporárias de funcionamento invernal), a verdade é que a percentagem de escoamento na bordadura oeste do Maciço de Sicó, no conjunto do sector setentrional do hidrossistema de Sicó-Alvaiázere, estará próxima dos valores obtidos. A comprovar a pouca importância das restantes exsurgências estão os valores percentuais obtidos nesta análise para Alcamouque e Arrifana que, no conjunto, só excepcionalmente ultrapassam os 10% do total de água escoada. No caso de Alcamouque (limite leste), a sua localização a 245 m de altitude bem como as características estruturais desta área justificam o facto de ser a exsurgência de menor expressão na parte norte do hidrossistema.

A exsurgência da Arrifana (limite norte), de carácter permanente, é, juntamente com o Ourão, o ponto de descarga mais baixo de todo o hidrossistema (40 m). No entanto, significa apenas cerca de 7 a 8% do total de escoamento nos meses de Inverno e reduz-se a 4 a 5%

83

na estação seca, chegando mesmo a representar menos de 2% em Setembro, mês em que o seu caudal não ultrapassa os 30 l/s (0,03 m³/s). A explicação para esta diminuta importância relativa reside, antes de mais, na sua menor área de recarga, caracterizada por declives moderados a acentuados (bastante superiores aos da área de recarga das exsurgências do vale do rio Anços), o que não favorece a infiltração. Para além disso, e apesar da inclinação das camadas nesta área, grosso modo, para noroeste, não existem "corredores" de origem estrutural, que promovam a condução privilegiada da água para esta exsurgência (à semelhança, por exemplo, do vale do Poio e da depressão das Ereiras para os Olhos d'Água do Anços e das depressões do Furadouro e de Tapéus para o Ourão).

II. Caracterização litológica e morfo-estrutural

1. As características gerais do relevo

O hidrossistema cársico de Degracias-Sicó corresponde, como vimos, à metade setentrional do hidrossistema cársico de Sicó-Alvaiázere e à quase totalidade do Maciço Calcário de Sicó, um conjunto de relevos que se salienta na topografia regional e que compreende as Serras de Sicó e do Rabaçal e o Planalto de Degracias-Alvorge. Os pontos mais elevados da área em estudo localizam-se no topo da Serra de Sicó (553 m) e da Serra do Rabaçal (532 m), encontrando-se estas serras separadas por uma superfície irregular (Planalto de Degracias-Alvorge), que se desenvolve a cotas entre os 280 e os 350 m, existindo apenas alguns pequenos relevos salientes (*hums*) que atingem quase os 400 m (Crasto – 393 m; Cotas – 387 m) – Figura I.II.II.1A. A incisão quaternária das linhas de água e a acção erosiva cársica foram responsáveis pela existência, no interior desta área planáltica, de áreas mais baixas com configuração linear correspondendo a fundos de vale com altitudes inferiores a 250 m, caso de Fonte da Pedra e Vale da Mata, a montante do Vale do Poio. Este encaixe, aproveitando linhas de fragilidade tectónica traduz-se, em termos morfológicos, por vales e valeiros de fractura onde os declives são extremamente acentuados (casos do Vale do Poio ou dos valeiros que cortam transversalmente a Serra do Rabaçal) – Figura I.II.II.1B.

As maiores altitudes do Planalto ocorrem na bordadura ocidental, salientando-se, de norte para sul, Cabeça dos Crutos (373 m), Estrela (395 m), Corte (410 m) e Cabeço da Pena Redonda (412 m). O soerguimento da frente oeste do Maciço Calcário é também responsável por aqui se localizarem os declives mais acentuados da área em estudo, destacando-se a escarpa da Sra. da Estela, em alguns sectores praticamente vertical.

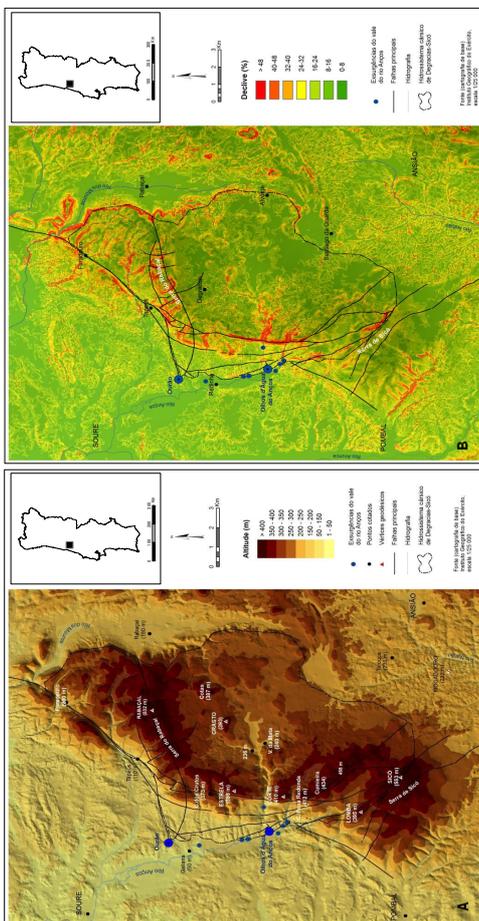


Figura 1.11.1.1 – Mapa hipsométrico (A) e mapa de declives (B) da área em estudo e região envolvente com representação dos principais alinhamentos tectónicos que afectam o hidrossistema cársico de Degracias-Sicó

85

O sector mais setentrional da área em estudo – a norte da Serra do Rabaçal – caracteriza-se por uma diminuição progressiva da altitude para norte, desde o topo da Serra do Rabaçal (532 m) até ao Furadouro (200-220 m). O alinhamento Furadouro – Tapéus, (limite norte da área em estudo) caracteriza-se por altitudes muito mais baixas (cerca de 100-110 m em Tapéus) correspondendo a um amplo *graben*, como veremos mais adiante.

Em termos de declive, os valores mais acentuados, nesta área, ocorrem ao longo de vales, actualmente secos, que testemunham a referida instalação quaternária de uma rede de drenagem e que, em alguns pontos, resultou em vertentes muito íngremes. De destacar também o elevado declive da vertente setentrional da Serra do Rabaçal, interpretada como sendo uma escarpa de falha e que corresponde ao flanco setentrional do anticlinal que constitui esta serra.

Na parte meridional da área em estudo, a tectónica é também responsável pelas áreas mais elevadas – a Serra de Sicó e os relevos que se alinham um pouco a norte – sendo estes últimos o prolongamento, para sul, da bordadura oeste soerguida, conferindo à topografia características de uma ampla bacia. Entre estes relevos e a Serra de Sicó, de salientar uma área mais baixa e de declives suaves (inferiores a 16%), que corresponde ao abatimento das Ereiras. O sistema de falhas de orientação NW – SE, que corta longitudinalmente a Serra de Sicó, incute-lhe uma forte assimetria morfológica, com a vertente nordeste a corresponder a uma complexa escarpa de falha com declives muito acentuados enquanto a vertente sul e sudoeste (passagem progressiva para os calcários margosos e margas do Malm) se caracteriza por declives baixos a moderados (8% a 24%), pontuada apenas por declives acentuados em alguns valeiros de fractura.

No limite leste e nordeste da área em estudo regista-se um importante desnível altitudinal (cerca de 150 m) entre o Planalto de Degracias-Alvorge e o fundo da depressão do Rabaçal, correspondendo à passagem dos calcários margosos do Aaleniano (no limite do Planalto) para as margas liásicas, mais freáveis, o que configura um relevo de tipo *cuesta*, com declives muito acentuados na sua frente (superiores a 48%).

As áreas que rodeiam o Maciço Calcário encontram-se topograficamente muito abaixo, caracterizando-se por altitudes que vão desde os 30-40 m aos 150 m a oeste (Bacia hidrográfica do rio Arunca), dos 170 aos 200 m a leste e nordeste (Depressão do Rabaçal) e dos 200 aos 250 m a sudeste (cabeceiras da bacia hidrográfica do rio Nabão). São, portanto, áreas baixas e relativamente aplanadas (declives até 16%), com os fundos de vale muito planos (declive até 8%) e apenas alguns locais pontualmente mais declivosos coincidentes com vales mais encaixados, particularmente na área das cabeceiras do rio Nabão, talhados em arenitos do Cretácico inferior.

Um dos aspectos a salientar em termos morfológicos, pela interferência na dinâmica de recarga do hidrossistema, é o carácter aplanado de grande parte do Planalto de Degracias-

Alvorço, favorecendo a infiltração, aspecto que, conjugado com as características lito-estruturais e os retoques cársicos desta área, vai promover a entrada de uma enorme quantidade de água para o domínio subterrâneo.

2. A litologia e a evolução paleogeográfica: breve apresentação⁹

O hidrossistema cársico de Degracias-Sicó corresponde, no essencial, a calcários puros e compactos do Jurássico médio (Batoniano e Bajociano) bastante carsificados, enquadados na base por calcários margosos do Aaleniano (de permeabilidade mais reduzida) e, superiormente, pelo Oxfordiano (com características progressivamente mais margosas) – Figura I.II.II.2. Estas características litológicas conferem-lhe uma relativa individualização, dados os condicionamentos impostos à circulação subterrânea pelos materiais de carácter margoso, de muito menor permeabilidade.

A área em estudo abrange uma parte considerável do conjunto das ‘Serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere’, afloramentos do Jurássico médio que se inserem na sub-zona setentrional da Bacia Lusitânica. Em termos gerais, pode resumir-se a sucessão litológica que compõe este hidrossistema (e algumas áreas contíguas) da seguinte forma (dos materiais mais recentes para os mais antigos):

- (i) arenitos mais ou menos argilosos, muito finos a grosseiros, argilas arenosas e grés (Cretácico inferior – Arenitos do Carrascal¹⁰) que, constituindo manchas pouco extensas, cobrem os materiais do Jurássico. Nas áreas de afloramentos de calcários puros do Dogger, estes materiais preenchem as depressões da morfologia cársica neles desenvolvidas;
- (ii) calcários margosos, margas, calcários detríticos do Jurássico superior (Camadas de Montejuento e de Cabaços), que afloram a sul e sudoeste;
- (iii) calcários de grão fino, por vezes compactos, mais ou menos fracturados, calcários cristalinos, calcários sublitográficos por vezes maciços, calcários com nódulos de sílex, calcários oolíticos e pseudoolíticos, calcários de grão fino dolomíticos, calcários pisolíticos do Jurássico médio (Batoniano e Bajociano), que constituem a estrutura do hidrossistema;

⁹ Devido à diversidade litológica desta região e à complexidade da sua evolução lito-estrutural, apenas nos centraremos na caracterização dos materiais que constituem a área em estudo (e áreas contíguas) e dos processos que os afectaram. Análises mais aprofundadas e completas sobre as características litológicas e morfo-estruturais desta região podem ser encontradas, por exemplo, em Crispim (1986), Cunha (1988), Azerêdo *et al.* (2003) e Martins (2007), tendo este último procedido à inventariação dos trabalhos geológicos e geomorfológicos efectuados nesta região.

¹⁰ Arenitos do Carrascal = Arenitos da Figueira da Foz (Dinis, 2000).

87

- (iv) calcários margosos muito compactos, margas e calcários sublitográficos da base do Jurássico médio (Aaleniano), que afloram a leste.

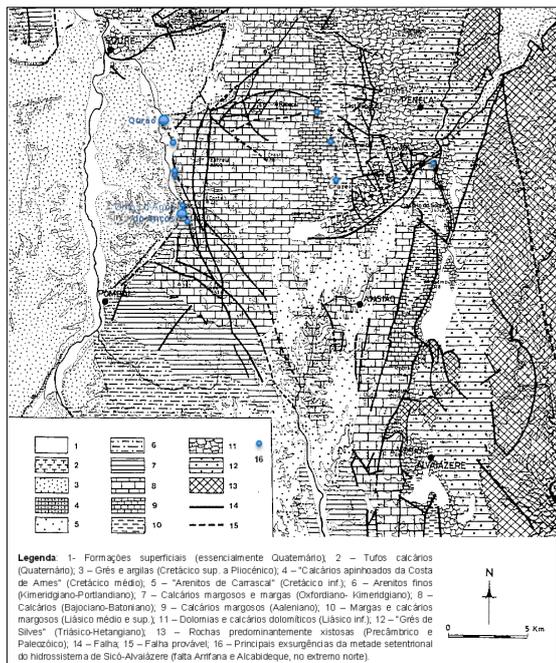


Figura I.II.II.2 – Esboço litológico e tectónico da região onde se insere a área de estudo com localização das principais exsurgências da parte setentrional do hidrossistema Sicó-Alvaiázere
Fonte: Cunha (1988), com modificações

Em termos de evolução lito-estratigráfica, no Jurássico médio as condições paleogeográficas seriam francamente marinhas como comprovam as formações calcárias (calcários micríticos, bioclásticos, oolíticos), compactas e espessas, presentes na área de estudo e

que são responsáveis pelas maiores elevações da região. A base do Jurássico médio (Aaleniano) marca a transição de uma sedimentação mais argilosa a uma sedimentação em camadas mais calcárias e espessas. Consequentemente, do ponto de vista litológico, este andar apresenta ainda um carácter margoso, mas com claro aumento da espessura dos calcários margosos e a presença frequente de camadas calcárias (Cunha, 1988), o que os coloca, topograficamente, numa posição superior em relação às depressões calcomargosas liásicas (tal como ocorre no limite leste da área em estudo). A sua espessura apresenta variação regional, sendo de 50 a 60 m em Condeixa-a-Nova e de 35 a 45 m em Alvaiázere (Martins, 2007).

Os andares do Bajociano e do Batoniano, apresentando grande dificuldade de separação, são representados por uma série espessa de calcários puros e compactos que nesta região se designam por **Formação de Degracias** e **Formação de Sicó**. No seu conjunto, estes dois andares têm uma espessura de cerca de 270 m, sendo os primeiros 220 m constituídos por calcários do Bajociano¹¹. Ainda nesta região, o Batoniano chega a apresentar 150 m de calcários puros, calcicliásticos, oolíticos ou sublitográficos (Martins, 2007). Estes calcários bajocianos resultam de uma sedimentação calma e monótona, num período de generalizada tendência regressiva relativa, ocorrendo em sistema de rampa carbonatada em clara progradação sob condições de relativa estabilidade tectónica, taxa de subsidência baixa e relativamente homogénea; tendência de subida eustática do nível do mar, topografia suave e uniforme e clima subtropical (Azerêdo *et al.*, 2003). Ainda segundo os mesmos autores, "o sistema deposicional em rampa carbonatada iniciado no Liásico, não vai apenas manter-se, durante o Dogger, mas evoluir para uma rampa de alta energia e adquirir a sua máxima expressão". Na região em estudo, este andar está relativamente bem representado através da Formação de Degracias (Azerêdo *et al.*, 2003, referindo um longo conjunto de estudos).

O Batoniano marca, efectivamente, a expressão máxima da rampa de alta energia, consubstanciando uma tendência regressiva com a deposição de fácies progressivamente menos profundas. Estas paleocondições deposicionais traduzem-se em espessuras de centenas de metros de calcários gerados em ambientes de alta energia – ilhas barreira (calcários calcicliásticos maciços, calcários oolíticos e bioclásticos com estratificação oblíqua, etc), ambientes lagunares e perimareais (calcários micríticos e oncolíticos, dismicrites, etc) – Azerêdo *et al.* (2003). As formações carbonatadas originadas durante o Batoniano correspondem na área de estudo à Formação de Sicó, que constitui grande parte do hidrossistema em estudo.

¹¹ Resultados de um corte no Vale da Grota, no flanco norte da Serra do Rabaçal.

Estes calcários puros (embora profundamente diaclasados) constituem os relevos mais salientes da região, com uma topografia bastante acidentada, observando-se escarpas de falha originadas por levantamento tectónico. Devido ao seu carácter muito pouco argiloso e à sua elevada afectação pela tectónica (e consequente processo de alargamento das fracturas por processo de dissolução), estes calcários possuem uma elevada permeabilidade (secundária), constituindo o corpo rochoso, no qual se desenvolve a rede subterrânea de drenagem e se localiza "quase toda a gama de formas cársicas, superficiais e de profundidade, existentes na área em estudo" (Cunha, 1988).

A passagem do Dogger para o Malm é marcada por descontinuidade de características, verificando-se, na área em estudo, um hiato considerável, pois os depósitos mais antigos do Malm (**Formação de Cabaços**) assentam directamente sobre os níveis do Batoniano superior. Esta lacuna terá correspondido, na área em estudo, a uma emersão com erosão significativa, atestada pela discordância entre os calcários do Dogger e as margas e calcários margosos do Oxfordiano (Cunha, 1988).

O Jurássico superior é marcado por uma nova fase de deposição marinha resultante de uma nova fase de transgressão (Ribeiro *et al.*, 1979). A comprovação desta fase está nas **Camadas de Montejunto**, série oxfordiana composta por calcários, calcários margosos e margas, numa alternância relativamente rítmica, com espessura até 180 m. Esta formação surge na região em estudo associada, cartograficamente, à Formação de Cabaços e bordeja, a sul, o Maciço de Sicó. Assentando sobre as Camadas de Montejunto, encontram-se as **Camadas de Abadia** (Kimmeridgiano inferior) de espessura até 50 m, sendo compostas por arenitos argilosos com intercalações de argilas e de margas, existindo também bancadas de calcários margosos ou gresosos (Manupella *et al.*, 1978), testemunho do carácter ainda regressivo do final do Jurássico superior.

Na transição do Jurássico superior para o Cretácico inferior, a fase regressiva mantém-se, levando à emersão de uma grande parte da Bacia Lusitaniana, ao mesmo tempo que se acentuam os movimentos tectónicos provocando não só uma forte exposição aos agentes morfogenéticos, originando uma intensa carsificação, como também a fracturação dos materiais até então depositados.

O Cretácico inferior encontra-se muito bem representado nesta região mediante extensas manchas de **Arenitos do Carrascal**, formação gresoconglomerática, de origem continental, que se estende sobretudo para sul e sudeste (e um pouco para ocidente) da área em estudo, neste último quadrante contactando com os afloramentos do Jurássico através de falha ou de ligeira discordância angular. A cobertura cretácica dos afloramentos do Jurássico é particularmente desenvolvida a sul e sudeste da área em estudo (nas cabeceiras da bacia do rio Nabão e na depressão de Ansião). Trata-se de espessos depósitos (dezenas a duas centenas de metros segundo Teixeira *et al.*, 1968) constituídos

essencialmente por arenitos argilosos, grés e argilas intercalados por importantes cascalheiras de calhaus rolados. No interior da área em estudo, estes materiais encontram-se, actualmente, em pequenos retalhos, preenchendo depressões cársicas, mas terão já soterrado um carso significativamente desenvolvido nos calcários do Dogger, o que leva Cunha (1988) a considerar esta formação como um importante marco na história geomorfológica desta região. Esses retalhos no interior das serras e planaltos calcários corresponderão ao que resta dessa antiga cobertura (sobre os calcários jurássicos) progressivamente desmantelada pelo soerguimento do Maciço Calcário e pelas sucessivas fases erosivas durante o Terciário e o Quaternário, processo que tem contribuído para a exumação de formas cársicas muito antigas.

3. A tectónica e as unidades morfo-estruturais

Em termos estruturais, na região onde se localiza a área em estudo verifica-se uma disposição meridiana, em bandas paralelas, dos afloramentos mesozóicos, os quais acompanham o grande acidente que limita, a ocidente, o Maciço Hespérico (falha Porto-Tomar). Esta disposição geral dos afloramentos é perturbada por um conjunto de falhas e fracturas com diferentes orientações, originadas por uma tectónica extremamente complexa, com reflexos na topografia, e que se encontra relacionada com os materiais mesozóicos, mas também com a herança da tectónica hercínica (Ribeiro *et al.*, 1979). Segundo estes autores, a estrutura actual do Maciço de Sicó é condicionada pelos acidentes tardi-hercínicos que afectaram o Soco e cuja reactivação influenciou a cobertura mesozóica.

A tectónica é essencialmente de fracturação, condicionada principalmente pelos movimentos da Orogenia Alpina que provocaram a reactivação de acidentes tardi-hercínicos, sendo, por isso, reconhecidas e visíveis nas formações mesozóicas as principais direcções da fracturação tardi-hercínica (N-S; ENE-WSW; NNE-SSW; NE-SW) - Figura I.II.II.2. Deste modo, os principais alinhamentos tectónicos que afectam o Maciço Calcário de Sicó (parte setentrional do alinhamento de relevos salientes de Condeixa-Sicó-Alvaiázere) são¹²:

(i) N – S, que limitam, a oeste, o Planalto de Degraças-Alvorge e são responsáveis pelo soerguimento da sua frente ocidental (falha da Sra. da Estrela, com soerguimento de 200 m), formando uma escadaria tectónica que marca a passagem do Planalto para o vale do rio Anços. Parece ser a direcção mais representada nesta área, acompanhando a do grande acidente Porto-Tomar e que, a partir de Albergaria-a-Velha, marca o limite ocidental do

¹² Os alinhamentos que não se encontram na área de estudo não serão aqui abordados (por exemplo os alinhamentos resultantes da tectónica diapírica).

Maciço Hespérico (Cunha, 1988). Este alinhamento configura o limite oeste da área de estudo;

(ii) NNE – SSW, direcção representada pela importante falha que limita, a leste, o alinhamento das serras do Circo, Cruto e Alconcere e imprime uma forma alongada ao *graben* de Tapeus. Este alinhamento, que constitui o limite noroeste do hidrossistema em estudo, apresenta-se como o acidente que maior significado imprime ao relevo daquela área setentrional (Cunha, 1988).

(iii) NW – SE, alinhamento que afecta fortemente a Serra de Sicó (várias falhas paralelas), sendo responsável pela imponente escarpa (cerca de 150 m de altura) que constitui a vertente nordeste desta serra. Esta orientação está também representada na falha de Degraças e em pequenas fracturas que cortam, transversalmente, a Serra do Rabaçal.

A tectónica de fracturação é, pois, responsável pelo relevo à escala regional, com a formação de um conjunto de blocos delimitados por falha e o desenvolvimento de estruturas em anticlinal e sinclinal, de que se destaca, na área em estudo, o anticlinal da Serra do Rabaçal pela posição altimétrica (532 m no ponto mais alto) e pela interferência na hidrodinâmica subterrânea devido ao seu núcleo essencialmente margoso. Em síntese, o relevo desta região “vai traduzir, nas suas grandes linhas, o jogo desta rede de fracturação e da compartimentação num complexo mosaico de blocos, por ela definido” (Cunha, 1988).

Por conseguinte, com base nesta complexa tectónica de fracturação, nos dobramentos existentes na região e nas diferentes litologias, é possível definir unidades de relevo com morfologias distintas. A definição dessas unidades morfológicas foi elaborada por Cunha (1988), que estabeleceu cinco unidades assentes em critérios litológicos e estruturais (colinas dolomíticas; depressões calco-margosas; serras calcárias; áreas marginais e áreas diapíricas) – Figura I.II.II.3. Assim, com base nos trabalhos de Cunha (1988) e de Crispim (1986), apresentamos, de forma resumida, as várias unidades morfo-estruturais da região onde se insere a área de estudo:

(i) **as colinas dolomíticas**, situadas a leste da área em estudo, estão relacionadas com o afloramento de calcários dolomíticos e dolomias da base do Liásico e têm maior extensão e significado morfológico ao longo de uma faixa com largura entre 3 e 5 Km, de orientação meridiana, a norte de Penela, imediatamente a leste da depressão do Rabaçal. Em termos morfológicos, este afloramento encontra-se saliente em relação aos materiais envolventes em resultado da sua maior resistência aos agentes e processos morfogénicos quando comparado com os materiais mais brandos que o ladeiam, sendo a topografia, nesta unidade, dominada pelos retalhos aplanados que encimam ou truncam estas colinas numa altitude de cerca de 300 m. A morfologia dos calcários dolomíticos é determinada por uma superfície ligeiramente basculada para oeste (‘nível de Serra da Vila’ de Daveau, citada por Cunha, 1988) e um conjunto de valeiros com escassa incisão, exceptuando-se apenas

casos de aproveitamento de linhas de fragilidade tectónica, de orientação normalmente NW-SE a NNW-SSE (salvo no sector meridional), em que houve uma incisão de 50 a 70 m;

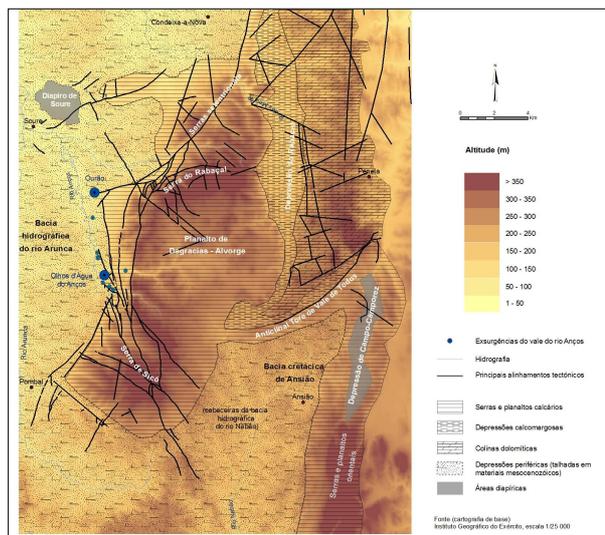


Figura I.III.1.3 – Unidades morfo-estruturais da região de Condeixa-Pombal-Ansião-Alvaiázere.
Fonte: adaptado de Cunha (1988)

(ii) **as depressões calcomargosas** correspondem a afloramentos de materiais calcomargosos do Liásico médio e superior, cujo comportamento mais brando face à erosão relativamente aos afloramentos limitrofes de calcários e dolomias, os coloca numa posição topograficamente deprimida. Devido à maior erodibilidade das margas e calcários margosos liásicos, topograficamente resultam em relevos deprimidos, em particular quando contactam com afloramentos com uma capacidade de resistência muito mais elevada, como é o caso dos calcários do Dogger, que limitam estes materiais a oeste. A principal depressão calcomargosa desta região – a depressão do Rabaçal – apresenta uma orientação de sul para norte, desde as proximidades do Alvorge até ao canhão de Conimbriga. Esta depres-

93

são, aproveitada pelo troço superior do rio dos Mouros, representa o limite oriental do hidrossistema em estudo;

(iii) **as áreas marginais** correspondem às áreas baixas que orlam o hidrossistema cársico de Degraças-Sicó a ocidente e a sudeste. Apresentam características litológicas e morfológicas bastante diferenciadas, bem como o seu contacto com a área em estudo que, no caso da bacia hidrográfica do rio Arunca, é feita por um conjunto de falhas que levantam o Maciço e, no caso das cabeceiras do rio Nabão é efectuada por uma transição litológica gradual dos calcários compactos do Dogger para os arenitos argilosos e argilas do Cretácico inferior (Arenitos do Carrascal), não se verificando a existência de acidentes tectónicos que interfiram nessa transição. A ocidente, as áreas baixas, que marginam a área de estudo constituem um conjunto de colinas que rondam os 100 a 180 m de altitude, esculpidas em materiais gresosos cenozóicos (*colinas gresosas* segundo Almeida *et al.*, 1990). Os cimos planos destas colinas correspondem a uma superfície normalmente entendida como o topo de um depósito de acumulação originado por transgressão plio-calabriana que foi sendo, durante o Quaternário, retalhada pela instalação da rede de drenagem originando vales largos, dada a baixa resistência desses materiais aos processos de erosão fluvial. A sudeste da área em estudo dá-se a passagem gradual, sem influência de acidentes tectónicos, para os terrenos gresosos do Cretácico, que assentam, em espessos depósitos, discordantemente sobre os calcários do Dogger e do Malm configurando uma depressão em forma de anfiteatro e com declive suave correspondente às cabeceiras da bacia hidrográfica do rio Nabão. A erosão fluvial decorrente da instalação da rede de drenagem, com uma orientação predominantemente N-S, recortou esses espessos depósitos detríticos do Cretácico, originando cimos que rondam os 220-230 m, havendo sectores onde esta uniformidade altitudinal sugere a existência de antigas superfícies de aplanamento;

(iv) **as áreas diapíricas** estão ligadas ao afloramento de rochas argilo-evaporíticas, muito plásticas, do Triásico superior ao Liásico inferior (tectónica diapírica), materiais globalmente designados por Margas de Dagorda. Na região, estes afloramentos ocorrem fora da área em estudo: em Soure, a noroeste, o diapiro corresponde a um acidente grosseiramente circular (com afloramento das referidas Margas de Dagorda) e em Torre de Vale de Todos, a leste, corresponde a um anticlinal segundo a orientação ENE – WSW, onde não se verifica o afloramento desses materiais, mas apenas dos calcários dolomíticos que, estratigraficamente, se lhe sobrepõem, o que provoca diferenças topográficas quando comparado com a outra área diapírica (Soure). Este comportamento diferenciado pode servir de sustentação à ideia de que, no segundo caso apresentado (na bordadura oriental da Bacia Lusitaniana), não se trata de verdadeiro diapirismo, o qual apenas se verifica quando se regista uma maior espessura das margas gipsíferas e salíferas, o que ocorreu na parte mais ocidental, tal como explica Cunha (1988);

(iv) **as serras e planaltos calcários** constituem a principal unidade morfo-estrutural da região onde se localiza a área de estudo, a qual compreende, como já vimos, duas serras e um extenso planalto formados em afloramentos do Dogger, profundamente afectados pela tectónica, aspecto testemunhado pela presença de dobramentos e, principalmente, por importantes linhas de falha com consequências na topografia. Esta unidade geomorfológica, pela sua extensão e complexidade, pode ser dividida em várias sub-unidades: serras setentrionais (serras de Condeixa); Serra do Rabaçal; Planalto de Degraças-Alvorge; Serra de Sicó; Planaltos e Serras orientais (Alvaizere)¹³. As serras setentrionais, situadas no extremo norte dos afloramentos do Dogger, configuram um alinhamento de serras correspondentes a afloramentos de calcários margosos compactos do Aaleniano, que se impõem na topografia local devido sobretudo a uma importante falha que as limita a ocidente. Este importante acidente de direcção NNE – SSW parece prolongar-se para sul, afectando a vertente oriental das serras de Alconcore, Cruto e Circo e o graben de Tapeus – Figura I.II.II.4.

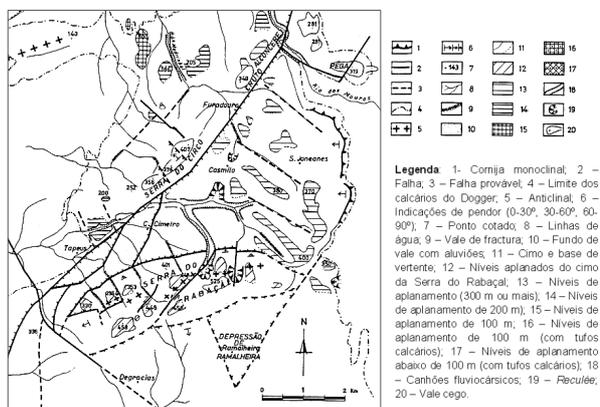


Figura I.II.II.4 – Esboço morfo-estrutural e principais aplanamentos das serras calcárias setentrionais e da Serra do Rabaçal. Fonte: Cunha (1988)

¹³ Em virtude da complexidade morfo-estrutural e das particularidades de cada uma destas sub-unidades, apenas procederemos à caracterização mais pormenorizada das que compõem o hidrossistema em estudo: as Serras do Rabaçal e de Sicó e o Planalto de Degraças-Alvorge.

Em termos hidrogeológicos, este alinhamento tectónico funciona como um 'caminho' preferencial do escoamento subterrâneo, constituindo uma barreira à circulação hipogea e, ao mesmo tempo, conduzindo a água da recarga (abundante devido à carsificação desenvolvida na superfície) até ao bordo oeste do Maciço, onde surge à superfície na exurgência do Ourão (a mais setentrional de todas as que existem no bordo ocidental) – Figura I.II.II.1 e Figura I.II.II.2. Por isso, este acidente configura o limite noroeste do hidrossistema de Degraças-Sicó.

Imediatamente a sul deste acidente encontra-se a **Serra do Rabaçal** (532 m, o segundo ponto de maior altitude desta área, a seguir à Serra de Sicó), que corresponde a um anticlinal em arco (orientação WSW – ENE, na parte ocidental, e WNW – ESE mais para oriente) em função do desenho de uma importante falha cavalgante que limita a Serra a norte, conferindo um pendor subvertical às camadas deste flanco norte. A vertente setentrional apresenta, por isso, um forte declive, podendo ser interpretada como uma escarpa de falha (Cunha, 1988), morfologia que contrasta com a vertente meridional (flanco sul do anticlinal), bastante mais suave, que desce até às depressões de origem cársica da Ramalheira, mais a leste, e da área de Degraças, mais a oeste (ambas no sopé da Serra, mas pertencendo já ao Planalto de Degraças-Alvorge). Para além do grande acidente tectónico que limita a Serra do Rabaçal a norte existe um conjunto de várias falhas transversais (direcção NW – SE) responsáveis por desligamentos que afectam a continuidade da charneira anticlinal (deslocam mais para norte os blocos do sector leste da Serra) e por movimentos verticais, verificando-se a existência de pequenos níveis aplanados abaixo da superfície culminante a cotas diferentes, indicando rejogo vertical (indo dos 330-340 m na parte ocidental a 480-490 m mais para leste).

Estas falhas encontram-se bem marcadas na topografia através de vales de fractura praticamente rectilíneos que dissecam, transversalmente, a Serra – Figura I.II.II.4. Segundo Cunha (1988) pode sintetizar-se de um modo geral a morfo-estrutura actual da Serra do Rabaçal como uma "superfície de erosão relativamente regular, agora fracturada, deslocada e ainda profundamente dissecada por valeiros de fractura". Em termos hidrogeológicos, esta serra constitui, como já referimos, uma importante barreira à circulação subterrânea devido ao seu núcleo margoso, pelo que a consideramos como uma 'linha divisória', que separa o hidrossistema em estudo numa pequena bacia setentrional que drena para a exurgência do Ourão (limitada a norte pelo grande acidente tectónico de orientação NNE – SSW) e uma extensa bacia meridional (limitada a sul pelo conjunto de falhas que afecta a Serra de Sicó) e que drena para o conjunto de exurgências temporárias e permanentes do vale do rio Anços.

Imediatamente a sul da Serra do Rabaçal, até à Serra de Sicó, estende-se uma vasta área que corresponde a uma superfície irregular que se desenvolve entre os 300 e os 350 m

e onde se salientam pequenos relevos que podem rondar os 400 m – **Planalto de Degracias-Alvorge**. Esta extensa área, que se eleva topograficamente, encontra-se bem definida a oeste, onde é limitada pela grande falha da Sra. da Estrela (de direcção N-S) que a eleva em cerca de 200 m, constituindo esta frente oeste do Planalto uma escadaria tectónica com degraus bem visíveis na topografia (devido a um conjunto de falhas de direcção meridiana) descendo até às áreas mais baixas, a oeste, onde corre o rio Anços. A leste, o limite é feito pela linha de *cuesta* desenhada nos calcários Aalenianos, que se impõem topograficamente em relação às margas toarcianas contíguas, onde se escavou uma depressão ampla, cerca de 150 m abaixo – a depressão calcomargosa do Rabaçal. Os limites ocidental e oriental correspondem, portanto, a limites estruturais: a escarpa de falha da Sra. da Estrela e o relevo de *cuesta* do sector ocidental da depressão do Rabaçal (Cunha, 1988). O limite sudeste do Planalto é o que encerra mais incerteza devido à passagem progressiva para a área das cabeceiras do rio Nabão, com diminuição gradual da altitude e sem aparente interferência da tectónica ou de processos de erosão diferencial.

A frente oeste do Planalto encontra-se basculada para leste devido ao seu levantamento pela falha da Sra. da Estrela, com consequências topográficas, verificando-se uma descida dos valores altitudinais do limite ocidental para o interior do Planalto – caso da descida da Sra. da Estrela (395 m) para Mocifas (270-280 m) em cerca de 3 Km para leste e de Corte (410 m) para Mata de Baixo (270 m), cerca de 6 Km para este. No sector oriental do Planalto encontram-se retalhos aplanados bastante bem conservados, conferindo-lhe uma maior regularidade topográfica. Esses retalhos estarão relacionados com o preenchimento de antigas formas cársicas (depressões amplas e pouco profundas decorrentes de processos de carsificação antiga e complexa) e a regularidade na superfície explicar-se-á devido a processos fluviais, fluviomarinhos e até marinhos que teriam actuado durante um tempo suficientemente longo para permitir a erosão completa da estrutura (Cunha, 1988).

Do ponto de vista hidrológico, o Planalto de Degracias-Alvorge constitui a área de recarga por excelência do hidrossistema em estudo (em particular do extenso sector meridional), drenando essa água para o exutório principal (Olhos d'Água do Anços) e para um grande número de pequenas exurgências da bordadura oeste. Em termos hidrogeomorfológicos, o levantamento e o basculamento plio-quadernários (para leste) da frente ocidental do Planalto merecem destaque devido às importantes alterações que introduziram nesta área:

(i) formação de uma ampla bacia morfo-estrutural, devido à alteração do pendor das camadas calcárias no limite ocidental, ou seja, tal como mostra a Figura I.II.II.5, a inclinação geral para oeste (testemunhada na área leste do Planalto e entre a Sra. da Estrela e o vale

97

do rio Anços), foi completamente alterada no limite ocidental (passando a pender para leste) o que promove o aumento da retenção e infiltração da água proveniente da precipitação;

(ii) descida do nível de base local com conseqüente abandono da rede de drenagem subterrânea então estabelecida e a progressiva reorganização, criando uma nova configuração dessas estruturas. O facto de ser um acontecimento geológico recente, levamos a crer que esse processo se encontra ainda em franco desenvolvimento, em particular no que diz respeito ao alargamento de fissuras e fracturas (através de processos de dissolução) e ao estabelecimento de conexões entre elas (reorganização da rede de drenagem subterrânea). Esse levantamento terá sido também responsável pelo aumento da espessura da zona epissaturada (possibilidade de maior oscilação do nível piezométrico), aspecto que poderá ser responsável por determinados comportamentos hidrogeológicos do Maciço Cársico, como veremos mais adiante;

(iii) remoção dos depósitos de cobertura no sector ocidental com a exposição da rocha-mãe calcária, extremamente fracturada, aos processos de erosão cársica, o que aumentou a infiltração, deixando a água de correr à superfície para se infiltrar e drenar subterraneamente, adquirindo em alguns locais características de infiltração concentrada (através da abertura superficial dos algares).

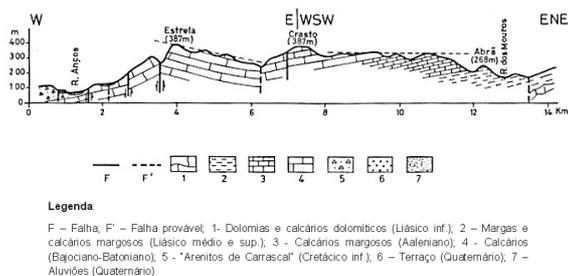
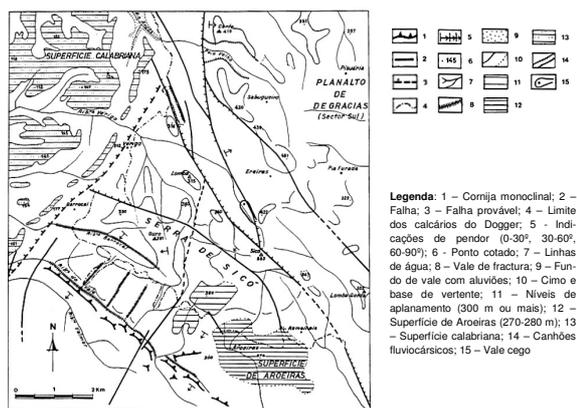


Figura I.II.II.5 – Corte geológico esquemático do Planalto de Degracias-Alvorge.
Fonte: Cunha (1988)

O Planalto de Degracias-Alvorge tem o seu limite sul na imponente escarpa de falha (cerca de 150 m) que constitui a vertente nordeste da **Serra de Sicó**, o sector mais meridional do hidrossistema em estudo e também onde se regista a maior altitude (Sicó – 553 m).

Esta serra apresenta uma forma nitidamente assimétrica em resultado de um conjunto de acidentes paralelos de direcção NW-SE e NNW-SSE, responsáveis pelo seu levantamento e basculamento para sudoeste, conferindo um carácter abrupto à vertente nordeste e um declive muito mais suave à vertente voltada a sudoeste. Esta vertente corresponde a uma estrutura monoclinial de fraco pendor (10° a 15°) virada para sudoeste, onde se dá a passagem dos calcários batonianos para os calcários margosos do Oxfordiano. Contudo, esta vertente também se encontra bastante fracturada, sendo afectada por acidentes de direcção NW-SE, paralelos à importante falha que origina e afecta longitudinalmente a escarpa nordeste e por acidentes de direcção N-S e NNE-SSW. Estes últimos são responsáveis pelo traçado rígido dos valesiros secos e pela linha de fragilidade que ocorre entre Sicó e Ouro, ao longo da qual se instalou um conjunto de dolinas embutidas, que mantêm um nítido alinhamento estrutural (Cunha, 1988). As vertentes noroeste e sudeste apresentam também um grande contraste, com a primeira a dever-se a um provável acidente tectónico entre Pombal e a Estrada de Anços, que constituirá o prolongamento do sector ocidental da falha da Nazaré. A vertente sudeste, talhada principalmente nos calcários margosos do Malm, faz a passagem progressiva e gradual para a bacia de Ansião sem ressaltos de origem tectónica ou relevos originados por erosão diferencial – Figura I.II.II.6.



Legenda: 1 – Cornija monoclinial; 2 – Falha; 3 – Falha provável; 4 – Limite dos calcários do Dogger; 5 - Indicações de pendor (0-30°, 30-60°, 60-90°); 6 - Ponto cotado; 7 – Linhas de água; 8 – Vale de fractura; 9 – Fundo de vale com aluviões; 10 – Cimo e base de vertente; 11 – Níveis de aplanamento (300 m ou mais); 12 – Superfície de Aroeiras (270-280 m); 13 – Superfície calabariana; 14 – Canhões flúviocársicos; 15 – Vale cego

Figura I.II.II.6 – Esboço morfo-estrutural e principais aplanamentos da Serra de Sicó. Fonte: Cunha (1988)

Relativamente à função hidrogeológica da Serra de Sicó, parece-nos que apenas o conjunto de acidentes tectónicos que levantam a vertente nordeste terá influência na hidrodinâmica do Maciço Cársico, já que este alinhamento, marcado topograficamente na depressão alongada das Ereiras, constitui uma zona privilegiada de condução subterrânea da água até às exsurgências da bordadura ocidental. O sector sudoeste da Serra parece-nos já não drenar para aquelas exsurgências mas sim para sul, onde existem algumas pequenas exsurgências temporárias.

4. Formas cársicas de profundidade¹⁴: ocorrência e distribuição espacial

É nas serras e planaltos calcários, correspondendo aos afloramentos de calcários puros mas profundamente fracturados do Dogger (Bajociano e Batoniano, principalmente) que se encontra a quase totalidade das formas cársicas (de superfície e de profundidade), as quais exercem uma forte influência na recarga e na circulação da água no hidrossistema em estudo. De entre estas formas, os algares são os que mais contribuirão para a recarga do hidrossistema, dado que, embora pertençam ao domínio do endocarso, a sua abertura na superfície promove uma maior e mais rápida entrada da água para o meio subterrâneo, onde a rede de drenagem, constituída por galerias, fracturas e fissuras alargadas por dissolução a transporta até às exsurgências. Por vezes, os algares chegam mesmo a constituir pontos onde ocorre a entrada concentrada de água, o que interfere no tempo e no modo de resposta das exsurgências, como veremos mais à frente neste trabalho.

No que se refere à distribuição espacial das formas cársicas de profundidade nas serras e planaltos calcários (Figura I.II.II.7), verifica-se uma concentração muito nítida ao longo do bordo ocidental do Planalto de Degracias-Alvorge, junto à vertente setentrional da Serra de Sicó e na Serra de Alvaiázere, esta última fora da área em estudo. As extensas áreas onde praticamente não se registam formas cársicas, em particular na Serra do Rabaçal, mas principalmente no sector central e oriental do Planalto de Degracias-Alvorge poderão ser explicadas pelas características lito-estruturais menos favoráveis à carsificação (Cunha, 1988), pelos depósitos cretácicos que cobrem estes sectores do Planalto e, ainda, pela escassa ou mesmo inexistente divulgação de possíveis resultados aí obtidos por espeleólogos. A concentração de formas cársicas de profundidade no sector ocidental do Planalto Degracias-Alvorge e na Serra de Sicó poderão, pois, justificar-se por: (i) maior espessura dos calcários puros (carsificáveis) neste sector oeste, em resultado da inclinação geral das camadas para ocidente e do consequente aumento da distância entre a superfície

¹⁴ Apenas nos debruçaremos sobre as formas cársicas de profundidade, uma vez que são aquelas que interferem decisivamente na hidrodinâmica da área em estudo, em particular no processo de recarga e circulação subterrânea.

e as margas liásicas (que subjazem aos calcários puros), as quais condicionam muito a circulação profunda pela sua baixa permeabilidade; (ii) a elevada fracturação destas duas áreas em resultado da existência de grandes alinhamentos tectónicos (falhamento meridiano na frente oeste do Planalto e de NW – SE na vertente nordeste da Serra de Sicó), o que favorece o processo de infiltração e consequente erosão mecânica e química dos calcários do Dogger¹⁵; (iii) soerguimento destas áreas calcárias (pela referida fracturação meridiana) que obrigou a uma reestruturação da rede de drenagem, com desenvolvimento em profundidade das cavidades e galerias subterrâneas. A existência desta paleodrenagem é comprovada pela exurgência do Malhadoiro, situada no enfiamento dos Olhos d'Água do Anços, mas bastante mais acima, a 140 m de altitude (contra os 70 m dos Olhos d'Água do Anços).

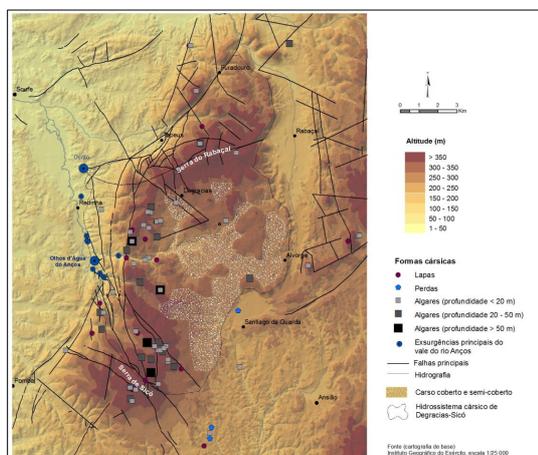


Figura I.II.II.7 – Formas cársicas de profundidade na área de estudo e região envolvente e áreas cobertas total ou parcialmente por depósitos (carso coberto e semi-coberto) na área de estudo

Esta breve apresentação e caracterização da repartição espacial de formas endocársicas (em particular dos algares, os quais influenciam decisivamente a recarga do hidrossistema) bem como a caracterização litológica e estrutural da região onde se insere o

¹⁵ Cunha (1988) mostra, a partir de duas áreas-amostra, a forte relação entre as principais direcções das fracturas à superfície e o desenvolvimento das cavidades em profundidade.

hidrossistema cársico de Degraças-Sicó permitem antever, em termos hidrológicos, a existência de diferenças espaciais consideráveis no processo de recarga. Assim: (i) a presença de extensas áreas de carso descoberto e o elevado número de formas cársicas na área de recarga do hidrossistema (em particular no sector oeste e sul) favorecem a infiltração rápida e com carácter pontualmente concentrado (através das aberturas dos algares); (ii) a existência de importantes retalhos de materiais gresosos e argilosos que se mantiveram nos fundos de vale e no interior de áreas topograficamente deprimidas (carso coberto e semi-coberto, em particular no sector centro-leste), os quais promovem o retardamento do processo de infiltração devido às suas características (apreciável teor em argila) e à sua espessura. Esta última característica, embora não tendo sido possível quantificá-la (medições no local), crê-se que possa atingir alguns metros, facto deduzido a partir dos usos do solo nesta área, onde ocorrem manchas extensas de vegetação arbórea bem desenvolvida (matas de pinheiro e eucalipto) e terrenos agricultados – Figura I.II.II.8.

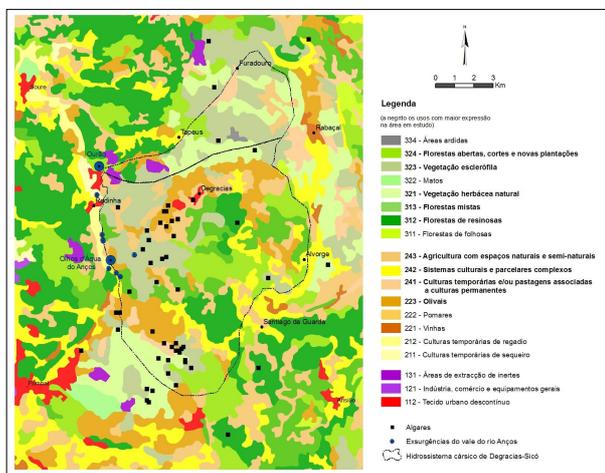


Figura I.II.II.8 – Mapa dos usos do solo na área em estudo e região envolvente a partir de Corine Land Cover (2006) com representação da localização das formas cársicas que favorecem a infiltração (algares, através da sua abertura superficial)

CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DA REGIÃO ONDE SE LOCALIZA O HIDROSSISTEMA CÁRSICO DE DEGRACIAS-SICÓ

1. A precipitação¹ como *input*

1.1. Os dados: temporalidade e espacialidade

Na região onde se insere a área em estudo (hidrossistema cársico de Degracias-Sicó), os dados de precipitação existentes provêm, sobretudo, do antigo Instituto da Água (actualmente diluído na Agência Portuguesa do Ambiente), que os disponibiliza através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) e provêm, também, do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA, ex-Instituto de Meteorologia). Contudo, a escassez de estações desta última entidade e o facto dessa informação ter de ser paga, fez com que optássemos pela utilização apenas das estações pertencentes ao SNIRH, bastante mais implantadas e com disponibilização *on-line* dos registos, de forma gratuita. Acresce, ainda, a existência de uma estação udográfica do SNIRH no interior da área de estudo (estação de Degracias), com um registo contínuo de cerca de 30 anos, iniciado em 1979/1980 e apenas com interrupções a partir de 2008/2009; o que não acontece com a

¹ Neste ponto do trabalho, há que proceder a um importante esclarecimento terminológico e conceptual: ao longo de todo este estudo será utilizado, preferencialmente, o termo *precipitação* para designar os hidrometeoros que ocorrem na área de estudo e na região envolvente e que constituem a recarga dos vários hidrossistemas que aí existem. No entanto, pelo conhecimento que possuímos desta região, podemos afirmar que o termo *precipitação* corresponde, quase integralmente, a *pluviosidade*, já que os restantes hidrometeoros não possuem qualquer significado, podendo apenas ocorrer, pontualmente, episódios de granizo, sendo a neve, por exemplo, extremamente rara e, por isso, totalmente desprezável. Deste modo, o termo *precipitação* será, por vezes, substituído pelos termos *chuva*, *chuvada*, *episódio pluvioso*/*chuvoso*, *pluviosidade*.

103

rede do IPMA, que apenas possui estações exteriores à área de estudo, sendo as mais próximas as de Coimbra (Aeródromo), Ansião e Leiria.

Com base na informação existente, e fornecida gratuitamente pelo SNIRH, fez-se a caracterização do regime de precipitação não só na área de estudo, mas também na região circundante, para assim se conseguir uma perspectiva temporal e, principalmente, espacial da distribuição da precipitação em toda esta região.

Para além disso, o enquadramento e a comparação que faremos na parte final deste estudo sobre o regime hidrológico dos Olhos d'Água do Anços e do rio Arunca exigem uma maior abrangência territorial das estações a considerar (Quadro I.II.III.1 e Figura I.II.III.1).

Quadro I.II.III.1 – As estações utilizadas na caracterização pluviométrica e as características das respectivas séries, disponibilizadas pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH)

	Altitude (m)	Tipo	Série	Lacuna na série	Total anos seguidos
Bacia hidrográfica do Mondego					
DEGRACIAS 13F02UG	326	Udográfica	1979/80 - 2006/07	-	28
POMBAL 14F01UG	95	Udográfica*	1942/43 - 2006/07	-	65
SOURE 13F01G	18	Udográfica*	1932/33 - 2006/07	-	75
PENELA 13G01UG	253	Udográfica	1931/32 - 2007/08	1997/98-2000/01	66
CONDEXA 13G02UG	90	Udográfica	1980/81 - 2008/09	1998/99-2000/01	18
CLIMEEIRA 14G04UG	320	Udográfica	1979/80 - 2007/08	1997/98-2000/01	18
LOURIÇAL 13E02UG	37	Udográfica	1979/80 - 2007/08	1997/98-2001/02	18
REVELES 13E01UG	112	Udográfica	1979/80 - 2007/08	1997/98-2003/04	18
SANTO VARÃO 12F02C	15	Climatológica	1962/63 - 2006/07	1999/00-2000/01	37
VALE SALGUEIRO 14E03UG	121	Udográfica	1980/81 - 2008/09	1997/98-2000/01	17
ALBERGARIA DOS DOZE 15F01UG	249	Udográfica	1979/80 - 2007/08	1997/98-2002/03	17
Bacia hidrográfica do Tejo					
ALVAIAZERE 15G01UG	335	Udográfica*	1931/32 - 2006/07	-	76
ANSIÃO 14G01C	217	Climatológica	1979/80 - 2004/05	1995/96-1998/99	16
CAXARIAS 15F02C	132	Climatológica	1979/80 - 2006/07	-	28
FREIXIANDA 15G03UG	116	Udográfica	1943/44 - 2006/07	-	64

* Com telemetria

Deste modo, para a caracterização da precipitação na região onde se localiza a área em estudo baseamo-nos nas séries mais próximas que apresentavam maior longevidade e

menos hiatos (em particular Pombal e Soure) e, no caso específico do hidrossistema em estudo, na série de registos da estação de Degracias.

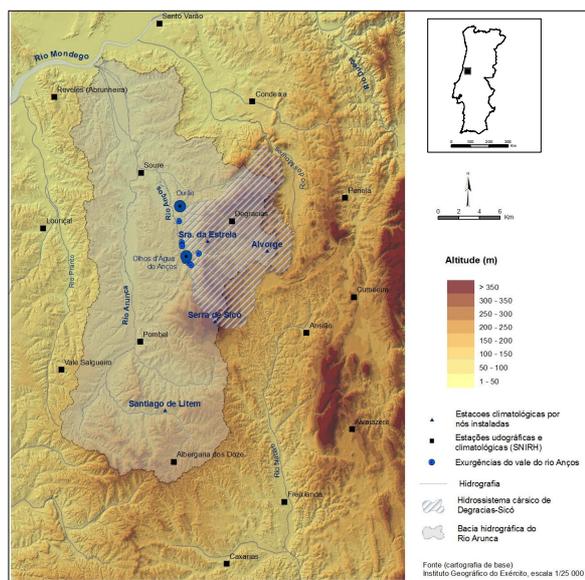


Figura I.II.III.1 – As estações udoográficas e climatológicas utilizadas na caracterização pluviométrica da região onde se localiza a área de estudo, pertencentes ao Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), e as estações climatológicas por nós instaladas

No entanto, para conseguirmos obter uma perspectiva o mais real possível da distribuição espacial da precipitação nesta região fomos obrigados a considerar também estações com mais lacunas e com séries mais curtas do que o recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (30 anos). Esta situação é, aliás, bastante frequente na região, com destaque para as estações pertencentes à bacia hidrográfica do Mondego, onde as lacunas são bastantes consideráveis. Por esta razão, deparámo-nos, desde logo, com o

105

problema da dimensão das séries ser bastante desigual, com cerca de metade das estações a não ultrapassar os 17 ou 18 anos de registos contínuos (Quadro I.II.III.1), situação relacionada, em vários casos, com o fim dos registos analógicos, o que significou uma longa interrupção, sem informação, até à instalação da rede automática.

A exiguidade de muitas das séries em estações próximas da área de estudo levou a que tivéssemos a necessidade de utilizar informação udométrica de algumas estações mais afastadas, cujas séries eram fiáveis e bastante mais longas. Foi o caso de algumas estações já na bacia hidrográfica do rio Tejo, como Alvaiázere (76 anos de registos continuados), Freixianda (64 anos) e Penela, na bacia do Mondego (70 anos). Procurámos, assim, que a área em estudo ficasse especialmente englobada numa região mais vasta, de modo a que se obtivesse uma perspectiva espacial, simultaneamente, de conjunto (para a região) e de enquadramento (área de estudo).

1.2. As séries udométricas: homogeneidade, consistência e preenchimento de hiatos

Depois de efectuada a inventariação das estações udoográficas e climatológicas procedeu-se à verificação da homogeneidade e consistência dos respectivos registos. A aplicação destes testes justifica-se por não se conseguir visualizar directamente nas séries de dados algumas situações anómalas ocorridas nas estações, como sejam a mudança de localização, alteração no método de observação, nas condições do instrumento ou até mesmo alterações nas imediações (construção de edifícios, crescimentos de árvores, entre outros).

O método utilizado foi o Ensaio dos Valores Duplamente Acumulados que testa a homogeneidade de uma série de registos de uma estação através da construção da Curva de Dupla Massa na qual são comparados os registos da precipitação anual ou mensal acumulada de uma estação (em ordenadas) com os valores acumulados médios de um conjunto de estações situadas na área envolvente (em abcissas), influenciadas por condições meteorológicas semelhantes. Outra das formas de que se reveste este teste é a comparação da precipitação acumulada de uma estação tida como de referência com a precipitação acumulada de uma outra estação, cuja homogeneidade da série se pretenda analisar (Ventura, 1994; Ramos, 1994).

Em qualquer um dos formatos adoptados, estes testes, amplamente aplicados, são particularmente interessantes pelo facto da sua forma, em gráfico, permitir detectar imediatamente qualquer mudança no alinhamento rectilíneo que traduz a relação entre os dois grupos de valores acumulados, evidenciando que algo de anormal ocorreu nessa série de

registos. A linearidade do gráfico permite, portanto, concluir que os registos dessa estação (colocada em ordenadas) são consistentes.

No entanto, podem ocorrer algumas mudanças no declive da recta resultantes, por exemplo, da aleatoriedade dos fenómenos meteorológicos. Contudo, essa variação na inclinação da recta só pode ser considerada importante se persistir por mais de cinco anos (Ramos, 1994).

No presente estudo testámos as séries de dados da estação de Degraças e de estações circunvizinhas com séries longas (Pombal, Soure, Penela, Alvaizere, Freixianda e Caxarias) – Figura I.II.III.1 e Figura I.II.III.2. Comparámos, assim, os valores de precipitação anual acumulada de cada uma destas estações com a precipitação anual acumulada média de três ou quatro outras estações próximas.

Esta tarefa baseou-se nos seguintes pressupostos metodológicos: (i) a série de cada estação seria comparada com a média das séries de três ou quatro estações circunvizinhas, localizadas em diferentes quadrantes (Reis, 2006); (ii) essas estações de comparação deveriam ter uma extensão temporal de registos relativamente extensa e temporalmente coincidente com a totalidade, ou maior parte, da série da estação em teste. No entanto, este último pressuposto conduziu a que tivéssemos de restringir as séries a cerca de 17-20 anos (período simultâneo com registos) após vários testes sem sucesso entre séries com dimensões muito desiguais (Quadro I.II.III.1).

Estes testes recaíram, assim, sobre os registos que se estendem de 1979/1980 a 1996/1997, o que se justifica pelos vários anos consecutivos sem registos na maior parte das estações e pela alteração no tipo de registo (passagem do sistema analógico para o digital) ocorrido nos primeiros anos do milénio. Neste novo tipo de registo, verificámos sucessivas e frequentes lacunas, praticamente em todas as estações consideradas, pelo que optámos pela exclusão desse período na aplicação dos testes.

Os ensaios revelaram não existir nenhuma anomalia que colocasse em causa a consistência das séries de precipitação das estações. Apenas no caso da estação de Soure, o teste parece evidenciar alguma irregularidade, pela oscilação dos pontos em torno da linha de referência com ligeira alteração no alinhamento rectilíneo dos pontos. No entanto, tal situação não se manteve por mais de cinco anos, ao mesmo tempo que não se conhece nenhuma situação anormal ocorrida com esta estação, pelo que considerámos essa série igualmente consistente (Figura I.II.III.2).

Confirmada a homogeneidade e consistência das séries de dados da precipitação, procedemos à resolução de um dos principais problemas dessas séries – os constantes

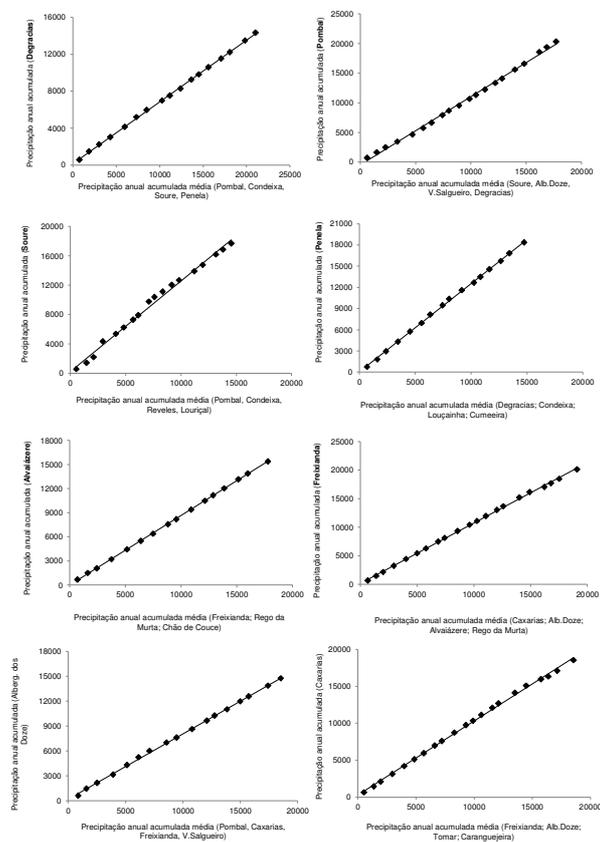


Figura I.II.III.2 – Ensaio de Valor de Dupla Acumulação para a estação de Degraças e estações circunvizinhas

hiatos nos registos, que originam uma curta simultaneidade temporal das séries, o que dificulta enormemente a análise posterior. Esta operação foi executada para as séries de dados diários e mensais.

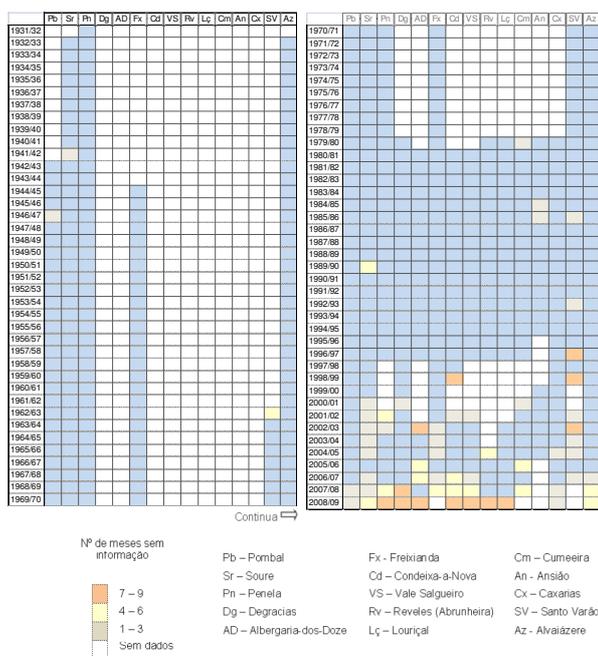
A representação gráfica dos dados mensais da precipitação nas estações consideradas (Quadro I.II.III.II) mostra esses constantes hiatos e localiza-os temporalmente, revelando que as principais lacunas que encontramos nas séries se referem à passagem do sistema convencional de medição, finalizado em meados da década de 90 do século passado, para o sistema automático, instalado nos primeiros anos deste milénio, tal como referido anteriormente. Para além de uma passagem de método de medição, processou-se também uma mudança nas entidades responsáveis por essa tarefa, das Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional para o antigo Instituto da Água. A crescer aos vários anos sem registos em muitas estações udográficas, acontece que, após, a entrada em funcionamento das estações automáticas tem-se registado uma grande intermitência nos registos, com um elevado número de meses sem qualquer informação. A gestão do funcionamento da rede automática de estações udográficas revelou-se, desde o início, problemático, tendo culminado no cancelamento da manutenção a partir de 2009, pelo que os Quadros I.II.III.I e I.II.III.II apenas se referem a séries até essa data.

Nesse sentido, decidimos que o preenchimento *a posteriori* de alguns desses dados mensais poderia constituir uma mais-valia para a caracterização climática da área em estudo. Procedemos, por isso, ao cálculo dos valores mensais de precipitação em falta para um conjunto vasto de estações para, deste modo, conseguirmos séries mais longas e dados de precipitação anual mais fiáveis e próximos da realidade, premissa extremamente importante para cálculos e análises posteriores.

Para o preenchimento dos dados mensais em falta seguimos o método utilizado por Reis (2006), que se descreve, sucintamente, da seguinte forma: o primeiro passo reporta-se ao cálculo do coeficiente de correlação (*r*) e consequentemente do coeficiente de determinação (*r*²) para todas as estações (Quadro I.II.III.III), no intuito de se perceberem as estações que maior correlação estabelecem entre si, pois esta será uma informação crucial no passo seguinte.

A partir do Quadro I.II.III.III, e com base na correlação entre as diversas estações, procedemos, para a estação com dados em falta, ao cálculo dos valores mensais com base num compromisso entre três premissas: (i) um elevado grau de associação entre estações, dado pelo valor do coeficiente de determinação; (ii) grande proximidade entre as estações em causa e que entre elas não exista nenhum obstáculo orográfico importante; (iii) escolha de séries longas para a obtenção de resultados o mais fiáveis possível.

Quadro I.II.III.II – Quadro-síntese dos registos de precipitação mensal disponíveis para as estações da região onde se insere a área em estudo



Satisfeitas estas três condições, calculou-se, através de regressão linear simples, os dados em falta para essa estação.

Quadro I.II.III.3 – Coeficiente de determinação (r^2) para as estações da região onde se insere a área em estudo

	Pb	Sr	Pn	Dg	AD	Fx	Cd	VS	Rv	Lç	Cm	A	Cx	SV	Az
Pb	1														
Sr	0,79	1,00													
Pn	0,69	0,63	1,00												
Dg	0,73	0,57	0,76	1,00											
AD	0,65	0,47	0,78	0,71	1,00										
Fx	0,78	0,76	0,66	0,72	0,76	1,00									
Cd	0,69	0,71	0,82	0,72	0,66	0,67	1,00								
VS	0,69	0,68	0,86	0,64	0,72	0,66	0,89	1,00							
Rv	0,48	0,61	0,62	0,60	0,56	0,64	0,69	0,57	1,00						
Lç	0,65	0,69	0,63	0,54	0,76	0,72	0,71	0,74	0,53	1,00					
Cm	0,66	0,62	0,89	0,69	0,88	0,79	0,84	0,84	0,71	0,69	1,00				
A	0,84	a	0,91	0,52	a	0,85	0,82	0,88	a	0,80	a	1,00			
Cx	0,69	0,76	0,84	0,65	0,73	0,89	0,78	0,79	0,65	0,53	0,84	0,90	1,00		
SV	0,75	0,74	0,88	0,71	0,75	0,67	0,91	0,88	0,74	0,61	0,90	a	0,72	1,00	
Az	0,81	0,84	0,63	0,73	0,82	0,83	0,86	0,80	0,71	0,74	0,94	0,94	0,94	0,81	1

a – dados insuficientes: o número de anos em análise era de apenas 14 (inferior a metade de 30 anos, considerado um valor fulcral na análise hidrometeorológica).
Ver a abreviatura do nome das estações na legenda do quadro anterior.

1.3. Variabilidade interanual da precipitação

Uma das características mais vincadas do clima em Portugal continental é a enorme variabilidade interanual da precipitação, com a sucessão de um ano seco ou muito seco a um ano húmido ou muito húmido e vice-versa.

Esta variabilidade resulta da originalidade da posição do território continental português, situado, simultaneamente, no sector meridional da zona temperada e de circulação de oeste das latitudes mais elevadas e na margem setentrional das altas pressões subtropicais. Em função desta dupla localização, e da franca abertura ao Atlântico, Portugal continental encontra-se numa "encruzilhada atmosférica complexa", exposto à influência de um vasto conjunto de massas de ar de origens diversas, que lhe incutem, portanto, uma vincada variabilidade climática (Ferreira, 2005).

Essa irregularidade interanual é demonstrada pelo cálculo e representação gráfica dos desvios de cada ano respectivamente ao módulo da série, calculados para a estação de Degraças e para as estações da região com as séries mais longas. Este método mostra, clara e rigorosamente, os períodos de deficiência e excedente pluviométricos. A junção, no mesmo gráfico, da representação do *total de precipitação anual*, do *módulo da série*, dos *desvios ao módulo*, da *linha de tendência* e das *médias móveis* para um período de 5 anos permite uma visão bastante completa da variação interanual da precipitação bem como da tendência temporal dessas mesmas séries de precipitação anual (Figura I.II.III.3).

111

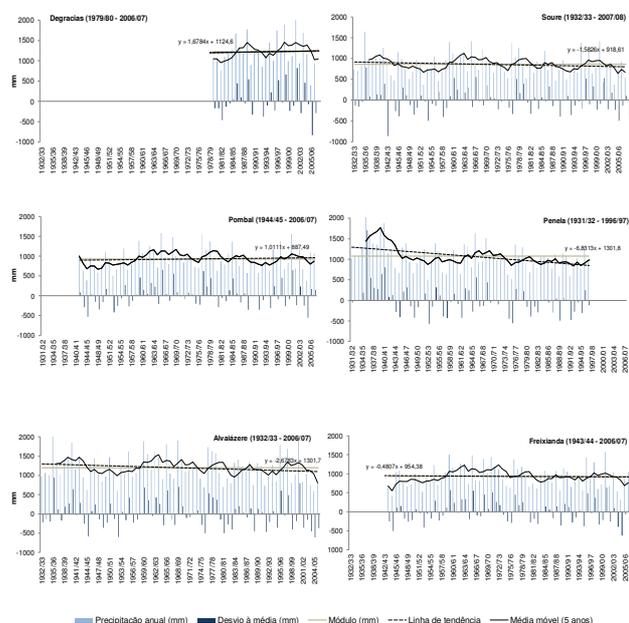


Figura I.II.III.3 – Precipitação anual, módulo, desvios da precipitação anual relativamente ao módulo, linha de tendência e médias móveis para um período de cinco anos para as estações de Degraças, Pombal, Soure, Penela, Alvaizere e Freixianda

Numa primeira observação da Figura I.II.III.3, constatamos que a irregularidade pluviométrica é bastante vincada em todas as estações, com o domínio dos períodos e anos secos em todas as séries, chegando, no caso de Alvaizere e Soure, a corresponderem a cerca de 57% dos anos considerados. Até à década de 70 do século passado (aproximadamente metade da série em análise) verifica-se um grande equilíbrio em termos de anos com precipitação superior e inferior à média, constituindo única excepção a estação de Penela,

com todos os anos da década de 30 do século passado a registarem desvios fortemente positivos à precipitação média para a estação.

Os últimos 40 anos têm sido marcados por uma clara predominância de anos com precipitação inferior à média, numa nítida tendência para a diminuição da precipitação nas séries mais longas (expressa pela linha de tendência), embora tenha ocorrido um curto período de precipitação anual elevada no final do século passado e início deste século (revelado pela oscilação positiva das médias móveis). Deste modo, a partir da década de 80, o número de anos com precipitação abaixo da média é superior ao dos anos com precipitação acima da média, sendo em algumas estações (por exemplo, Soure e Alvaiázere) mais do dobro dos anos mais chuvosos. Na estação de Degraças, os anos com baixa precipitação constituem 61% do conjunto da série. De salientar, ainda, a coincidência quase perfeita da alternância de períodos de escassez e de abundância de precipitação nas estações analisadas.

A partir dos anos 80 do século passado, e tal como referido anteriormente, tem-se assistido a um nítido e prolongado decréscimo da precipitação, comprovado pela linha de tendência (de onde se exclui apenas Pombal) e pelas médias móveis, quase sempre inferiores ao módulo. Conclusão, aliás, apresentada já por outros autores para o sul do país (Ventura, 1994; Reis, 2006) e apontada como a tendência futura do clima de Portugal continental, com a diminuição da precipitação na região em estudo a poder variar entre os 10 e os 30% (Santos e Miranda, 2006).

De notar, ainda, nas duas últimas décadas, a tendência, em toda as estações analisadas, para anos com valores de precipitação muito extremados, confirmados por um coeficiente de variação superior a 30% na década de 90 do século passado e a 40% a partir de 2000/01 (Quadro I.II.III.IV A). A primeira década do século XXI tem sido, aliás, aquela onde se regista uma maior variabilidade dos valores de precipitação anual, atestada também pelo desvio padrão mais elevado das últimas 5 décadas, originado pelos valores anormalmente elevados de precipitação nos primeiros anos da década e pelos anos muito secos que se lhe seguiram.

A acentuada irregularidade interanual é demonstrada por medidas de dispersão e de tendência central das quais se destaca o coeficiente de variação, que ao estabelecer a razão entre o desvio padrão e a média permite a eliminação da proporcionalidade entre ambos (anulando a dependência do desvio padrão relativamente aos valores absolutos da série) e possibilita a comparação entre locais com totais de precipitação muito diferenciados (Quadro I.II.III.IV B).

113

Quadro I.II.III.IV – Medidas de tendência central e de dispersão para a estação de Degraças e para algumas estações vizinhas, com séries longas. A) por década; B) por estação udográfica/climatológica, no conjunto da série e no período 1979/1980 – 2006/2007

A) Por década

	Degraças			Pombal			Soure			Alvaiázere		
	Média	Desvio-Padrão	CV	Média	Desvio-Padrão	CV	Média	Desvio-Padrão	CV	Média	Desvio-Padrão	CV
	mm	mm	%	mm	mm	%	mm	mm	%	mm	mm	%
1950/51-1959/60	-	-	-	904	268	30	820	297	36	1220	364	30
1960/61-1969/70	-	-	-	1099	276	25	1004	230	23	1377	359	26
1970/71-1979/80	-	-	-	1010	272	27	890	264	30	1234	329	27
1980/81-1989/90	1207	301	25	894	228	25	793	210	26	1091	274	25
1990/91-1999/00	1241	334	27	957	247	26	841	265	32	1153	360	31
2000/01 - 2007/08	1284	498	39	875	396	45	823	337	41	1022	465	46

B) Por estação

	Mínima (mm)		Máxima (mm)		Máxima-Mínima (mm)		Média (mm)		Desvio-Padrão (mm)		CV %		CF	
	Série 1979/80-2006/07													
	Pombal	369	369	1579	1568	1210	1198	923	884	285	281	31	32	4
Soure	367	367	1645	1393	1279	1027	861	804	272	260	32	32	4	4
Alvaiázere	593	593	1809	2004	1216	1411	1200	1095	358	351	30	32	3	3
Caxarias	601	494	1395	1408	794	914	853	832	256	253	30	30	2	3
Freixwanda	430	316	1489	1567	1059	1251	953	876	281	285	29	32	3	5
Penela	663	-	1630	-	967	-	1073	-	365	-	34	-	2	-
Degraças	396		2046		1649		1233		374		30		5	

CV (Coeficiente de Variação) = (Desvio Padrão/Média)*100 | CF (Coeficiente de Flutuação) = Máxima/Mínima

As medidas de dispersão e de tendência central são, assim, de grande interesse tanto na análise temporal quanto na análise espacial da variabilidade da precipitação. Do ponto de vista da espacialidade, o coeficiente de variação evidencia uma maior variabilidade relativamente à média na estação mais a leste (Penela – 34%). Por outro lado, o desvio padrão evidencia a importância da altitude no aumento do desvio à média, como atestam os elevados valores de Degraças, Penela e Alvaiázere. Em termos de variabilidade absoluta, traduzida pelo coeficiente de flutuação, as estações de Degraças, Pombal e Soure são aquelas onde a disparidade é maior entre o valor mínimo e máximo das respectivas séries. Deste modo, e perante as diferentes espacialidades apresentadas no Quadro I.II.III.IV B, a única conclusão que pode ser extraída é a de uma generalizada irregularidade interanual em

toda a região analisada, sendo um pouco mais acentuada nas estações um pouco mais interiores e nas de maior altitude, onde se registra um maior contraste.

Para além disso, a comparação da média e da mediana nas diferentes estações fornece uma outra característica da área: a tendência geral para a maior ocorrência de anos com precipitação abaixo da média, reiterando as conclusões já extraídas da Figura I.II.III.3. Com efeito, exceptuando a estação de Pombal, todas as outras apresentam curvas de distribuição da precipitação com assimetria positiva, ou seja, os valores da mediana inferiores aos valores da média.

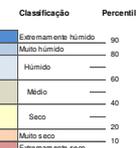
Outra forma de visualização da irregularidade interanual da precipitação é a classificação e representação gráfica dos anos de acordo com as suas características ombrométricas, o que permite, simultaneamente, uma visualização temporal e espacial das séries. Para essa classificação, e dada a existência de séries de dimensão muito heterogénea, optamos pela divisão das séries em percentis. Deste modo, os anos foram classificados da seguinte forma: inferior ao 10º percentil (anos extremamente secos); entre o 10º e o 20º percentil (anos muito secos); entre o 20º e o 40º percentil (anos secos); do 40º ao 60º percentil (anos médios/normais); do 60º ao 80º percentil (anos húmidos); entre o 80º e o 90º percentil (anos muito húmidos) e acima do 9º percentil (anos extremamente húmidos) – Quadro I.II.III.V.

A leitura deste quadro permite ver não só a alternância entre períodos de escassez e períodos de abundância de precipitação (analisada anteriormente), mas também o comportamento da precipitação anual num alargado conjunto de estações estudadas. Decorre, portanto, da análise do quadro, a existência de uma certa homogeneidade entre as estações, já que na maioria dos casos num mesmo ano hidrológico todas as estações se encontram inseridas na mesma classe ou na classe adjacente. A concordância entre as estações é particularmente sentida nos anos com valores extremos de precipitação (escassez ou abundância), onde todas as estações pertencem à mesma classe. É o caso dos anos de 1944/1945, 1952/1953, 2004/2005 (anos extremamente secos) e de 1940/1941, 1965/1966, 2000/2001 (anos extremamente húmidos).

Se efectuarmos a divisão dos anos hidrológicos apenas em duas classes (secos ou húmidos), excluindo a classe dos anos médios, verificamos que a estação que possui mais anos secos e extremamente secos é a de Penela, provavelmente por ser a estação mais interior e por se localizar no enfiamento do Maciço Calcário de Sicó, onde se precipita muita da água transportada pelas massas de ar provenientes do quadrante oeste. Situação corroborada pelo facto da estação de Degraçias, apesar da sua menor extensão temporal e de não abranger as décadas chuvosas de 60 e 70, ser aquela que apresenta a maior percentagem de anos húmidos, dada a sua posição altitudinal mais elevada e a sua

	Soure	Penela	Alvaiázere	Pombal	Freixianda	São Várzea	Degraçias	Cavarias
1931/32	-	1693	-	-	-	-	-	-
1932/33	730	1081	979	-	-	-	-	-
1933/34	703	1065	1063	-	-	-	-	-
1934/35	821	1254	1007	-	-	-	-	-
1935/36	1430	2778	2141	-	-	-	-	-
1936/37	951	1361	1823	-	-	-	-	-
1937/38	833	1383	1035	-	-	-	-	-
1938/39	1002	1383	1390	-	-	-	-	-
1939/40	390	1713	1474	-	-	-	-	-
1940/41	1054	1679	1987	-	-	-	-	-
1941/42	1154	1164	1160	-	-	-	-	-
1942/43	855	1201	1491	1005	-	-	-	-
1943/44	262	792	953	637	-	-	-	-
1944/45	402	863	926	262	430	-	-	-
1945/46	1163	1288	1272	961	1044	-	-	-
1946/47	982	1387	1446	-	1084	-	-	-
1947/48	739	927	1058	768	754	-	-	-
1948/49	690	854	842	978	870	-	-	-
1949/50	684	905	972	767	717	-	-	-
1950/51	872	1065	1469	1098	1003	-	-	-
1951/52	623	1243	1070	924	896	-	-	-
1952/53	669	941	997	926	926	-	-	-
1953/54	773	921	1258	665	885	-	-	-
1954/55	727	1385	1039	864	761	-	-	-
1955/56	1096	1191	1623	1194	1258	-	-	-
1956/57	663	681	979	662	709	-	-	-
1957/58	672	640	1056	795	829	-	-	-
1958/59	957	1038	1219	949	1041	-	-	-
1959/60	2391	1235	1897	1896	1896	-	-	-
1960/61	1112	863	1054	1071	1168	-	-	-
1961/62	890	640	1145	973	908	-	-	-
1962/63	1042	1366	1631	1250	1265	1094	-	-
1963/64	1166	1317	1463	1148	1286	1234	-	-
1964/65	692	861	905	712	737	908	-	-
1965/66	1410	1030	1633	1579	1439	1433	-	-
1966/67	834	921	1052	967	839	756	-	-
1967/68	731	840	918	797	818	772	-	-
1968/69	1218	761	768	748	748	748	-	-
1969/70	804	1020	1398	1011	1006	908	-	-
1970/71	893	1062	1099	909	1040	860	-	-
1971/72	646	973	1120	838	1184	646	-	-
1972/73	831	1063	1218	994	1115	914	-	-
1973/74	872	1060	1289	956	856	833	-	-
1974/75	679	829	919	723	680	640	-	-
1975/76	636	763	768	696	637	598	-	-
1976/77	1000	1353	1735	1538	1379	1354	-	-
1977/78	1031	1067	1628	1161	1113	1014	-	-
1978/79	1059	1295	1575	1370	1194	1138	-	-
1979/80	759	915	1055	912	908	808	1054	773
1980/81	636	679	759	634	655	613	795	634
1981/82	917	921	929	872	750	868	1097	843
1982/83	651	785	799	785	612	792	1181	586
1983/84	627	1054	1265	1060	929	1062	1289	1012
1984/85	833	1090	1406	1364	1079	1053	1672	1026
1985/86	1185	1025	1227	979	992	980	1328	868
1986/87	716	774	1105	754	770	843	1176	807
1987/88	853	1113	1245	983	1075	1069	1276	948
1988/89	462	279	749	674	569	609	886	601
1989/90	732	1139	1327	937	1140	951	1243	1088
1990/91	661	1063	1238	938	1058	924	1239	996
1991/92	698	964	748	836	653	593	896	602
1992/93	733	796	987	815	793	808	1131	714
1993/94	828	1021	1274	930	962	928	1450	840
1994/95	659	764	843	693	695	627	1005	630
1995/96	698	1319	1666	1170	1443	1213	1747	876
1996/97	767	856	1157	834	897	877	1207	973
1997/98	1183	-	1684	1371	1598	1341	1358	1370
1998/99	637	-	797	668	668	545	993	633
1999/00	708	708	1014	835	716	767	1129	764
2000/01	1419	-	3024	1648	1587	1420	2048	1990
2001/02	831	-	837	686	684	487	943	678
2002/03	676	-	1046	1185	1038	1030	1688	869
2003/04	800	-	748	673	529	490	1161	676
2004/05	368	-	583	369	316	414	396	494
2005/06	733	-	835	1096	865	638	938	683
2006/07	605	-	1087	1087	1041	968	1088	797

Quadro I.II.III.V – Classificação pluviométrica dos anos hidrológicos nas estações da área de estudo e região envolvente



localização no Planalto Degracias-Alvorge, unidade morfológica pertencente ao conjunto de relevos designados por 'serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere' (Cunha, 1988), o primeiro obstáculo continental à progressão das massas de ar para leste.

O Quadro I.II.III.V permite ainda reiterar a ideia já anteriormente expressa do aumento da irregularidade interanual da precipitação nas duas últimas décadas, com o aparecimento pontual de anos extremamente húmidos no seio de séries de anos bastante secos, sem que isso signifique o início ou o fim de um período mais alargado. É o caso dos anos extremamente pluviosos de 1995/96, 1997/98 e de 2000/01.

No que se refere à estação udográfica de **Degracias**, a análise do período 1979/1980 – 2006/2007 mostra que o comportamento da precipitação é concordante com as demais estações, embora mais elevado em termos de quantitativos anuais. A única situação em que parece afastar-se das demais estações é na tendência geral para a diminuição dos totais de precipitação anual que ocorre nesta região, uma vez que foi frequente a ocorrência de anos com valores bastante acima da média, com desvios fortemente positivos (em alguns anos mais de 40% acima da média). No entanto, confirmou-se a tendência para um maior número de anos com valores pluviométricos abaixo da média da série, à semelhança do que ocorreu em todas as outras estações.

1.4. Comportamento mensal da precipitação

A repartição intra-anual da precipitação em Portugal continental é bastante contrastada, já que, segundo Daveau (1977), se podem distinguir dois meses de estação seca (Julho e Agosto), seis meses de estação chuvosa (Outubro a Março) e quatro meses intermédios, três constituindo a Primavera (Abril Maio e Junho) e um só, no início do Outono (Setembro). O ritmo estacional é, portanto, nitidamente dissimétrico, com uma longa estação húmida iniciada bruscamente com a chegada do Outono e que se estende de forma irregular até à Primavera e uma curta estação seca, cuja duração pode ser variável consoante os anos, mas onde se individualizam, nitidamente, dois meses.

No período 1979/80 – 2006/07, nesta região, a precipitação dos meses outonais e do início do Inverno (Outubro, Novembro e Dezembro) foi muito elevada no contexto anual, facto que se justificará por esta área se encontrar próxima da faixa litoral ocidental, o que faz com que esteja aberta à influência continuada das massas de ar muito húmidas, causadoras de chuvadas outonais intensas, particularmente no mês de Novembro. Na série analisada, é muito frequente a alternância do trimestre outonal com o invernal em termos da maior importância no total da precipitação anual, aspecto extremamente importante no comportamento hidrológico do hidrossistema de Degracias-Sicó e dos cursos de água superficiais da região.

117

Em termos de repartição mensal da precipitação no período 1979/80 – 2006/07, verifica-se uma grande homogeneidade em toda a área de estudo, com o mês de Dezembro a ser o mais chuvoso, apenas com excepção da estação de Degracias, onde o máximo mensal do ano ocorre em Novembro (Figura I.II.III.4).

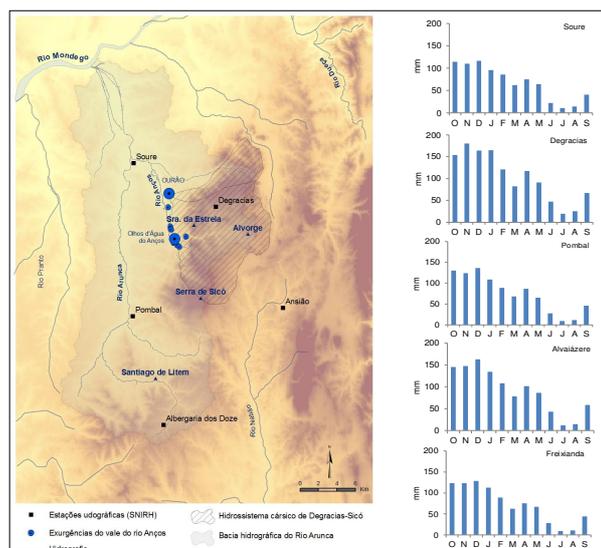


Figura I.II.III.4 – Gráficos pluviométricos da região onde se insere a área em estudo (1979/80 – 2006/07)

Os meses de Janeiro e Fevereiro, embora constituindo o cerne da estação invernal, registam valores médios de precipitação bem mais baixos do que os meses outonais. Estes dois meses registam uma diminuição apreciável da precipitação quando comparados com Dezembro – em média, 15 a 20% menos de precipitação (Quadro I.II.III.VI). Contudo, é no mês de Março que a descida da precipitação é mais pronunciada, com as estações a registarem cerca de 28% menos precipitação do que o mês de Fevereiro. A estação udográ-

fica de Degracias, localizada na área de recarga do hidrossistema em estudo, foi a que registou a maior descida da região (-31,7%).

Quadro I.II.III.VI – Variação mensal (em %) da precipitação nas estações udográficas de Degracias e da região envolvente (1979/80 – 2006/07)

	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S
Degracias	130,9	17,0	-8,8	0,3	-26,9	-31,7	42,3	-22,3	-48,3	-59,1	29,8	166,7
Pombal	184,6	-4,5	9,6	-20,2	-17,9	-23,3	26,1	-24,6	-58,0	-66,1	21,5	307,5
Soure	179,5	-3,5	5,5	-17,8	-10,7	-27,6	21,5	-14,6	-66,0	-51,3	34,4	187,0
Freixianda	176,3	0	4,1	-12,1	-21,0	-30,1	21,1	-10,8	-57,5	-67,9	22,5	296,4
Alvaiázere	148,4	1,6	10,1	-17,5	-19,6	-27,1	28,9	-14,8	-49,2	-72,5	22,9	295,6
Caxarias	166,2	4,8	5,7	-19	-20,1	-26,5	23,1	-14,5	-58,1	-71,2	28,6	337,6
Média	164,3	2,6	4,4	-14,4	-19,4	-27,7	27,2	-16,9	-56,2	-64,7	26,6	265,1

$$\text{Variação mensal} = ((\text{mês } n+1 - \text{mês } n) / \text{mês } n) * 100$$

De salientar, em toda esta região, a ocorrência de um pico secundário de precipitação relativamente destacado no mês de Abril, registando-se uma variação positiva de cerca de 27% relativamente ao total udométrico do mês anterior, valor que sobe para 42% na estação de Degracias.

Julho e Agosto registam os valores mínimos de precipitação mensal do ano, sendo Julho o mês mais seco em toda a área de estudo, não tendo, inclusive, ocorrido precipitação em vários anos. Julho apresenta, em termos médios, uma diminuição bastante acentuada da precipitação com menos 65% de chuva que o mês de Junho. Nas estações de maior altitude (Degracias e Alvaiázere), embora os quantitativos pluviométricos destes meses sejam ligeiramente superiores aos das restantes estações da região, são, do mesmo modo, os meses de precipitação mínima anual.

Setembro marca claramente o fim do Verão em toda a região, com o aumento significativo da precipitação (a precipitação quase triplica comparativamente à precipitação registada em Agosto), situação que se prolonga por Outubro. Deste modo, tanto Setembro quanto Outubro podem ser considerados meses de transição, correspondentes ao período em que se dá um incremento significativo da precipitação, podendo, contudo, variar de ano para ano o mês em que se dá o maior aumento.

Outra das formas de analisarmos o comportamento da precipitação mensal é através do coeficiente de variação (Quadro I.II.III.VII), cujos valores oscilam entre um mínimo de 55% em Abril em Degracias e um máximo de 155% em Julho em Alvaiázere. De um modo geral, não se encontram diferenças espaciais consideráveis entre os valores de cada mês, o que se justifica pela reduzida dimensão da área em estudo.

119

Quadro I.II.III.VII – Coeficiente de variação da precipitação nas estações udográficas de Degracias e da região envolvente (1979/80 – 2006/07)

	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S
Degracias	61,1	72,7	62,7	80,9	63,6	67,4	55,4	69,1	107,4	101,6	107,7	77,7
Pombal	66,0	77,7	76,3	84,8	74,0	89,7	64,0	70,2	107,9	145,9	104,7	92,2
Soure	61,0	76,4	84,2	88,8	58,7	89,2	61,5	73,6	123,1	135,5	91,9	89,9
Freixianda	65,6	72,3	83,4	88,2	75,5	88,0	61,7	87,7	100,2	140,5	88,4	82,2
Alvaiázere	58,3	72,6	80,1	84,2	70,9	89,8	59,9	80,1	109,7	155,5	96,3	82,9
Caxarias	62,3	75,0	87,9	88,5	71,1	84,8	59,3	80,4	110,5	119,2	94,2	78,8
Média	62,4	74,5	79,1	85,9	69,0	84,8	60,3	76,9	109,8	133,0	97,2	84,0

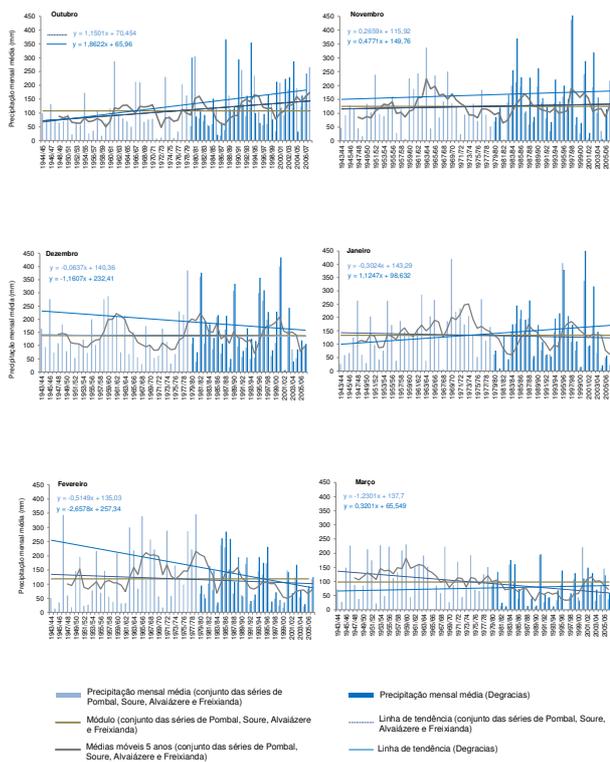
A variabilidade é mais baixa nos meses intermédios de Outubro e Abril, bem como no período mais chuvoso, com valores de coeficiente de variação sempre inferiores a 90%, significando, portanto, que os valores de precipitação, por norma, não se afastam muito da média mensal. No entanto, a situação altera-se por completo nos meses mais secos, com um aumento muito considerável da variabilidade logo no mês de Junho, que se prolonga pelos meses de Julho e Agosto, estando quase sempre acima dos 100%. Valores que são compreensíveis já que, sendo estes meses caracterizados por precipitação muito baixa ou mesmo nula, qualquer episódio pluviométrico esporádico traduz-se, imediatamente, em valores muito elevados de desvio padrão e coeficiente de variação.

A completar o estudo do comportamento mensal da precipitação, decidimos analisar a tendência da variação da precipitação para cada mês do ano ao longo de 64 anos (1943/44 – 2006/2007), utilizando, para isso, um valor médio obtido a partir a precipitação mensal média do conjunto das quatro estações com as séries mais longas (Pombal, Soure, Alvaiázere e Freixianda). A importância desta análise reside no facto de o conhecimento da tendência dos quantitativos mensais de precipitação nas diferentes épocas do ano permitir conhecer, também, a tendência em termos da disponibilidade de recursos hídricos.

Da análise efectuada, verificámos algumas tendências bem definidas, caso da diminuição da precipitação nos meses húmidos de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, tendência que se agudiza no mês de Março, no qual a tendência tem sido a diminuição considerável dos valores de precipitação (Figura I.II.III.5)². Esta situação é particularmente grave se tivermos presente que a precipitação invernal (e do início da Primavera) é crucial na manutenção das reservas hídricas que alimentarão o escoamento na estação mais quente e

² De acordo com as normais climatológicas 1971-2000 disponibilizadas, gratuitamente, pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera para a estação climatológica de Coimbra (a mais próxima) a diminuição da precipitação no mês de Março foi de 38%, tendo passado de 105,6 mm no mês de Fevereiro para 65,5 mm em Março. Informação disponível on-line em <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1971-2000/006/>.

seca e também que os cenários climáticos futuros apontam no sentido de um decréscimo acentuado da precipitação na Primavera (Santos e Miranda, 2006).



Continua →

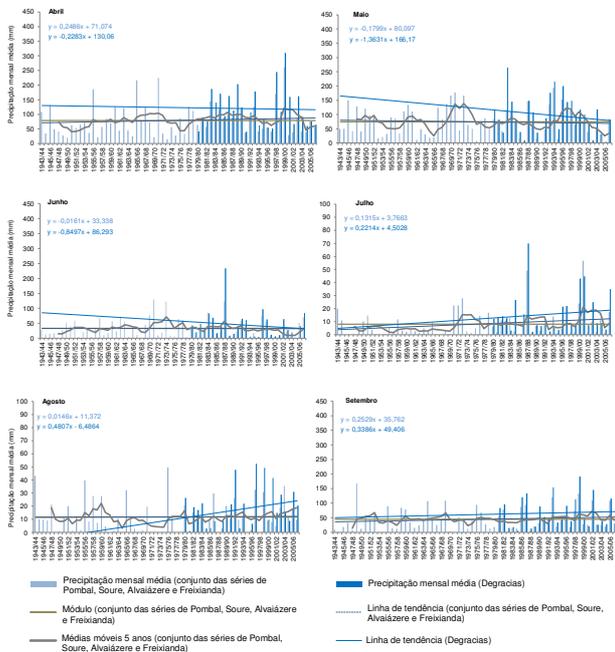


Figura I.III.5 – Tendência da variação mensal da precipitação para a média do conjunto de quatro estações (Pombal, Soure, Alvaiázere e Freixianda) no período de 1943/44 – 2006/07

O mês de Abril, para além de constituir um máximo secundário de precipitação, tem registado nas últimas décadas um aumento, ainda que modesto, dos quantitativos de precipitação, contrastando com o final da Primavera e início de Verão, onde a precipitação tem vindo a decrescer.

Outra das tendências mais visíveis é o aumento da precipitação que se inicia na estação seca (Julho e Agosto) e se prolonga pelo Outono, onde o mês de Outubro tem registado um incremento muito substancial dos seus valores de precipitação.

1.5. A repartição espacial da precipitação

A distribuição dos totais anuais de precipitação na região onde se insere o hidrossistema de Degracias-Sicó está, contudo, longe de ser totalmente uniforme. As características do relevo levam a que, grosso modo, possamos dividir as estações em dois grandes grupos: (i) as que se situam nos locais mais baixos (de altitude inferior a 150 m); (ii) as que se localizam nas áreas mais elevadas (com altitude superior a 240 m). Do cruzamento dos totais anuais de precipitação com os valores da altitude dos locais onde se encontram as estações (Figura I.II.III.6) resulta a individualização de dois grupos, o que se justifica claramente pela altitude a que aquelas se situam. Assim, um grupo aglutina as estações de Albergaria dos Doze, Degracias, Cumeeira, Penela e Alvaiázere, onde a elevada precipitação anual aparece associada a maiores valores altitudinais e um outro grupo que engloba as restantes estações, à excepção da estação de Ansião, cuja altitude acima dos 200 m não se reflecte de sobremaneira nos valores de precipitação anual. Situação que se deve ao facto da estação de Ansião estar numa situação de abrigo aerológico, dada a sua localização imediatamente a leste do Maciço de Sicó.

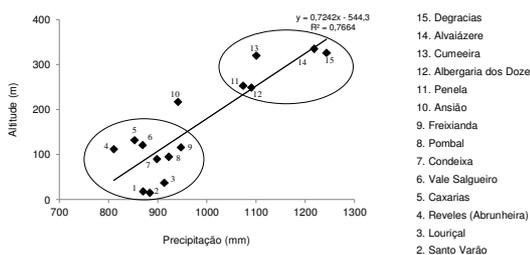


Figura I.II.III.6 – Relação da precipitação média anual com a altitude a que se localizam as estações udográficas/climatológicas na região onde se insere a área em estudo

No intuito de aferir os resultados suprajacentes, efectuamos uma análise de *clusters*, já que este é um procedimento muito utilizado na detecção de grupos homogéneos. Neste

123

caso, a formação de grupos, expressa no dendrograma (Figura I.II.III.7), possibilitou a detecção imediata das estações cujos valores de precipitação anual mais se assemelham e relacionam entre si e que, portanto, poderiam associar-se.

A organização das estações faz-se em dois grandes grupos, sendo novamente a altitude a variável que permite explicar a aglutinação/separação das estações. Apenas de realçar, relativamente ao diagrama anterior, a troca da estação de Penela pela de Ansião no grupo das estações de maior altitude. Situação que nos surpreende um pouco já que a estação de Penela está localizada a uma altitude mais elevada e os valores de precipitação assemelham-se mais aos do grupo das estações mais elevadas e, por isso, estaria mais próxima destas do que a estação de Ansião.

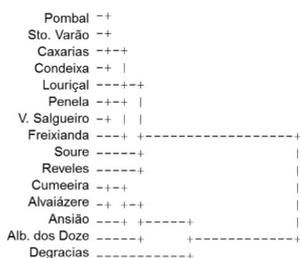


Figura I.II.III.7 – Dendrograma resultante da análise de *clusters* para as estações da região onde se localiza a área em estudo

A representação cartográfica da repartição espacial da precipitação mostra com clareza como o relevo é, de facto, o factor preponderante na explicação dos quantitativos pluviométricos registados nesta região (Figura I.II.III.8), confirmando a análise anterior. Nas áreas de maior altitude, e em particular no Maciço de Sicó, pelo efeito de "primeira barreira" à progressão das massas de ar atlânticas, registam-se quantitativos pluviométricos que ultrapassam, em mais de 90% dos anos considerados, os 1000 mm, chegando mesmo a subir, em alguns anos, acima dos 1500 mm (1984/85 – 1672 mm; 1987/88 – 1770 mm; 1995/96 – 1747 mm; 1997/98 – 1889 mm). No caso de anos extremamente húmidos, como 2000/01, o total anual registado na estação de Degracias foi superior a 2000 mm (2045 mm).

Esta distribuição mostra que os quantitativos de precipitação mais elevados nesta região ocorrem precisamente na área de recarga do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó, realidade importante na sua hidrodinâmica e no comportamento das exurgências que o bordejam, em particular as do bordo ocidental, que drenam a maior parte da precipitação aí ocorrida.

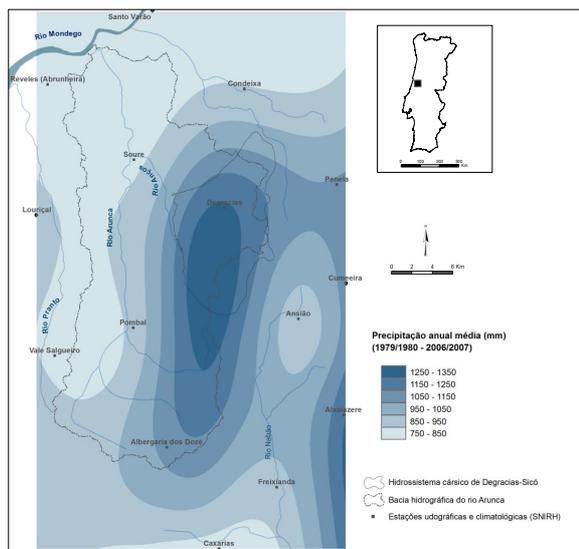


Figura I.II.III.8 – A repartição espacial da precipitação anual média na região onde se insere a área de estudo (1979/1980 – 2006/2007)³

O sector das cabeceiras da bacia hidrográfica do rio Arunca regista também valores consideravelmente elevados de precipitação (cerca de 60% dos anos com totais superiores a 1000 mm), aspecto que, conjugado com a sua concentração estacional, intensidade de

³ Excepção apenas da estação udográfica de Penela, cuja série considerada para o cálculo da precipitação anual média foi 1979/1980 – 1996/1997.

125

alguns episódios e características físicas desta área (declives moderados a fortes, substracto rochoso pouco permeável e densa rede hidrográfica) regulam fortemente o comportamento do rio Arunca.

Por outro lado, as áreas mais secas decalcam os principais vales da região – áreas de menor altitude a norte e a oeste (planície aluvial do Mondego e tributários da margem esquerda) e de abrigo aerológico a leste (vale do rio Nabão).

Em **síntese**, podemos afirmar que a distribuição espácio-temporal da precipitação na região onde se insere a área em estudo ao longo dos últimos 80 anos e, em particular, nos últimos 30 anos ocorre do seguinte modo:

(i) forte variabilidade interanual da precipitação com uma ligeira tendência de diminuição dos quantitativos desde os anos 30 e 40 do século passado até 2006/2007. Tendência que se acentuou nas últimas três décadas, com o registo frequente de anos com escassa precipitação. Verificou-se, também, o aumento do contraste interanual dos valores de precipitação, aspecto comum a todas as estações udográficas e climatológicas analisadas;

(ii) o trimestre onde ocorre mais precipitação é Outubro – Dezembro, sendo este último mês o que apresenta totais mais elevados, exceptuando-se apenas a estação de Degracias, onde é o mês de Novembro o de maior precipitação. Ocorrência de um pico secundário de precipitação no mês de Abril;

(iii) diminuição acentuada da precipitação no mês de Março, particularmente vinculada na estação de Degracias, onde também o mês de Fevereiro se tem caracterizado por uma forte descida dos valores de precipitação. Em contrapartida, é nítido o aumento da precipitação nos meses outonais de Outubro e Novembro;

(iv) a importância do factor *relevo* na distribuição espacial da precipitação, com o aumento dos quantitativos à medida que a altitude vai aumentando, sendo os valores mais elevados registados nas estações de maior altitude (Degracias e Alvaizere). A importância do alinhamento das serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaizere como primeira barreira à progressão das massas de ar para leste, responsável por valores anuais médios de precipitação elevados (superiores a 1100 mm e até mesmo 1200 mm) na área de recarga do hidrossistema de Degracias-Sicó.

2. O balanço hidrológico

A caracterização climática da área em estudo e da região envolvente finaliza com o cálculo do balanço hidrológico devidamente enquadrado nos usos do solo. No entanto, uma vez mais emergiram problemas relacionados com os constrangimentos impostos pela exiguidade das séries de dados de precipitação de grande parte das estações e,

principalmente, com a enorme dificuldade em obter dados de temperatura para períodos suficientemente longos e simultâneos aos registos da precipitação. Por conseguinte, tivemos de reduzir a caracterização apenas a algumas estações udográficas, com os dados da temperatura a provirem de estações vizinhas, localizadas em áreas com características geográficas aproximadas, tal como se observa na Figura I.II.III.7. Assim, para as estações de Soure e Pombal, os dados da temperatura são da estação de Sto.Varão (próximo de Montemor-o-Velho, na planície aluvial do Mondego) e para as estações de Degracias, Ansião e Albergaria dos Doze, a informação relativa à temperatura pertence à estação de Ansião.

A dificuldade de obtenção e, em muitos casos, a inexistência de informação sobre parâmetros mais específicos e complexos necessários ao cálculo do balanço hidrológico obrigaram à escolha de um método empírico e de simples implementação. A opção recaiu no cálculo segundo o método sequencial de Thornthwaite-Mather, que apenas requer dados mensais de precipitação e temperatura média do ar e conhecimentos básicos sobre as principais características dos solos (tipo, textura, estrutura, principais constituintes, espessura) para a formulação do valor da reserva útil do solo e para a determinação da evapotranspiração potencial. Os balanços hidrológicos aqui elaborados tiveram, assim, por base a aplicação da técnica do cálculo sequencial do balanço hidrológico supra-referido e que pode ser descrito da seguinte forma (Lencastre e Franco, 1992):

$$P - (ETR + \Delta AS_o) = R + \Delta AS + G + \Delta AP$$

em que: P é a precipitação; ETR a evapotranspiração real; R o escoamento à superfície; G o escoamento subterrâneo; ΔAS , ΔAS_o e ΔAP a variação do armazenamento de água à superfície, no solo arável e em profundidade, respectivamente. Todos os termos devem ser expressos na mesma unidade (por exemplo, em milímetros).

No entanto, dado o objectivo dos cálculos neste ponto do trabalho (caracterização climática) a equação acima apresentada foi simplificada, tomando a seguinte forma:

$$P = (ETR + \Delta AS_o) + SH$$

sendo SH o excedente hídrico ou *superavit* hídrico, ou seja, a parte da precipitação que alimentará o escoamento superficial, a percolação e o escoamento subterrâneo.

O cálculo da evapotranspiração real (ETR) foi efectuado segundo o método desenvolvido por Thornthwaite (1948) a partir dos valores da evapotranspiração potencial (ETP), previamente calculados, considerando duas situações: (i) nos meses húmidos, de *superavit*

127

hídrico (quando $P \geq ETP$), a evapotranspiração real é igual à evapotranspiração potencial, uma vez que a reserva útil do solo está completa; (ii) nos meses de *deficit hídrico* (quando $P < ETP$) a evapotranspiração real faz-se à custa da água existente no solo, sendo o seu valor, o resultado da soma da precipitação com a água cedida pelo solo (ou seja, com a variação de armazenamento da água no solo, ΔAS_o).

Na sequência, calcula-se o *deficit hídrico*, DH , e o *superavit hídrico*, SH , o primeiro entendido como a diferença entre a evapotranspiração potencial e a evapotranspiração real ($DH = ETP - ETR$). No caso do *superavit* ou *excedente hídrico*, se o solo está saturado e a precipitação é igual ou superior à evapotranspiração potencial ($P \geq ETP$), o *superavit* corresponde ao excesso da precipitação sobre a evapotranspiração potencial ($SH = P - ETP$); se está a ocorrer a reconstituição da reserva útil, temos de considerar a variação do armazenamento de água no solo.

Relativamente ao valor da reserva útil do solo (RU) considerados para os cálculos, optamos por aplicar dois valores diferentes, embora estejamos conscientes de que o valor utilizado, teoricamente, deverá ser o mesmo quando se pretende fazer comparações e classificações climáticas. No entanto, dada a diferença em termos litológicos, geomorfológicos, pedológicos e de vegetação nesta região, seria irrealista utilizar o mesmo valor. Assim, para as áreas cársicas (estações de Degracias e Ansião) considerámos uma reserva útil de 75 mm⁴ e para as restantes estações (Soure, Pombal e Albergaria dos Doze) uma reserva útil de 100 mm.

Os valores obtidos para o *deficit* e o *superavit* hídricos mostram, uma vez mais, as diferenças espaciais em termos hidroclimáticos que caracterizam esta região e que se explicam principalmente pela orografia. Deste modo, o *superavit* decalca claramente as áreas mais elevadas e mais pluviosas (Degracias e Albergaria dos Doze), onde equivale a mais de 50% do total de precipitação ocorrido – 55% e 52%, respectivamente. No caso de Soure e Pombal, a altitudes muito inferiores, esse valor apenas se fica pelos 34% no primeiro caso e 40% no segundo caso. Ansião, pela sua situação de abrigo aerológico por um lado e pela posição topográfica, por outro, apresenta um valor intermédio de 47% de excedente hídrico.

A representação gráfica dos valores de precipitação, evapotranspiração real e excedente hídrico (Figura I.II.III.9) revela que, independentemente dos quantitativos anuais de precipitação, a distribuição mensal é muito semelhante, com o *superavit* a aproximar-se bastante do total de precipitação mensal em Dezembro, Janeiro e Fevereiro. Nos meses do

⁴ A justificação para a utilização de um valor de reserva útil de 75 mm nestas áreas cársicas encontra-se desenvolvida na segunda parte deste trabalho, no estudo da recarga do hidrossistema de Degracias-Sicó (Parte II, Capítulo III).

PARTE II

**O HIDROSSISTEMA CÁRSICO DE DEGRACIAS-SICÓ:
ESTUDO DA SUA HIDRODINÂMICA**

CAPÍTULO I

O MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO E OS DADOS UTILIZADOS

1. A escolha do método

No estudo da relação *input-output* no hidrossistema cársico de Degraças-Sicó a escolha do método de investigação constituiu uma das tarefas iniciais e nucleares para o estudo aprofundado da sua hidrodinâmica e, conseqüentemente, para a inferência e compreensão das suas características físicas internas.

A importância da metodologia a adoptar no presente trabalho prendeu-se principalmente com duas questões: (i) o facto de estarmos perante um maciço cársico cujas características internas são pouco conhecidas (inexistência de dados de traçagens neste sector do hidrossistema; escassa informação espeleológica divulgada – dimensão, forma, extensão e conexão de cavidades internas); (ii) os dados relativos ao caudal das exurgências que drenam o Maciço serem esparsos, pouco pormenorizados e não coincidentes temporalmente com os dados de precipitação, informação igualmente irregular e com muitos hiatos.

Estas circunstâncias condicionaram, logo à partida, o método de análise a adoptar, uma vez que os estudos mais detalhados e precisos (por exemplo os modelos distributivos) requerem um extenso e minucioso conhecimento das propriedades físicas do hidrossistema, o que não possuíamos. Como é sublinhado na vasta bibliografia da especialidade, o estudo do funcionamento hidrodinâmico destes sistemas cársicos (ainda que entendidos numa perspectiva global) está dependente, antes de mais, de algum conhecimento prévio das características e organização da rede de drenagem hipogea. Assim sendo, estas propriedades físicas devem ser, *a priori*, identificadas e conhecidas de forma a comparar e

133

escolher os métodos de estudo apropriados para este tipo de hidrossistemas (El-Hakim e Bakalowicz, 2007).

Deste modo, após a recolha da escassa informação existente sobre a área em estudo, e conscientes da quantidade de dados exigida pelos métodos mais detalhados (modelos físicos, actualmente muito difundidos na comunidade científica), optámos por outra perspectiva de análise, que considera o hidrossistema como uma 'caixa-negra' (*black-box method*). De acordo com este método, as características internas do hidrossistema são completamente desconhecidas *a priori*, sendo o seu funcionamento estudado através de um modelo de *input-output*, assente nos dados da precipitação e do caudal (perspectiva funcional, iniciada por Mangin). Os métodos que se baseiam em modelos de 'caixa-negra' são, inclusive, os mais utilizados na actualidade, dada a grande complexidade dos métodos baseados em modelos físico-matemáticos (Jukic e Denic-Jukic, 2009).

O método de 'caixa-negra' implica a análise matemática das séries temporais da precipitação e do caudal das surgências, entendendo-se este como a resposta hidrogeológica global do hidrossistema à recarga. Embora se baseie em interpretações físicas bastante simples do processo de transformação do *input* em *output*, este método consegue individualizar a influência dos diferentes tipos de recarga (concentrada ou difusa) e dos vários modos de circulação criptorreica – poros, fissuras, fracturas ou condutas (Sauter, 1992; Bonacci, 1993; Padilla *et al.*, 1994; Kovács *et al.*, 2005; Geyer *et al.*, 2008). Para além disso, consegue demonstrar o contributo funcional das diferentes zonas do hidrossistema no gerar do escoamento drenado pelas surgências (Mangin, 1975, 1984, 1994; Kiraly *et al.*, 1995; Marsaud, 1996; Trcek, 2007) e lidar com a não-linearidade destes meios, uma das características mais complexas e difíceis de modelar nos aquíferos cársicos (Tritz, 2011).

Contribuíram, igualmente, para esta escolha, por um lado, o tratar-se de um método simples, prático, de fácil implementação, amplamente testado e de aceitação científica generalizada (Labat *et al.*, 2000; Taylor e Greene, 2001; Mathevet *et al.*, 2004; Gárfias-Soliz *et al.*, 2010) e, por outro lado, a sua capacidade em fornecer, ainda que indirectamente, informação valiosa sobre as características internas de um hidrossistema, muito pouco estudadas até ao momento na área de estudo.

De entre as técnicas que compõem este método, e na sequência das limitações de dados que possuíamos, enveredámos pelo estudo da relação precipitação-caudal a partir do estudo do hidrograma: análise de séries temporais (*time-series analysis*) e análise da curva de recessão (*recession curve analysis*)¹. De acordo com vários autores que se vêm

¹ Ambos os métodos (*análise de séries temporais* e *análise da curva de recessão*) serão explicados aprofundadamente mais adiante, aquando da sua aplicação ao estudo do hidrossistema de Degraças-Sicó (Parte II – Capítulo IV).

dedicando a esta temática, os estudos baseados nas séries de caudal representam um modo muito importante de determinação de informação sobre a estrutura global do hidrossistema cársico.

A capacidade e a eficiência deste método, centrado na análise do caudal das surgências, prendem-se com o facto de a forma do hidrograma ser considerada uma transcrição da estrutura interna do hidrossistema, de parâmetros hidrodinâmicos (como a transmissividade e o armazenamento), dos processos de circulação subterrânea, dos diferentes tipos de reservas aquíferas e do seu próprio funcionamento hidrodinâmico (Soulios, 1991; Padilla *et al.*, 1994; Eisenlohr *et al.*, 1997; Labat *et al.*, 1999; El-Hakim e Bakalowicz, 2007).

As inúmeras vantagens apontadas a este método apenas se contrapõe uma limitação, sublinhada por alguns autores, e que se prende com as interpretações/lações estarem relacionadas com a resposta do hidrossistema no seu todo (e não de um sector em particular), resposta que varia em função de uma multitude de variáveis, o que pode tornar a interpretação problemática e, por vezes, confusa e ambígua (Grasso, 1999). Também Jeannin e Sauter (1998) expressam a opinião de que as inferências sobre a estrutura dos hidrossistemas cársicos e a sua classificação com base no hidrograma não são conclusivas, uma vez que a forma dos hidrogramas está fortemente relacionada com a frequência dos episódios pluviosos.

No presente estudo, esta limitação, que poderia comprometer o rigor da análise pretendida, obrigou a que acrescentássemos, à análise do hidrograma, o estudo das variações da temperatura e da condutividade eléctrica da água da principal exurgência deste hidrossistema (Olhos d'Água do Anços).

Assim sendo, em termos metodológicos, a presente investigação centra-se no estudo da relação *input-output* através da análise das séries temporais da precipitação e do caudal (quantidade, características físicas e respectivas variações), considerando o hidrossistema como uma 'caixa-negra', de forma a compreender o comportamento hidrodinâmico deste sistema cársico e a inferir algumas das suas características internas, conforme o esquematizado na Figura II.1.1.

Para além das justificações de cariz teórico e científico que apresentámos e da escassa informação espeleológica disponível, uma outra razão, de carácter prático, justifica a preferência por este método: o possuímos dados digitais rigorosos, minuciosos e actuais sobre a precipitação e o caudal. Esta informação decorre da existência de estações climatológicas na área de recarga (no Planalto Degracias-Alvorge e na Serra de Sicó) e de sondas de nível nas exurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão (os dois principais exutórios deste hidrossistema cársico), todas elas instaladas no âmbito deste trabalho, processo que detalharemos um pouco mais adiante. Assim, no que se refere ao *input*, considerámos a precipitação instantânea da estação climatológica da Sra. da Estrela (sector oeste do

135

Planalto de Degracias-Alvorge) e, no *output*, o caudal dos Olhos d'Água do Anços e, pontualmente, o caudal do Ourão (vale do rio Anços – bordadura oeste do hidrossistema).

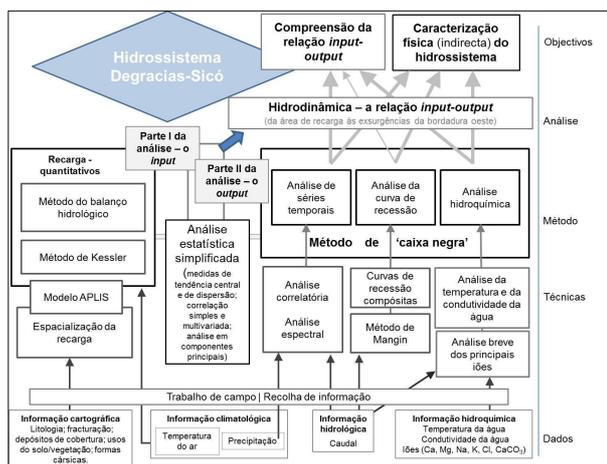


Figura II.1.1 – Esquema metodológico e sequencial da análise do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó na presente investigação

Numa explicação mais pormenorizada e sequencial das técnicas de análise utilizadas, a primeira abordagem analítica focou-se no estudo de séries temporais (*time series analysis*), ferramenta estatística que fornece uma caracterização inicial da hidrodinâmica e das características e organização internas de um hidrossistema. Devido ao carácter semi-quantitativo das ilações retiradas com esta técnica, aplicou-se, em seguida, a *análise da curva de recessão*, o que permitiu a obtenção de parâmetros quantitativos.

De entre as várias técnicas existentes para a análise da curva de recessão², aplicaram-se, neste estudo, duas das mais divulgadas e utilizadas: (i) a decomposição da curva de recessão em múltiplas funções exponenciais, de acordo com o método proposto por Forkasiewicz e Paloc (1967) que forneceu uma ideia inicial do contributo e da resposta

² Referidas e explicadas detalhadamente em: Tallaksen (1995); Dewandel *et al.* (2003); Ford e Williams (2007).

hidrológica dos diferentes domínios internos do hidrossistema; (ii) o método de Mangin (1975) que se baseia na divisão da curva de recessão em dois segmentos, um com função exponencial (esgotamento) e outro com função homográfica (decrecimento).

A opção pelo método de Mangin, como procedimento central na análise da curva de recessão, justificou-se, de acordo com a vasta bibliografia consultada, pelas seguintes razões: (i) simplicidade das suas expressões matemáticas e os poucos parâmetros que requerem; (ii) aceitação científica generalizada, atestada pelos inúmeros artigos e relatórios técnicos que o utilizam; (iii) permitir, com uma só expressão matemática, analisar as condições de circulação na zona não-saturada e a capacidade de armazenamento na zona saturada; (iv) ser um dos métodos que melhor se ajusta aos dados reais e que, por isso, apresenta, normalmente, o menor valor de erro nas simulações matemático-computacionais; (v) possibilitar a classificação dos hidrossistemas cársicos e, conseqüentemente, a comparação entre eles.

A completar esta análise, e dado que a caracterização do sistema cársico e do seu funcionamento hidrológico deve ser efectuada com base em vários métodos (confrontando os resultados obtidos), decidimos fazer um estudo das características físico-químicas das águas drenadas pela principal exsurgência do hidrossistema em estudo, tal como já referimos anteriormente. No entanto, não foi possível concretizar na íntegra esta intenção, dado não termos conseguido realizar a quantidade de análises laboratoriais pretendida e desejável e de se restringirem apenas a 1 ano hidrológico. Desse modo, vimo-nos cingidos a considerar apenas o registo contínuo da condutividade eléctrica e da temperatura da água nos Olhos d'Água do Anços, informação que permitiu uma análise bastante completa e aprofundada do comportamento subterrâneo das águas drenadas por esta exsurgência. Assim sendo, foi possível completar o estudo sobre a hidrodinâmica do Maciço Cársico de Sicó, acrescentando mais informação e, simultaneamente, cimentando os conhecimentos sobre as suas características internas inferidas pelos métodos anteriores e, assim, evitar interpretações parciais e provavelmente erróneas.

Ainda em termos metodológicos, de salientar que: (i) na maioria da análise (particularmente no estudo pormenorizado da curva de recessão e em algumas operações na análise de séries temporais) apenas são utilizados os dados da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços. A opção por não considerar, em determinados pontos desta investigação, a exsurgência do Ourão justifica-se pela sua forma em represa (de origem antrópica), que amortecia os picos de descarga e sobrestima os caudais de estiagem, falseando claramente a relação *input-output* e, conseqüentemente, induzindo em erro aquando da inferência das propriedades internas do hidrossistema. No entanto, sempre que tal alteração antrópica não interfira prejudicialmente no comportamento geral do caudal e possa acrescentar informação útil ao presente estudo (por exemplo na caracterização geral da descarga), os valores de

137

caudal do Ourão serão considerados, tal como explicado anteriormente; (ii) neste trabalho não será possível utilizar informação piezométrica (precioso auxiliar nos estudos de hidrodinâmica cársica), uma vez que não existem dados nem tão pouco é possível a sua obtenção, dado estarmos na presença de um maciço cársico com cerca de 300 metros de espessura (entre a superfície de recarga e o nível das exsurgências).

2. A obtenção e recolha de dados – considerações metodológicas

2.1. A instalação de novas estações climatológicas

No seguimento dos objectivos e da metodologia estabelecidos para este estudo, e após a inventariação dos dados climatológicos existentes para o Maciço Cársico de Sicó e área circundante (dados esparsos, pouco pormenorizados, séries com muitos hiatos), tornou-se imperioso a instalação de estações climatológicas na área em estudo. Estes instrumentos permitiriam a obtenção de informação digital contínua, rigorosa e pormenorizada relativa à precipitação e à temperatura do ar, variáveis cruciais no estudo da hidrodinâmica do referido maciço cársico, em especial do processo de recarga.

Numa primeira abordagem, de carácter geral, era necessário conhecer minuciosamente a precipitação (quantidade, ritmo, intensidade), caída nos diferentes sectores do Maciço, em particular nas áreas de recarga (Planalto Degracias-Alvorge e Serras de Sicó e de Degracias). Assim, e com base no trabalho de Cunha (1988), decidimo-nos pela instalação de três novas estações, compostas por um pluviógrafo e por um termohigrómetro digitais – Senhora da Estrela (379 m), Alvorge (325 m) e Serra de Sicó (550 m).

A localização escolhida cumpriu plenamente a recomendação de densidade de estações climatológicas em regiões cársicas montanhosas de uma estação para cada 25-50 Km² (LaMoreaux *et al.*, 1984).

A estação climatológica da Senhora da Estrela, pela sua localização no extremo oeste do Planalto Degracias-Alvorge, é a mais exposta às massas de ar provenientes do Atlântico, que encontram aqui o primeiro obstáculo orográfico à sua progressão para leste. Para além disso, encontra-se numa posição sobranceira ao alinhamento de exsurgências do vale do rio Anços, pelo que se encontra num dos principais pontos de recarga destas nascentes cársicas. Acresce ainda o facto de se localizar à mesma cota altitudinal da estação udográfica de Degracias, aspecto extremamente importante, já que esta última é a única estação no interior da área em estudo e que será, por isso, tida como referência ao longo deste trabalho (em especial na análise da recarga).

A estação de Alvorge localiza-se no extremo leste do Maciço Cársico de Sicó, paralelamente à da Senhora da Estrela, ou seja, na continuação da progressão para leste

das massas de ar provenientes de oeste que vão descarregando a sua humidade sobre a área de recarga. Assim, a expectativa seria, por um lado, conhecer minuciosamente os quantitativos pluviométricos precipitados nesta área planáltica de recarga e, por outro lado, constatar a distribuição espacial da recarga do hidrossistema durante um episódio pluvioso, facto que seria relacionado com o tempo de resposta das exsurgências estudadas, no intuito de compreender melhor a circulação subterrânea.

No caso da estação da Serra de Sicó, a sua instalação deve-se sobretudo ao facto de se tratar do ponto mais alto de toda a área de recarga, por norma onde se regista mais precipitação e temperaturas mais baixas. Para além disso, a sua disposição grosseiramente NW-SE constitui uma primeira e importante barreira à progressão sobre território continental das massas de ar húmidas do quadrante sudoeste, normalmente responsáveis por elevados quantitativos pluviométricos.

Acresce ainda às razões científicas que ditaram a necessidade de instalação das estações climatológicas (e do local escolhido) o facto de, para toda a área planáltica e serra de Sicó, o único posto udográfico existente (Degracias) ter estado, nos últimos anos, sem manutenção por parte das entidades competentes, com falha e degradação dos dados.

2.2. Os dados relativos às exsurgências do bordo oeste do hidrossistema em estudo

Um dos principais problemas com que nos deparámos no início desta investigação foi a inexistência de séries de dados contínuas, com consistência e pormenor, relativas aos caudais das exsurgências que drenam para o vale do rio Anços. A informação de que dispúnhamos era grosseira, esparsa e dispersa por uma série de artigos científicos, teses e relatórios técnicos, de que se destacam Cunha (1988); Carreira (1986); Peixinho de Cristo (1997) e Almeida *et al.* (2000). Nestes trabalhos, os valores apresentados eram apenas totais anuais ou somente valores médios e pontuais e, portanto, sem o pormenor e a periodicidade de que necessitávamos.

A obtenção de dados, temporal e quantitativamente rigorosos e contínuos, constituiu, assim, a nossa principal preocupação nesta fase, já que deles dependia o desenvolvimento de todo o trabalho a que nos havíamos proposto. Neste sentido, e com a colaboração da Administração de Região Hidrográfica do Centro (ARH Centro) foram instaladas duas sondas LevelTroll 500 que, dispondo de *datalogger* interno, registariam e guardariam informação relativa ao nível instantâneo e à temperatura da água debitada. As exsurgências seleccionadas foram, necessariamente, as mais importantes no sistema de drenagem cársica no vale do Anços (Olhos d'Água do Anços, mais a montante, e Ourão, mais para jusante) – Figura II.1.1.3.

139

As sondas foram programadas para registarem informação com uma periodicidade de 20 minutos, intervalo que considerámos ajustado e muito razoável quer para a obtenção minuciosa de dados e detecção do início da resposta a episódios pluviosos, quer para o posterior manuseamento e tratamento informático dos registos.

Para as restantes exsurgências da bordadura oeste do hidrossistema em análise (algumas com pouco caudal e predominantemente temporárias) a solução passou pela medição pontual do caudal com micro-molinete ao longo das várias estações do ano. No caso das exsurgências monitorizadas por cada uma das sondas, o valor de caudal obtido por este método serviu para aferir os resultados obtidos a partir da conversão de níveis instantâneos (em metros) em caudal (m^3/s) através da curva de vazão, assunto que merecerá maior aprofundamento no ponto seguinte.

Para além desta informação quantitativa, de máxima importância, fomos acompanhando e registando com a periodicidade mais adequada a cada situação hidrometeorológica os valores *in loco* de pH, temperatura, condutividade e TDS (*Total Dissolved Solids*) para todas as exsurgências, mesmo as mais pequenas e efémeras. Na exsurgência dos Olhos d'Água do Anços, o principal exutório do hidrossistema, foi ainda instalada uma sonda – CTD Diver datalogger (Eijelkamp Company) – para registo contínuo da condutividade eléctrica e da temperatura da água.

Simultaneamente, fomos acompanhando e registando fotograficamente o funcionamento de todas as exsurgências, com particular interesse nas ocorrências hidrológicas mais extremas no sentido de documentar a sua hidrodinâmica e, eventualmente, confirmar alguns registos que nos parecessem mais dúbios.

2.3. Determinação da Curva de Vazão nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão

Olhos d'Água do Anços

A transformação dos valores de nível instantâneo da água (registados pela sonda) em caudal constituiu a tarefa mais complexa do início deste estudo, dado não existir curva de vazão para esta exsurgência e a forma natural do escoamento ter sido substancialmente alterada (construção de uma casa com vários desvios das águas da exsurgência e de uma estrutura de represamento – Figura II.1.2).



A – Águas altas (funcionamento principalmente como descarregador)
 B – Final de Primavera/Outono (funcionamento através dos orifícios)
 C – Final do Verão – (não há funcionamento da estrutura hidráulica. Apenas perdas por percolação)
 (ver esquema da Figura 11.1.3)

Figura 11.1.2 – Olhos d'Água do Anços em diferentes contextos hidrológicos sazonais

Os Olhos d'Água do Anços têm sido alvo de várias intervenções antrópicas, que modificaram substancialmente o escoamento subaéreo imediatamente a jusante das saídas da exurgência. Actualmente, a água drenada por esta nascente cársica já não corre livremente formando, de imediato, um curso de água como ocorria em situação natural, encontrando-se agora represada por um pequeno açude que se comporta como um descarregador (Figura 11.1.2), particularmente em situação de águas altas. Quando o caudal diminui consideravelmente, a água não ultrapassa esse descarregador, saindo apenas por alguns orifícios que, na maioria das vezes, se encontram obstruídos.

Para além da água que provém deste açude, no cálculo do valor total de caudal da exurgência, tem de se considerar também a quantidade de água que se escoia sob a forma de um pequeno curso de água que margina a casa (assinalado no canto superior esquerdo da foto A da Figura 11.1.2) e que resulta de um desvio construído por baixo da edificação, fazendo com que parte da água não chegue ao descarregador.

Constatada esta realidade, o caudal total da exurgência foi determinado como sendo o somatório da água que passa por estas duas secções de vazão, de características muito diferentes, o que obrigou ao cálculo do caudal total em duas operações: (i) calcular a quantidade de água que passa pela estrutura larga, em soleira, semelhante a um descarregador (o açude) e que representa a grande maioria da água drenada pela exurgência;

141

(ii) calcular a quantidade de água que forma o pequeno curso de água do outro lado da edificação.

No que se refere ao cálculo do caudal que se escoia pelo açude fomos obrigados a utilizar diferentes fórmulas matemáticas, dado que a descarga, consoante a altura da água, se processa por descarregador e/ou orifício (Figura 11.1.3), cada qual com uma fórmula própria no cálculo do caudal. O carácter complexo e pormenorizado destes cálculos decorre da constante observação *in loco* das condições de funcionamento do açude e das suas características físicas, o que revelou a necessidade de cálculos específicos consoante o contexto hidrológico e respectivo nível da água.

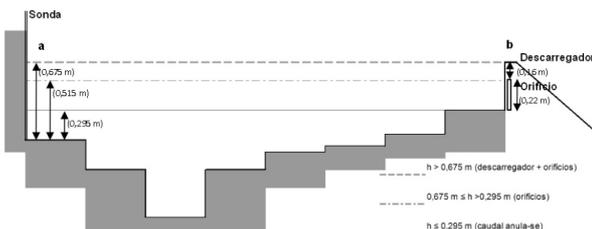


Figura 11.1.3 – Esquema da estrutura hidráulica nos Olhos d'Água do Anços e relação altura da água/funcionamento hidráulico para determinação do caudal (ver Figura 11.1.2)

Deste modo, sempre que a altura da água registada pela sonda (colocada junto às saídas principais da exurgência) for superior a 0,675 m (altura desde o nível zero da sonda ao topo do descarregador), o caudal é calculado com base na fórmula de um descarregador rectangular com soleira normal (espessa)³, em que a lei de vazão é dada por (Quintela, 1998) – equação 1:

$$Q = C b \sqrt{2g} H^{3/2}$$

Em que:

Q – Caudal
 b – largura do descarregador
 H – carga hidráulica⁴
 C – coeficiente de vazão
 g – aceleração da gravidade

³ A soleira de um descarregador diz-se normal quando a dimensão da crista (ponto mais alto do descarregador) tem dimensões não desprezáveis, como é o nosso caso. Em Hidráulica, diz-se que a soleira é normal relativamente a um determinado caudal se o seu perfil é tal que se verifica a pressão atmosférica local ao longo da soleira quando se escoia o caudal (Quintela, 1998).

⁴ Carga hidráulica – diferença de nível entre a linha de energia a montante e a crista da soleira descarregadora. Se a velocidade de aproximação ao descarregador for desprezável, a linha de energia coincide com a

Em situação de águas altas, o caudal nesta secção de vazão é obtido pela fórmula anterior, ao que acresce o valor escoado pelos orifícios, pelo que o caudal num determinado momento resulta da soma do valor obtido no descarregador com o valor obtido nos orifícios (para estes a equação utilizada será analisada de seguida).

Nas estações de transição e, particularmente na Primavera (Figura II.1.2B), o progressivo decréscimo da água drenada pela exsurgência traduz-se na também progressiva descida da altura da lâmina de água que passa por cima do descarregador. Durante vários meses, a água não transpõe o descarregador, deixando este de funcionar como tal, sendo o cálculo do caudal feito inteiramente com base no que é escoado pelos orifícios, considerando a fórmula de um orifício rectangular com dois bordos horizontais e largura b (Lencastre, 1996; Quintela, 1998) – Figura II.1.4 (equação 2):

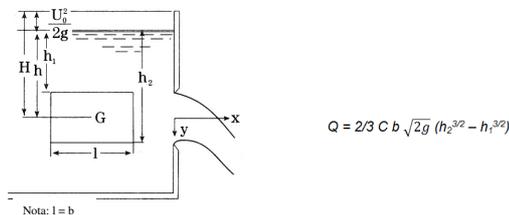


Figura II.1.4 – Equação e esquema da vazão subjacente à fórmula para caudal descarregado por orifícios rectangulares com dois bordos horizontais (modificado a partir de Lencastre, 1996)

Durante a época de estiagem, quando a diminuição da água na exsurgência é acentuada, os orifícios deixam de funcionar como tal e tornam-se pequenos descarregadores, pelo que o cálculo do caudal baseia-se novamente na fórmula anteriormente aplicada ao descarregador (equação 1). Esta situação ocorre sempre que a altura da água registada pela sonda se encontra entre os 0,515 m e os 0,295 m (Figura II.1.3). Este último valor corresponde à anulação do caudal, ou seja, abaixo deste nível, a água que sai da exsurgência (muito pouca) fica praticamente estagnada, não atingindo sequer a estrutura frontal do açude (Figura II.1.2C).

Relativamente ao cálculo do caudal drenado pelos orifícios há ainda que referir uma importante nota metodológica, já que tivemos necessidade de proceder a um pequeno

superfície livre, pelo que $H=h$. Como no nosso caso a água até chegar ao descarregador está relativamente açudada, diminuindo, assim, a velocidade, considerámos esta condição, pelo que H corresponde a h (altura da lâmina de água, ou seja, diferença entre o nível da superfície da água e a soleira do descarregador).

ajustamento. A recorrente observação dos três orifícios que existem no açude, particularmente na estação seca, revelou que estes se encontram extremamente obstruídos por pedras e vegetação aquática, sendo a origem, no primeiro caso, puramente antrópica.

Nesse sentido, e após termos convertido os valores do nível de água em caudal e os termos comparado com os valores obtidos em várias medições com micro-molinete, apercebemo-nos que não poderíamos contabilizar, para um mesmo momento, os três orifícios, sob pena de estarmos a sobrestimar demasiado os valores da vazão. Essa diferença (acréscimo) revelou-se muito acentuada na estação invernal, quando se verificam elevados caudais, o que poderia conduzir a valores exageradamente altos de caudal em ponta de cheia e a uma distorção dos valores totais da descarga (e da relação *input-output*). Por conseguinte, após várias experiências de cálculo com o caudal drenado pelos orifícios, concluímos que apenas poderíamos considerar o caudal correspondente a um orifício, o que, na realidade, resulta das pequenas contribuições fornecidas por cada um deles.

De realçar, ainda, que a obstrução propositada dos orifícios resulta em subidas do nível da água registadas pela sonda, mas que não são o reflexo do aumento da água debitada pela exsurgência, mas apenas de uma situação de interferência antrópica do normal funcionamento do açude. A falsa subida dos caudais bem como o seu decréscimo pontualmente muito acentuado é particularmente notória a partir do mês de Julho até finais de Setembro. Na sequência desta perturbação extremamente difícil de acompanhar e de contabilizar, introduzida pela actividade humana, no período Primavera-Outono, considerámos que seria metodologicamente preferível manter, para o cálculo do caudal, em todas as estações do ano, a situação supra-referida de contabilizar apenas a vazão de um orifício.

A metodologia utilizada na determinação do caudal na outra secção de vazão (secção menor) foi substancialmente diferente. Dada a inexistência de qualquer tipo de estrutura hidráulica no pequeno curso de água que permitisse a aplicação das fórmulas e leis hidráulicas anteriormente utilizadas, tivemos de recorrer a medições com micro-molinete para determinar a vazão naquela secção.

Assim, e após um vasto conjunto de medições em diferentes contextos hidrometeorológicos, conseguimos determinar, para um dado momento, o valor do caudal naquela secção, a sua relação com a altura da água no descarregador supra-referido e com o caudal escoado por essa mesma estrutura. Com base nesta relação entre as duas secções de vazão foi possível quantificar o contributo percentual do caudal escoado nesta pequena secção relativamente ao caudal total da exsurgência, valor que concluímos ser consideravelmente diferente ao longo do ano hidrológico (Quadro II.1.1).

Deste modo, é perfeitamente perceptível que a importância desta secção é muito elevada durante o estio quando perfaz a quase totalidade do caudal drenado pela exsurgência, já que a estrutura hidráulica ou não funciona por completo ou apenas debita uma

ínfima quantidade de água. Em sentido oposto, nas estações mais chuvosas, e particularmente no Inverno, a sua importância no cálculo final do caudal é pequena já que a quase totalidade da água é descarregada através da estrutura hidráulica (Figura II.1.5).

Quadro II.1.1 – Contributo da secção de vazão menor para o caudal total dos Olhos d'Água do Anços de acordo com a altura da lâmina de água no descarregador

Altura da água no descarregador (m)	Contributo para o caudal total (%)	Época do ano
0	70	Verão/início do Outono
0,01	50	
0,05	40	Outono e Primavera (estações intermédias)
0,12	30	
0,20	20	Fim do Outono / Inverno / Início da Primavera
0,30	10	



Figura II.1.5 – O contributo da secção menor de vazão para o total de caudal nos Olhos d'Água do Anços e a sua relação com a altura de água no descarregador – durante a estiagem (foto lado esquerdo) e no Inverno (foto lado direito)

Conhecidas, assim, as relações percentuais dos caudais medidos nesta secção menor com a altura da lâmina de água registada no descarregador (Quadro II.1.1), foi efectuado o ajuste de uma curva exponencial, da qual se obteve uma excelente aproximação aos valores medidos (Figura II.1.6), o que nos permitiu determinar o caudal que passa nesta secção e, consequentemente, o cálculo do valor total de caudal da exsurgência.

Assim, para cada altura de água no descarregador (h), foi possível calcular o valor percentual do caudal da secção menor relativamente ao caudal total da exsurgência através da seguinte fórmula (equação 3):

$$\text{Valor \% do caudal na secção menor} \quad (y) = 0,5943 e^{-5,823 \cdot h}$$

145

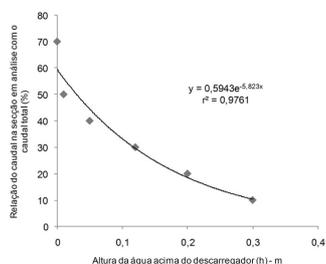


Figura II.1.6 – Curva exponencial ajustada aos valores medidos no campo (micro-molinete) e que mostram a relação percentual do caudal na secção de vazão menor com o caudal total da exsurgência em função da lâmina de água no descarregador

O valor de caudal foi obtido, assim, através do somatório do caudal descarregado pela estrutura hidráulica com o caudal do pequeno curso de água (secção de vazão menor) ou, no caso da estação estival, através apenas da vazão nesta pequena secção, pelas razões anteriormente explicadas.

Ourão

Esta exsurgência, de carácter permanente, constitui, juntamente com os Olhos d'Água do Anços, os dois principais exutórios do bordo oeste do hidrossistema de Degraças-Sicó. O cálculo do caudal drenado por esta exsurgência foi bastante complexo, resultado não só da sua forma em represa (e do facto da água se escoar por duas saídas de características substancialmente diferentes), mas sobretudo pela enorme e permanente interferência antrópica junto dessas saídas (Figura II.1.7). O distúrbio introduzido nos registos do nível da água (e o conseqüente erro na determinação do caudal) era de tal ordem, que cedo nos apercebemos de que os registos desta exsurgência apenas poderiam ser utilizados num âmbito geral e nunca em estudos recarga–descarga de pormenor.

Assim sendo, os valores de caudal aqui determinados apenas foram utilizados em cálculos sobre a quantidade total de água drenada pelo hidrossistema e na caracterização geral da sua hidrodinâmica. Isto porque se constatou que, para intervalos temporais maiores (semanais ou mensais), a configuração do hidrograma se aproximava bastante da dos Olhos d'Água do Anços. Em oposição, os registos mais detalhados (horários ou diários) eram de tal forma irregulares que qualquer tentativa de análise de pormenor à resposta da exsurgência a um episódio de recarga não teria qualquer validade.



Figura II.1.7 – Exurgência do Ourão (A – Perspectiva geral das 2 saídas (final do Verão); B – saída conducente a um canal de regadio; C – saída próxima da sonda instalada

O maior problema no cálculo do caudal a partir dos níveis instantâneos (digitais) verificou-se na saída mais próxima da sonda (Figura II.1.7C). A principal dificuldade prendeu-se com o facto de existir uma espécie de comporta de madeira de livre e fácil acesso que regula a quantidade de água debitada e que está permanentemente a ser movimentada, conforme as necessidades dos agricultores locais ou das pessoas que, um pouco a jusante desta saída, se servem da água para usos domésticos.

Para além das oscilações provocadas por esta subida/descida da comporta deparámo-nos ainda com constantes oscilações nos registos de nível da sonda (intra e inter diários) aparentemente inexplicáveis, já que não apresentavam qualquer relação com a precipitação nem com a referida comporta. O acompanhamento desta situação detectou mais um problema, ou seja, essas oscilações rítmicas e continuadas deviam-se à existência de um tubo de extracção de água para abastecimento público, muito próximo da sonda. A observação *in loco* permitiu ver que, quando as bombas de captação eram ligadas, o nível da

147

água ia progressivamente baixando, ainda que de modo quase imperceptível à vista desarmada, mas que ficava levemente marcado no muro onde está instalada a sonda.

Deste modo, e devido à dificuldade de acesso a um micro-molinete para proceder a uma campanha sistemática de medições nas mesmas condições de abertura da comporta e de captação de água que permitisse aferir a validade dos dados registados na sonda, vimo-nos obrigados a considerar como fiáveis os valores de caudal resultantes da aplicação de fórmulas matemáticas que se aproximassem o mais possível da realidade. A determinação da quantidade total de água escoada pela exurgência num dado momento (l/s ou m³/s) resultou do somatório da vazão de ambas as saídas, após a conversão dos níveis instantâneos registados pela sonda.

No caso da saída junto à sonda (orifício, cuja altura é definida pela subida ou descida da referida comporta) começámos por medir com bastante frequência a parte da comporta que estava submersa (em diferentes alturas do ano) e, a partir daí, estabelecemos um valor médio de 0,17 m. Assim, ao valor instantâneo medido pela sonda, retirávamos sempre este valor (0,17 m), encontrando o h (altura do orifício) – Figura II.1.7 e Figura II.1.8. A partir daqui, para o cálculo do caudal nesta saída, aplicámos a equação 2 dado estarmos, claramente, perante um orifício rectangular com dois bordos horizontais e paredes delgadas (Lencastre, 1996; Quintela, 1998). A justificação para a aplicação desta fórmula em detrimento de outras porventura um pouco mais rigorosas na medição exacta do caudal nesta situação, prendeu-se com a extrema dificuldade e mesmo impossibilidade de medição e observação de vários parâmetros físicos, já que a parte interior destas estruturas hidráulicas é inacessível.

O cálculo do caudal na outra saída, mais afastada do local onde foi instalada a sonda, depende claramente do nível da água na exurgência, podendo, por isso, assumir características de descarregador ou orifício (nível da água mais baixo e mais alto, respectivamente) – Figura II.1.7B e Figura II.1.8.

Quando o seu funcionamento é de um descarregador, assemelha-se claramente a um descarregador rectangular de soleira delgada, habitualmente designado por *descarregador Bazin* já que a parte da soleira que está em contacto com a água (tábua de madeira) tem dimensões muito reduzidas. Dada a existência desta tábua, que influencia nitidamente a quantidade de água debitada por este descarregador, o cálculo dos valores de caudal, levou a que efectuássemos, em primeiro lugar, a um vasto conjunto de medições para determinar com exactidão a altura de água que transpõe a referida tábua em relação ao nível registado naquele momento pela sonda, obtendo-se h (altura da lâmina de água).

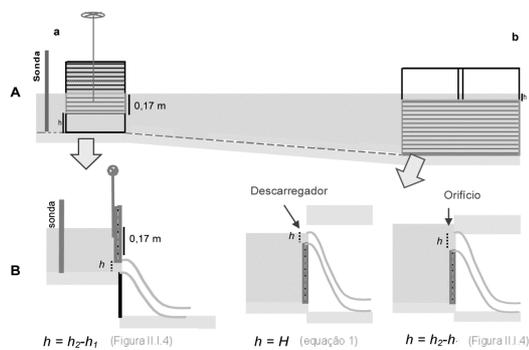


Figura II.1.8 – Esquema da estrutura hidráulica da exsurgência do Ourão e do seu funcionamento (A – visão frontal; B – visão de perfil das duas saídas de água da exsurgência. De salientar a representação do funcionamento hidráulico da saída mais afastada da sonda como descarregador e como orifício)

Uma vez determinada a altura da lâmina de água que passa naquela saída (ver esquema da Figura II.1.8), a fórmula aplicada para a obtenção do caudal descarregado foi (Lencastre, 1996) – equação 4:

$$Q = C b \sqrt{2g} h^{3/2}$$

Esta fórmula é, no nosso caso, semelhante à equação 1 (aplicada nos Olhos d'Água do Anços) já que a velocidade de chegada da água a este descarregador é desprezável (ver nota de rodapé 4), visto estarmos perante uma represa de dimensões consideráveis, onde a velocidade de deslocação da massa aquática é bastante baixa, particularmente em situação de menor altura da água. No caso em que esta saída funciona como um orifício, o procedimento metodológico foi semelhante ao funcionamento como descarregador, tendo diferido apenas a fórmula aplicada (equação 2). Assim, e após a determinação das características físicas desta secção de vazão e da sua relação com a altura da água registada pela sonda foi possível determinar o nível a partir do qual o funcionamento hidráulico deixa de ser de um tipo e passa a ser de outro.

CAPÍTULO II

A PRECIPITAÇÃO ENQUANTO INPUT DO HIDROSSISTEMA

1. O período 2009/2010 – 2012/2013

1.1. A obtenção dos dados: questões metodológicas

A precipitação, e muito particularmente a chuva, constitui a única fonte de recarga do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó, sendo a principal responsável pela configuração do hidrograma das exurgências que bordejam o Maciço Cársico. A variação nos caudais é, por isso, o reflexo de um determinado *input* que é transformado, pelo hidrossistema, em *output*, modificação essa que vai depender das características físicas internas do próprio Maciço. Nesse sentido, é de crucial importância o conhecimento da precipitação caída na área de recarga, já que é a sua quantidade e frequência, juntamente com a água armazenada no hidrossistema, que determinam se o impulso de recarga atravessa completamente o sistema ou se se acumula no seu interior (Ford e Williams, 2007).

O estudo minucioso da variabilidade temporal e espacial da precipitação na área de recarga das exurgências constituiu, desde o início, um aspecto nuclear deste trabalho, embora tenha ficado aquém do pretendido. Facto que se ficou a dever à ocorrência de falhas, por vezes prolongadas, nos registos de duas das estações udoográficas instaladas (estações da Serra de Sicó e de Alvorge), documentadas na Figura II.II.1.

As sucessivas dificuldades com que nos deparámos na fase inicial desta investigação atrasaram bastante o início do registo dos quantitativos de precipitação, a que se juntaram, posteriormente, problemas relacionados com situações meteorológicas adversas (vento

151

muito forte) e com a intervenção antrópica, situações que provocaram a interrupção dos registos pelo derrube e danos nos pluviómetros.



Figura II.II.1 – Inventariação dos dados das estações udoográficas instaladas na área de recarga (Sra. da Estrela, Alvorge e Serra de Sicó)

Estes problemas, juntamente com a avaria e falta de fiabilidade dos registos da estação de Alvorge, provocaram a perda irremediável de dados, em alguns casos durante vários meses, ao mesmo tempo que impossibilitaram o estudo da distribuição espacial da precipitação na área de recarga, tanto ao nível da caracterização geral quanto de episódios pluviosos.

Assim, para o período de estudo (2009/2010 – 2012/2013), a única estação que praticamente não sofreu perturbações no registo dos dados foi a Senhora da Estrela (sector oeste do Planalto Degracias-Alvorge), pelo que será a estação de referência na caracterização do regime pluviométrico da área de recarga e na análise da relação *input-output* no hidrossistema cársico em estudo.

No que concerne às restantes estações, a instalada no topo da Serra de Sicó (sector sul do hidrossistema) foi várias vezes derrubada pelo vento forte, característico deste local durante episódios meteorológicos severos, não tendo estado operacional durante o ano hidrológico de 2009/2010. Acresce ainda a falha ocorrida no período de Dezembro de 2012 a Março de 2013 devido a uma questão técnica. A estação de Alvorge (sector leste do hidrossistema) registou um problema técnico grave, pelo que foi impossível considerar fiáveis os seus registos a partir de Maio de 2011, situação que apenas foi detectada muito *a posteriori*, já na fase de análise dos dados aquando da comparação com os demais registos pluviométricos da própria estação e das outras duas estações udoográficas.

Como se pode ver na Figura II.II.1, a estação de Alvorge apenas funcionou em pleno durante o ano de 2009/2010 e parte de 2010/2011 (até Maio), data a partir da qual não considerámos a informação registada, uma vez que apresentava total desfazamento quantitativo quer com registos anteriores da própria estação quer com os das outras duas

estações (totais mensais sempre inferiores a 10 mm/mês). No caso da estação da Serra de Sicó, à excepção do ano de 2009/2010 pelas razões acima mencionadas, de assinalar apenas algumas falhas pontuais nos registos.

O preenchimento de falhas pontuais nos registos da estação de Sicó e de Alvorge foi efectuado através de regressão linear a partir dos dados de precipitação diária da estação da Sra. da Estrela, o que se justifica pela forte relação existente entre os dados recolhidos nestas estações, evidenciada pelos valores elevados do coeficiente de determinação e do coeficiente de correlação de Pearson – Figura II.II.2. O mesmo procedimento foi adoptado para preencher falhas pontuais nos registos da estação da Sra. da Estrela, aplicando a fórmula da recta de regressão linear a partir dos registos diários de Alvorge ou de Sicó ou, no caso de existirem dados em ambas as estações, a partir dos dados de Alvorge dada a relação entre elas ser mais forte, tal como mostra a Figura II.II.2.

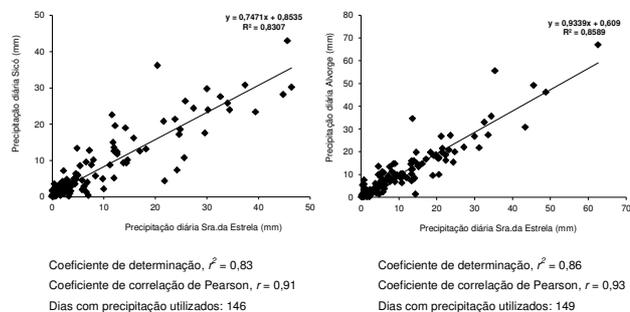


Figura II.II.2 – Fórmula da regressão linear utilizada para o preenchimento de falhas de dados nas estações de Sicó (a partir de Setembro de 2010) e de Alvorge (até Maio de 2011) a partir dos registos de precipitação diária da Sra. da Estrela. Coeficientes de determinação e de correlação de Pearson

No caso de ocorrer uma falha em simultâneo em todas as estações udoográficas (alguns casos no Inverno de 2012/2013), os dados para a Sra. da Estrela, enquanto estação principal nesta área, foram calculados pelo método supra-referido a partir dos registos de precipitação diária do Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra.

De salientar, também, que na caracterização pluviométrica da área em estudo comparámos os registos do período em análise com os dados da estação de Degraças ao longo

de 28 anos (1979/1980 – 2006/2007). Estes valores médios serviram como referência para os nossos registos de precipitação, sendo possível a partir daí, efectuar um estudo muito mais fundamentado e correcto do período 2009/2010 – 2012/2013. Esta situação foi particularmente importante na classificação hidroclimática anual e mensal, já que, sendo o período em estudo muito curto (apenas 4 anos), essa a classificação (baseada na divisão da série em quartis) não fazia grande sentido, pelo que foi claramente preferível reportar os valores registados no período em análise aos da série de referência (muito mais extensa, cumprindo praticamente o requisito de 30 anos estabelecidos pela Organização Meteorológica Mundial para a análise do clima).

1.2. Precipitação anual e mensal

Os quatro anos hidrológicos estudados (2009/2010 – 2012/2013) foram bastante semelhantes em termos de quantitativos pluviométricos anuais. Os dois primeiros anos registaram totais anuais muito próximos do valor médio da série de referência (Degraças) enquanto os dois últimos anos se afastaram consideravelmente desse valor, tendo registado os valores mínimo e máximo de precipitação anual neste período.

A classificação de cada ano em análise, em termos de totais pluviométricos anuais, foi realizada com base na classificação estabelecida para a estação de Degraças (1979/1980-2006/2007), baseada na divisão da série em percentis, já anteriormente apresentada (Quadro I.II.III.V). O mesmo procedimento foi efectuado para a precipitação mensal.

Deste modo, os valores anuais referentes à estação da Sra. da Estrela revelaram que os anos de 2009/2010 e 2010/2011 (com totais de 1278,3 mm e 1230,0 mm, respectivamente) foram anos tendencialmente húmidos, com totais de precipitação que, embora ligeiramente superiores, não se afastam muito do valor médio calculado para a estação de Degraças (1979/1980 – 2006/2007) – 1229 mm (Quadro II.II.I). Contrariamente, o ano de 2011/2012 foi extremamente seco, com apenas 688,7 mm (valor inferior ao percentil 10), num profundo contraste com o ano seguinte (2012/2013) que foi efectivamente húmido (1464,6 mm, ou seja, 19,3% superior à média). Os totais anuais das estações de Alvorge e Sicó revelaram, como seria de esperar, um comportamento idêntico ao da estação da Sra. da Estrela. Os registos desta última estação (a principal nos anos analisados) mostraram que se tratou de um período predominantemente húmido, em que dois dos quatro anos analisados registaram precipitação superior à média. Apenas o ano de 2011/2012 divergiu acentuadamente desta tendência, como referido anteriormente.

Quadro II.II.1 – Precipitação anual (2009/2010 – 2012/2013) nas estações da Sra. da Estrela, Alvorge e Sicó e respectivos desvios à média (estação de Degracias, 1979/1980 – 2006/2007)

Degracias (1979/80 - 2006/07)		mm	
Média	1228,7		
Mediana	1178,8		
Máximo	2045,8		
Mínimo	396,4		
Desvio à Média			
Sra. Estrela	mm	mm	%
2009/2010	1278,3	49,6	4,0
2010/2011	1230,0	1,3	0,1
2011/2012	688,7	-540,0	-43,9
2012/2013	1464,6	235,9	19,2
Média	1165,4	-63,3	-5,2
Desvio à Média			
Alvorge	mm	mm	%
2009/2010	1332,0	103,3	8,4
2010/2011	1133,4	-95,3	-7,8
2011/2012	-	-	-
2012/2013	-	-	-
Média	1232,7	4,0	0,3
Desvio à Média			
Sicó	mm	mm	%
2009/2010	-	-	-
2010/2011	1146,8	-81,9	-6,7
2011/2012	669,2	-559,5	-45,5
2012/2013	-	-	-
Média	908,0	-320,7	-26,1

O *índice de humidade* (Lencastre e Franco, 1992) entendido como a razão entre o módulo pluviométrico anual e o módulo pluviométrico médio da série (neste caso da estação de Degracias) conferiu ainda mais suporte e consistência às considerações anteriores. O cálculo determinou dois anos com resultados superiores a 1 (1,2 em 2012/2013 e 1,03 em 2009/2010), um resultado muito próximo de 1 (0,99 em 2010/2011) e um valor substancialmente inferior a 1 (0,6 em 2011/2012). Por conseguinte, podemos confirmar que o período em análise é composto por dois anos normais com precipitação um pouco acima da média – 2009/2010 e 2010/2011), um ano muito seco (2011/2012) e um ano húmido (2012/2013).

Não obstante as preciosas indicações para uma caracterização inicial, os valores anuais de precipitação possuem um carácter cumulativo e demasiadamente genérico que, embora sendo indicativo da quantidade de água susceptível de se infiltrar num hidrossistema, não consegue fornecer qualquer tipo de informação mais detalhada, imprescindível em estudos de hidrologia. Assim sendo, estes dados apenas são utilizados numa primeira abordagem,

155

de carácter global e introdutório, cabendo aos valores mensais e diários fornecer uma perspectiva mais pomenorizada e próxima da realidade na distribuição da precipitação ao longo do ano numa determinada área.

. O período mais chuvoso (Outubro/Novembro – Março/Abril)

No que respeita à precipitação mensal, para além do estudo dos registos mensais e da sua percentagem face ao total anual, procedemos à análise dos desvios desses totais mensais (em valores absolutos e percentuais) face aos valores médios (estação de Degracias), operação que permitiu uma melhor caracterização da quantidade e do ritmo da precipitação ocorrida neste período na área de recarga do hidrossistema de Degracias-Sicó¹.

No conjunto dos quatro anos, Novembro, Dezembro e Janeiro foram os meses mais chuvosos nas estações udográficas por nós instaladas, realidade muito semelhante à da estação de referência (Figura II.II.3). A soma da precipitação registada nestes três meses totaliza quase metade da precipitação anual (entre 44% e 47%). O mês de Novembro foi o que registou, em todas as estações, valores acima da média, tendo contribuído para esta situação os totais anormalmente elevados de Novembro de 2009 (superiores a 250 mm na Senhora da Estrela e no Alvorge), tendo sido, por isso, considerado como um mês muito húmido (acima do 80º percentil da série de referência).

O ano hidrológico de 2009/2010 caracterizou-se, aliás, por quantitativos pluviométricos bastante acima da média de Novembro a Março em ambas as estações em funcionamento neste ano (Sra. da Estrela e Alvorge). Destacam-se, para além de Novembro (mais 83% do que a média), os meses de Dezembro (mais 51% de precipitação), Fevereiro (mais do dobro do valor médio) e Março (mais 64%), todos eles meses de crucial importância para a recarga do hidrossistema. O mês de Fevereiro, extremamente chuvoso nesse ano, foi, inclusive, um dos mais chuvosos desde que há registos na região (acima do 90º percentil). O mês de Março apresentou um comportamento semelhante ao de Fevereiro, com elevado desvio positivo à média, apresentando, deste modo, um comportamento contrário à tendência de decréscimo acentuado da precipitação para estes dois meses na área em estudo e região circundante (ver Quadro I.II.III.VI e Figura I.II.III.5). De salientar que neste ano hidrológico, os três meses mais chuvosos (Novembro, Dezembro e Fevereiro) registaram

¹ De sublinhar que a análise aqui efectuada apenas abordará as situações pluviométricas mais relevantes e de carácter mais geral, reportando-as à série de referência, de forma a que a análise, e o texto daí decorrente, não se tornem demasiado descritivos e repetitivos. Decisão que se justifica pelo elevado número de particularidades ocorridas em virtude da heterogeneidade pluviométrica do período em estudo e pela enorme irregularidade inter e intramensal em cada um dos quatro anos estudados. Acresce ainda que uma análise mais exaustiva da precipitação neste ponto do trabalho (episódios isolados ou dados horários, por exemplo) estaria em repetição com capítulos futuros (estudo da recarga e da relação precipitação – caudal) onde é muito mais pertinente esse tipo de análise minuciosa, uma vez que a precipitação constituiu o único *input* deste hidrossistema.

totais mensais acima de 220 mm, totalizando, no seu conjunto, cerca de metade do total anual de precipitação (55% na estação da Sra. da Estrela e 49% no Alvorge), valor bastante superior ao da estação de referência (apenas 38%).

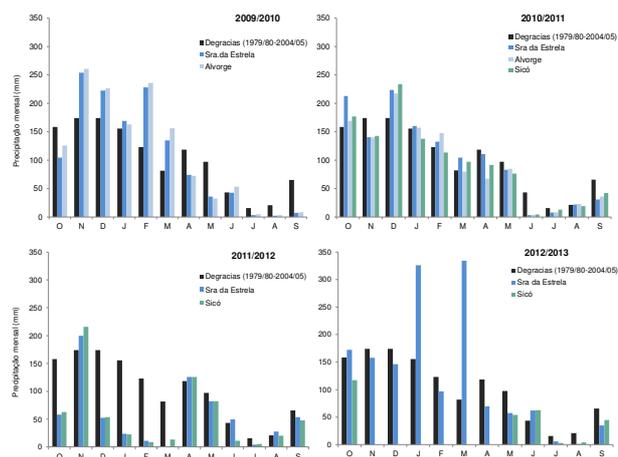


Figura II.II.3 – Precipitação mensal nas estações da Sra. da Estrela, Alvorge e Sicó comparativamente à série de referência (Degracias) por ano hidrológico

Em termos hidrológicos, esta anomalia positiva ao longo de todo o período invernal, particularmente em Fevereiro e Março de 2010, traduziu-se num aumento da água armazenada no hidrossistema, contribuindo para que o declive da curva de decrescimento do hidrograma da exsurgência Olhos d'Água do Anços tenha sido bem menos acentuado quando comparado com o ano de 2010/2011, apesar da proximidade dos totais pluviométricos.

O ano de 2010/2011, apesar de um total pluviométrico muito próximo ao do ano anterior, não registou uma tão grande concentração nos meses de final de Outono e Inverno. A precipitação distribuiu-se de forma mais equitativa pelos meses do período chuvoso, estendendo-se até ao final de Maio, com os quantitativos mensais em todas as estações (Sra. da Estrela, Alvorge e Sicó) a aproximarem-se muito dos valores da estação

157

de Degracias (série de referência). A atestar essa distribuição mais parcimoniosa está o facto de, no seu conjunto, a precipitação acumulada nos três meses mais chuvosos (Novembro, Dezembro e Janeiro) ter representado apenas 42% do total anual (em comparação com os 55% do ano anterior). Apenas de realçar o valor bastante elevado do mês de Dezembro (223 mm na Sra. da Estrela), um desvio positivo de cerca de 29% em relação à normal pluviométrica de Degracias para esse mês (Figura II.II.4B).

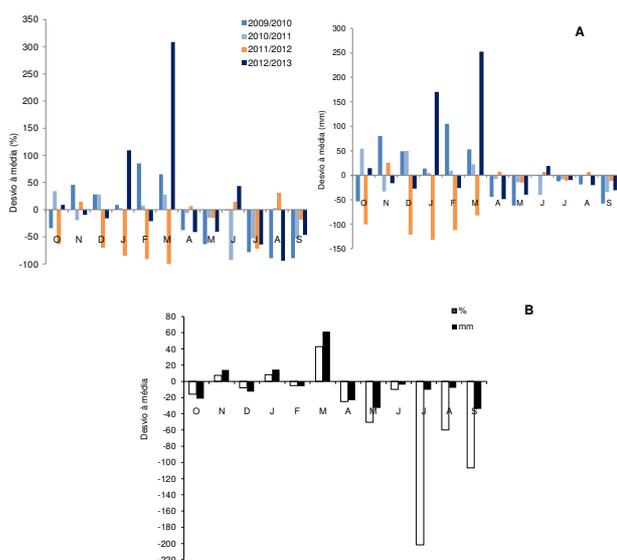


Figura II.II.4 – Desvios (em percentagem e em milímetros) dos valores mensais de precipitação da estação udográfica da Sra. da Estrela por ano hidrológico (A) e em relação à média (Degracias, 1979/1980 – 2006/2007) no período 2009/2010 – 2012/2013

Os dois últimos anos em estudo (2011/2012 e 2012/2013) foram profundamente desiguais entre si e em relação aos anteriores, apresentando fortíssimas anomalias face às

características pluviométricas médias da região. O ano de **2011/2012** caracterizou-se por uma enorme escassez de precipitação entre Outubro e Março, apenas interrompida no mês de Novembro, onde se verificaram quantitativos ligeiramente superiores aos normais para este mês. Os desvios à média nas estações da Sra. da Estrela e Sicó foram, em todos esses meses, fortemente negativos (-70% em Outubro; -70% em Dezembro; -85% em Janeiro e -92% em Fevereiro e Março) – Figura II.11.4, tendo sido a precipitação acumulada desde o início de Dezembro ao final de Março de apenas 12% da precipitação normalmente acumulada no mesmo período na série de referência.

De sublinhar que nos meses de Fevereiro e Março praticamente não se verificou precipitação (totais mensais inferiores a 14 mm), acentuando a seca meteorológica que se fazia sentir desde Dezembro de 2011. Esta anomalia é facilmente constatada nos gráficos da Figura II.11.4B, relativos aos registos pluviométricos da estação da Sra. da Estrela, onde se pode ver os desvios fortemente negativos em relação à média, que se estendem de Dezembro a Março.

Estes registos encontram-se em total consonância com os apresentados pelo antigo Instituto de Meteorologia para a região em estudo e para Portugal continental, entidade que classificou o Inverno de 2011/2012 como 'extremamente seco', tendo a precipitação acumulada entre Dezembro e Fevereiro sido inferior a 25% da precipitação acumulada normal (1971-2000) para a área em estudo (Instituto de Meteorologia, 2012). Esta seca meteorológica apenas foi interrompida em Abril, com as estações da Sra. da Estrela e de Sicó a registarem valores mensais ligeiramente superiores à média.

O ano hidrológico de **2012/2013** foi marcado pela ocorrência de dois picos excepcionalmente elevados de precipitação, o primeiro em Janeiro (326 mm) e o segundo em Março (334 mm), que constituíram um enorme desvio à média da série de referência.

De acordo com os registos da Sra. da Estrela (a única a funcionar no Inverno deste ano), esses desvios foram de 170 mm em Janeiro e 252 mm em Março, o que significou, mais do dobro da precipitação normal em Janeiro e três vezes mais em Março. De referir que no mês de Março, na série de referência, não há registo de valores tão elevados de precipitação e, no caso do mês de Janeiro, apenas em dois invernos extremamente chuvosos (1995/1996 e 2000/2001) ocorreram valores superiores. No seu conjunto, nestes dois meses ocorreu cerca de 45% da precipitação anual total.

Quantitativos de tal modo elevados no Inverno e início de Primavera em 2012/2013 traduziram-se numa enorme disponibilidade de água para recarga do hidrossistema e na abundância de água drenada pelas exsurgências, como veremos mais à frente neste trabalho. Os restantes meses do período húmido (Outubro – Abril/Maio) registaram valores muito próximos dos da série de referência.

159

. O período de menor precipitação (Maio/Junho – Setembro)

No conjunto dos quatro anos verificou-se que a precipitação foi inferior à média de Abril a Outubro – Figura II.11.4A. Os meses de Abril e Maio registaram desvios negativos médios de, respectivamente, -26% e -36%, pelo que Abril não seguiu a tendência de se constituir como o pico secundário de precipitação nesta região, enquanto Maio corroborou a tendência de descida da precipitação que vem caracterizando este mês nas últimas três décadas (Quadro I.11.III.VI). Este comportamento da precipitação tem-se traduzido, assim, na antecipação do início da estação seca e, conseqüentemente, na sua maior duração.

Os desvios negativos foram particularmente acentuados nos meses de Verão (Julho, Agosto e Setembro), característica comum a todos os anos analisados, mas com especial ênfase em 2009/2010, onde praticamente não se registou precipitação nesses três meses (total acumulado de 12,8 mm), correspondendo a desvios negativos próximos dos 80% e 90%. À exceção do ano anómalo de 2011/2012, a precipitação acumulada ao longo desses três meses foi em todos os anos inferior a 10% da precipitação anual, vincando as características de secura do clima desta região nos meses de Verão.

Se analisarmos a estação udográfica central nesta investigação (Sra. da Estrela) verificamos que os desvios negativos em relação à média de Abril a Setembro ocorreram em todos os anos de estudo, tendo sido raras as situações em que isso não aconteceu. Esses desvios foram percentualmente elevados, embora em termos quantitativos tenham sido de menor importância já que se trata de meses com baixos valores de precipitação.

Em termos hidrológicos, esses desvios percentuais fortemente negativos no conjunto dos quatro anos analisados (entre Julho e Setembro) não tiveram qualquer influência na hidrodinâmica cársica, uma vez que, tratando-se de totais muito baixos (inferiores a 4 mm nos meses mais secos), perdem-se, quase de imediato, por evaporação (temperaturas mais elevadas, típicas destes meses).

No entanto, se a escassa precipitação (e respectivos desvios negativos) ocorrida no período estival não é preocupante do ponto de vista hidrológico, sendo uma característica comum nas áreas mediterrânicas, a precipitação abaixo da média registada em Abril e Maio e em Setembro e Outubro pode ter repercussões mais graves do ponto de vista da recarga do hidrossistema. Isto porque, para além da antecipação do início da estação seca está a verificar-se o seu prolongamento para os meses outonais de Setembro e Outubro, aumentando, deste modo, a duração da estação seca e diminuindo, conseqüentemente, o período de recarga. De salientar, por isso, que no período em estudo, para além do Verão ter registado muito menos precipitação do que a média da série de referência, o início do ano hidrológico caracterizou-se, no conjunto dos quatro anos analisados, por quantitativos pluviométricos também inferiores à média.

De um modo geral, a partir da análise da precipitação mensal pode afirmar-se que, à excepção do ano de 2011/2012, os anos hidrológicos em análise apresentaram um comportamento sazonal muito contrastado, principalmente quando comparado com a série de referência, com valores de precipitação mensal superiores à média na estação mais chuvosa (de Novembro a Março) e bastante inferiores à média na Primavera, Verão e princípio do Outono.

No que respeita à distribuição espacial da precipitação, não se verificaram diferenças substanciais entre as três estações udográficas instaladas (Figura II.11.5), o que se justifica pelo facto de estarmos perante uma área não muito grande (cerca de 100 Km²) e com características altitudinais e de exposição aos ventos relativamente semelhantes. Esta realidade é confirmada pelos valores de correlação de Pearson entre os registos diários da Sra. da Estrela e de Alvorge ($r = 0,93$) e da Sra. da Estrela e de Sicó ($r = 0,91$).

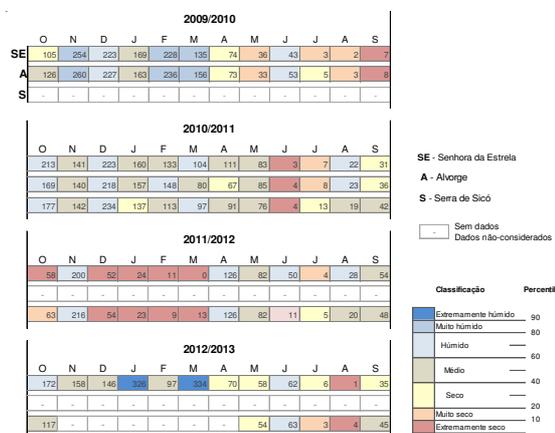


Figura II.11.5 – Classificação pluviométrica mensal para as estações da Sra. da Estrela, Alvorge e Sicó, por ano hidrológico, segundo o método da divisão da série em percentis

Como se constata na Figura II.11.5, nos quatro anos estudados, os valores mensais da precipitação não são muito diferentes entre as várias estações, existindo apenas,

pontualmente, ligeiras variações. As maiores diferenças entre estas estações verificaram-se nos meses de Junho a Setembro, não tendo, por conseguinte, grande significado quantitativo, dado tratar-se de meses com escassa precipitação, em que a diferença não ultrapassa os 10 mm mensais. Podem ocorrer algumas diferenças um pouco mais acentuadas em Abril e Outubro, mas sem que se consiga estabelecer qualquer padrão espacial.

Verifica-se, portanto, uma grande proximidade no que respeita aos totais mensais, sendo ainda frequente as três estações pertencerem à mesma classe (na classificação pluviométrica) ou, quando tal não se verifica, estarem em classes adjacentes. No entanto, o curto período em análise e os prolongados hiatos nas estações de Alvorge e de Sicó não permitem o retirar de conclusões sobre a repartição espacial da precipitação na área de recarga, como previmos inicialmente.

1.3. Precipitação diária

No âmbito da relação minuciosa que pretendemos estabelecer entre os quantitativos pluviométricos infiltrados na área de recarga e a resposta do hidrossistema através do caudal das exurgências, o estudo detalhado dos valores diários de precipitação assumiu uma importância central. Assim sendo, e considerando o tipo de análise pretendida, apenas considerámos e analisámos os totais diários medidos na estação da Sra. da Estrela, uma vez que é a única estação com muito poucas interrupções nos registos.

Ao longo do período em análise (2009/2010 – 2012/2013) ocorreu, anualmente, um número considerável de dias com precipitação² (140 dias para o conjunto dos anos, valor superior aos 127 dias da série de referência), distribuindo-se principalmente entre Novembro e Abril, meses em que cerca de metade dos dias registou precipitação.

O ano de 2012/2013 foi aquele em que se verificou o valor mais elevado de dias com precipitação (163 dias, ou seja, quase metade do ano). Curiosamente, o ano de 2011/2012, apesar de ter registado o menor número de dias com precipitação, em resultado da seca meteorológica de Dezembro a Março, totalizou 117 dias com precipitação. No entanto, numa análise mais atenta compreende-se que a precipitação ocorrida nesse ano foi, sobretudo, precipitação fraca, com 64% dos dias com quantitativos inferiores a 10 mm, percentagem que nos restantes três anos se queda pelos 50-55%.

O Quadro II.11.11 permite ver que, no conjunto dos quatro anos em análise, foram os meses de Novembro e Dezembro que registaram o maior número de dias com precipitação

² Consideramos dias com precipitação, os dias cujo valor total é $\geq 0,2$ mm (e não o normalmente considerado, de 0,1 mm). Esta situação justifica-se pelas características e pela configuração dos pluviómetros por nós instalados, cujo mínimo de registo na precipitação é de 0,2 mm.

(19 dias e 17 dias, respectivamente), apresentando o mesmo padrão de distribuição mensal que a estação de referência. No mês de Março registaram-se também muitos dias com precipitação, embora essa situação não sobressaia no conjunto do período analisado, devido à ausência de precipitação em Março de 2012, o que faz descer o valor médio deste mês. Na estação de referência, esse aumento primaveril de dias com precipitação é característico do mês de Abril.

Quadro II.II.II – Número (total) de dias com precipitação ($\geq 0,2$ mm), com precipitação moderada (10-20 mm) e com precipitação elevada (> 20 mm) na Sra. da Estrela nos anos hidrológicos de 2009/2010 a 2012/2013 e número (médio) de dias, nas mesmas classes, na série de referência (Degraças, 1979/1980 – 2006/2007)

Degraças (1979/1980 - 2006/2007)													
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Ano
Nº médio de dias com precipitação $\geq 0,2$ mm	14	15	15	14	12	11	14	11	6	4	4	8	127
Nº médio de dias com precipitação 10 - 20 mm	5	7	7	5	4	3	6	3	2	0	0	1	43
Nº médio de dias com precipitação > 20 mm	2	3	3	2	2	1	1	1	0	0	0	1	16

2009/2010 - 2012/2013													
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Ano
Nº médio de dias com precipitação $\geq 0,2$ mm	12	19	17	15	16	15	15	11	6	5	4	5	140
Nº médio de dias com precipitação 10 - 20 mm	6	7	5	7	5	6	4	3	2	0	1	1	46
Nº médio de dias com precipitação > 20 mm	3	3	3	3	2	3	2	1	0	0	0	1	20

2009/2010													
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Ano
Nº de dias com precipitação $\geq 0,2$ mm	14	21	18	13	21	17	14	11	5	4	2	3	143
Nº de dias com precipitação 10 - 20 mm	1	6	7	7	11	7	5	2	4	0	0	0	50
Nº de dias com precipitação > 20 mm	2	3	5	3	4	3	0	0	0	0	0	0	20

2010/2011													
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Ano
Nº de dias com precipitação $\geq 0,2$ mm	14	17	19	16	12	15	9	12	2	5	5	12	138
Nº de dias com precipitação 10 - 20 mm	7	6	9	5	4	4	4	3	0	0	1	1	44
Nº de dias com precipitação > 20 mm	6	2	4	1	3	1	3	1	0	0	0	1	22

2011/2012													
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Ano
Nº de dias com precipitação $\geq 0,2$ mm	7	18	12	13	15	0	21	11	9	2	4	6	117
Nº de dias com precipitação 10 - 20 mm	5	7	2	2	1	0	5	4	2	0	2	3	33
Nº de dias com precipitação > 20 mm	0	4	0	0	0	0	2	1	0	0	1	1	9

2012/2013													
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Ano
Nº de dias com precipitação $\geq 0,2$ mm	12	20	20	19	16	28	16	11	10	7	4	0	163
Nº de dias com precipitação 10 - 20 mm	5	6	2	11	3	11	2	1	2	0	0	0	43
Nº de dias com precipitação > 20 mm	4	3	1	7	1	6	1	1	1	0	0	0	25

Numa análise mais pormenorizada, constata-se que durante o período de Novembro a Março/Abril se registou precipitação na maior parte dos dias de cada mês. De realçar, nos dois anos hidrológicos mais húmidos (2009/2010 e 2012/2013), os 21 dias com precipitação

163

em Novembro de 2009 e os 21 dias em Fevereiro de 2010 (70% e 75% do mês, respectivamente), os 20 dias em Novembro e Dezembro de 2012, ou ainda, os 28 dias em Março de 2013, neste último a quase totalidade do mês. De notar que, mesmo num ano bastante seco como 2011/2012, também ocorreram meses com elevado número de dias com precipitação, como Novembro de 2011 (18 dias) e Abril de 2012 (21 dias).

O número de dias com precipitação elevada (> 20 mm) foi também considerável nestes meses, situação que, à excepção de 2011/2012, se verificou em todos os anos hidrológicos, sendo frequente encontrar mais de quatro dias por mês com estes valores elevados (Quadro II.II.II).

No que se refere aos valores diários, começámos por analisar os totais superiores a 10 mm, já que abaixo destes quantitativos o contributo para o processo de recarga é diminuto, principalmente se ocorrerem em meses com temperaturas mais elevadas, onde se perdem rapidamente para a atmosfera.

Em termos percentuais, no período analisado, do total de dias que registaram precipitação cerca de metade (47% no conjunto) foram dias onde ocorreram quantitativos superiores a 10 mm. De realçar o ano de 2009/2010, onde 49% dos dias com precipitação registaram mais de 10 mm e, em oposição, o ano de 2011/2012 onde o total de precipitação diária ocorrido foi diminuto (apenas 36% dos dias tiveram quantitativos superiores a 10 mm). Em termos absolutos, e exceptuando novamente o ano de 2011/2012, não houve uma diferença significativa entre os restantes anos (66 – 70 dias por ano), embora sobressaia o ano de 2009/2010 com o valor mais elevado. Em termos mensais foi no período de Outubro a Março (exceptuando Dezembro) que se verificou o maior número de dias com precipitação superior a 10 mm. De destacar os meses de Outubro, Novembro, Janeiro e Março nos quais mais de metade dos dias com precipitação registaram totais superiores a 10 mm.

Para além da caracterização baseada na divisão dicotómica entre dias com precipitação (valores $\geq 0,2$ mm) e dias com precipitação significativa (totais acima dos 10 mm) decidimos isolar e analisar, separadamente, os dias com quantitativos superiores a 20 mm. Esta opção é suportada pela enorme importância que estes valores diários apresentam na recarga do hidrossistema e no aumento do caudal das exurgências, realidade detectada durante o trabalho de campo e confirmada através da confrontação dos dados da precipitação diária e do caudal médio diário da principal exurgência da bordadura oeste do hidrossistema (Olhos d'Água do Anços).

Os quantitativos diários superiores a 20 mm mostram uma vez mais a secura invernal anormal de 2011/2012, com um total anual de apenas 9 dias com valores acima de 20 mm, em comparação com os 20-25 dias dos restantes três anos (Quadro II.II.II).

No conjunto do período estudado, os meses que registaram maior número de dias com precipitação elevada (> 20 mm) foram os de Outubro a Janeiro, situação análoga à da série

de referência, com mais de metade dos dias com precipitação elevada anual a ocorrer nesses quatro meses. O decalque mensal em relação à estação de Degracias só não é perfeito pelo facto de que, nestes quatro anos, foram os meses de Outubro e Novembro os que registaram maior número de dias com estas características pluviométricas enquanto na estação de Degracias, na série de referência, foram os meses de Novembro e Dezembro (Figura II.II.6A).

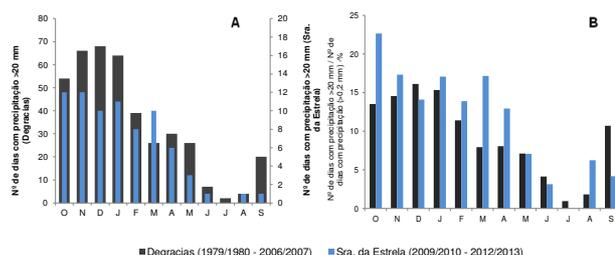


Figura II.II.6 – Número de dias com precipitação superior a 20 mm (A) e percentagem de dias com mais de 20 mm no total de dias com precipitação (B) para a série de referência (Degracias, 1979/1980 – 2006/2007) e para o período analisado (Sra. da Estrela, 2009/2010 – 2012/2013)

À excepção de 2012/2013 (com os elevadíssimos quantitativos mensais em Janeiro e Março), foi na estação outonal (particularmente em Outubro e Novembro) que se verificaram mais dias com totais superiores a 20 mm. É, aliás, frequente, nesta estação do ano, a concentração de grande parte da precipitação mensal em poucos dias, com os totais diários a serem bastante elevados como ocorreu em Novembro de 2009, onde 62% da precipitação mensal se verificou em apenas 3 dias (157 mm de um total mensal de 254 mm); em Outubro de 2010, em que 91% dos 213 mm ocorridos nesse mês se concentraram em 6 dias ou, ainda, em Outubro de 2012 com 80% do total mensal (137 mm dos 172 mm) concentrado em 4 dias.

O mês de Março registou um número consideravelmente alto de dias com precipitação superior a 20 mm (valor muito próximo dos meses de Outono/Inverno), discordando do padrão primaveril na série de referência, o que se justifica pelo facto de Março de 2013 ter sido um mês anormalmente húmido (6 dias com mais de 20 mm, totalizando 195 mm, num conjunto de 28 dias com precipitação).

165

No entanto, é muito variável, de ano para ano, o mês que apresenta mais dias com estes quantitativos. Por exemplo em 2009/2010, o maior número de dias com tais valores aconteceu em Dezembro e Fevereiro; em 2010/2011 ocorreu em Outubro; em 2011/2012 nos meses de Novembro e Abril e em 2012/2013, em Janeiro e Março.

Em termos percentuais (número de dias com precipitação superior a 20 mm relativamente ao número de dias com precipitação), a Figura II.II.6B mostra que, no período em estudo, exceptuando Dezembro, se verificou uma tendência para o aumento da percentagem de dias com precipitação elevada (em comparação com a série de referência). Estes resultados revelam, assim, no período em estudo uma maior preponderância dos dias de precipitação elevada no conjunto dos dias com registo de precipitação, em particular nos meses de Outubro, Março e Abril.

Para além da caracterização e análise da precipitação ocorrida em cada dia, interessa estudar a sequência dos dias com precipitação e, principalmente, a sequência de dias com precipitação elevada, dado que são estes episódios, simultaneamente prolongados e com elevada pluviosidade, os responsáveis pela entrada de grandes quantidades de água no hidrossistema em estudo, o que vai, posteriormente, afectar o escoamento das exsurgências.

Deste modo, decidimos dividir os totais diários em três classes, simultaneamente simples de analisar e com importante significado hidrológico: "dias com precipitação" [1 mm – 10 mm]; "dias com precipitação significativa" [10,1 mm – 20 mm] e "dias com precipitação elevada" [> 20 mm]. De notar que excluímos os dias com precipitação inferior a 1 mm porque a representação gráfica de quatro classes sobrecarregava demasiado a imagem e dificultava a análise e, principalmente, porque esses quantitativos diários extremamente baixos não chegam a atingir o solo na maioria das vezes, devido à sua retenção aérea na vegetação, perdendo-se para a atmosfera.

Após esta divisão, representámos as diferentes classes numa grelha de modo a permitir, simultaneamente, a visualização dos valores diários de precipitação e da sequência de dias seguidos com precipitação superior a 1 mm (Figura II.II.7). A completar a informação gráfica, colocámos o valor correspondente à precipitação acumulada nessa sequência, registando o valor no último dia da sequência³.

³ Quando ocorreu precipitação diária muito elevada de modo isolado (um dia apenas de precipitação, sem qualquer tipo de sequência) decidimos igualmente apresentar esse valor, dado tratar-se de quantitativos com significativa importância hidrológica. Ainda por razões de representação gráfica, nas sequências que abrangem o final de um mês e o início de outro, o valor apresentado corresponde à precipitação acumulada ao longo desses dias, independentemente de ter mudado o mês.

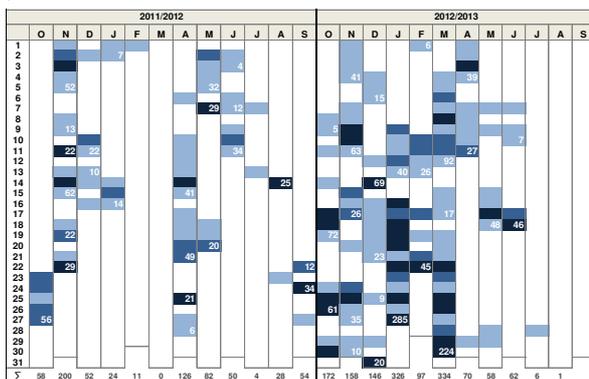
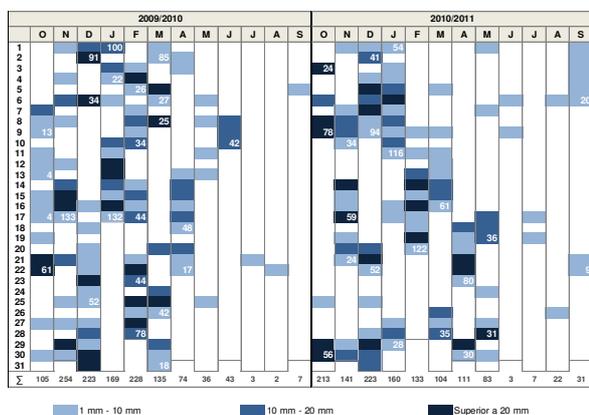


Figura II.II.7 – Representação dos dias com precipitação superior a 1 mm por classes (1-10 mm; 10-20 mm e > 20 mm) e valor em mm da precipitação acumulada na sequência chuvosa para os anos hidrológicos de 2009/2010 a 2012/2013

167

Como se pode ver na Figura II.II.7, é frequente a ocorrência de vários dias seguidos com precipitação elevada, com sequências em que os valores acumulados chegam a ultrapassar os 100 mm. É o caso das sequências de 14 a 17 de Novembro de 2009 (133 mm); de 10 a 17 de Janeiro de 2010 (132 mm), de 3 a 11 de Janeiro de 2011 (116 mm) e de 13 a 20 de Fevereiro de 2011 (122 mm). Contudo, as sequências com totais mais elevados ocorreram em Janeiro de 2013 (285 mm entre os dias 16 e 27, com 7 dias de precipitação bastante acima dos 20 mm) e em Março do mesmo ano (224 mm de 19 a 30 de Março). Trata-se, pois, de situações de precipitação prolongada e abundante, por vezes durante mais de uma semana, o que se traduz numa elevada quantidade de água para recarga do hidrossistema de Degracias-Sicó.

Em alguns casos, o total de precipitação acumulada ao longo de um episódio resulta de uma sequência de poucos dias com precipitação muito elevada. É o caso das sequências de dois dias de precipitação muito elevada ocorridas em Outubro de 2009 (61 mm no total dos dias 21 e 22) e em Outubro de 2010 (78 mm no conjunto dos dias 8 e 9 e 56 mm no total dos dias 29 e 30).

Os valores extremamente elevados acima referidos (ocorridos em Outubro) são bastante importantes em termos de alimentação outonal do hidrossistema de Degracias-Sicó, mas não se repercutem de modo consistente e duradouro no caudal das exurgências. No trabalho de campo constatámos que essas entradas maciças mas isoladas de água (sem continuação do processo de recarga) no início do Outono se traduziram num aumento, por vezes extraordinário, do caudal das exurgências (temporárias e permanentes) mas cuja duração se cingiu a um curto período (1 a 2 dias), com um decréscimo rápido desse escoamento, pelo que algumas exurgências voltaram novamente a secar. Pelo contrário, quando estas sequências de vários dias com muita precipitação ocorreram no final do Outono, Inverno e início de Primavera, houve um forte reflexo no aumento do caudal das exurgências, que se manteve elevado bastante para além do fim do episódio pluvioso.

Em **síntese**, o período em estudo (2009/2010 – 2012/2013) caracterizou-se, em termos pluviométricos, da seguinte forma:

- (i) dois anos normais (2009/2010 e 2010/2011) com pluviosidade ligeiramente acima da média (estação de Degracias como referência, 1979/1980-2006/2007), um ano muito seco – 2011/2012 e um ano húmido – 2012/2013;
- (ii) Novembro, Dezembro e Janeiro foram os meses mais chuvosos, o que contrasta com o ano de 2011/2012, marcado por seca meteorológica invernal (de Dezembro a Março);
- (iii) Abril e Maio registaram cerca de 25% menos de precipitação do que a média, antecipando a estação mais seca, a qual registou também bastante menos precipitação. Acresce ainda a elevada secura dos meses de Setembro e Outubro;

(iv) um comportamento sazonal muito contrastado, com valores de precipitação mensal superiores à média na estação mais chuvosa (de Novembro a Março) e bastante inferiores à média na Primavera, Verão e princípio do Outono. De salientar os meses de Janeiro e Março de 2013, com valores extremamente elevados de precipitação;

(v) os meses de Novembro e Dezembro registaram o maior número de dias com precipitação (19 dias e 17 dias, respectivamente), sendo que durante o período de Novembro a Março/Abril se registou precipitação na maior parte dos dias de cada mês;

(vi) os meses que registaram maior número de dias com precipitação elevada (> 20 mm) foram os de Outubro a Janeiro, mas foi na estação outonal (particularmente em Outubro e Novembro) que se verificaram mais dias com totais superiores a 20 mm;

(vii) ocorrência frequente de vários dias seguidos com precipitação elevada, sequências em que os valores acumulados chegam a ultrapassar os 100 mm (precipitação prolongada e abundante, por vezes durante mais de uma semana).

(viii) relativamente à estação e período de referência (Degraçias, 1979/1980-2006/2007), o período em estudo foi mais húmido (exceptuando 2011/2012), registaram-se mais dias com precipitação e mais dias com precipitação elevada (> 20 mm).

CAPÍTULO III

A RECARGA: QUANTITATIVOS E ESPACIALIZAÇÃO

I. A especificidade das áreas cársicas

1. Enquadramento teórico

Numa perspectiva hidrológica geral, a recarga de um aquífero representa a quantidade de água infiltrada que percola subterraneamente até atingir a zona saturada. A aplicação desta definição aos hidrossistemas cársicos é, contudo, demasiadamente redutora e perigosamente simplista, uma vez que o processo de recarga nestes meios se reveste, quase sempre, de uma enorme complexidade e especificidade, dada a existência de vários tipos de recarga, que podem funcionar em simultâneo.

A recarga nos terrenos cársicos pode dividir-se em *recarga autogénica* e *recarga alogénica*¹ e, também, em *recarga difusa* e *recarga concentrada* (Figura II.III.1). A primeira distinção baseia-se na proveniência da água que se infiltra (consoante seja de terrenos cársicos ou não-cársicos) e a segunda distinção refere-se ao modo como ocorre a infiltração da água.

A *recarga autogénica* é, essencialmente, uma recarga lenta, proveniente da precipitação caída apenas na bacia cársica, podendo ocorrer de forma *difusa* (parte que se infiltra através do solo e das fracturas e fissuras da superfície cársica) ou *concentrada* (quando é efectuada através de algares ou sumidouros).

¹ Optámos pelo uso de terminologia decorrente da tradução directa do inglês *autogenic recharge* e *alogenic recharge*.

171

Inclui-se ainda na recarga *autogénica concentrada*, a *escorrência interna* (*internal runoff*), termo que representa a parte da precipitação que não se consegue infiltrar directamente no solo (ou na ausência dele, no epicarso) devido à quantidade/intensidade da precipitação ser superior à velocidade e/ou capacidade de infiltração. Neste caso, esse excesso de água escorre à superfície em direcção a depressões fechadas na superfície cársica, acabando por se infiltrar, podendo o processo ocorrer de forma rápida e concentrada (através de sumidouros e algares) ou lenta e difusa (infiltração no solo e/ou epicarso).

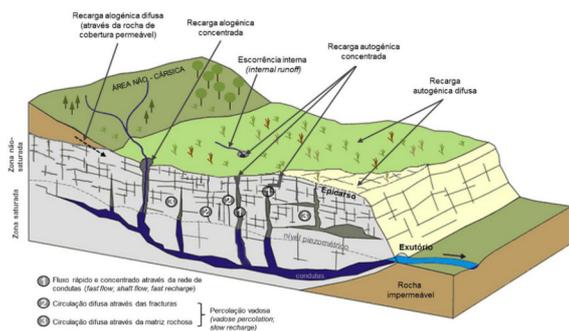


Figura II.III.1 – Tipos de recarga e modos de circulação subterrânea num hidrossistema cársico (elaboração própria a partir de desenho esquemático de Nico Goldscheider, s/d, modificado)

A *recarga alogénica* ocorre com a entrada no sistema cársico de escoamento superficial proveniente de áreas não-cársicas adjacentes, caracterizando-se por ser muito rápida e concentrada (rios que se perdem em profundidade através de sumidouros). Subterraneamente pode também ocorrer recarga alogénica, ou seja, através de fluxos provenientes de aquíferos vizinhos não-cársicos, embora o caso mais comum seja a recarga por água de circulação subterrânea proveniente de rochas permeáveis (por exemplo, arenito) que se sobrepõe a rochas carbonatadas carsificadas (Gunn, 1983). Essa água esco-se lentamente ao longo das paredes de condutas verticais e sub-verticais na zona não-saturada até atingir a zona saturada de modo difuso. Neste caso pode falar-se em *recarga alogénica difusa* (Taylor e Greene, 2008), cujos quantitativos são extremamente difíceis de medir.

A água que se infiltra de modo difuso e que não é captada pelas raízes (e consequentemente perdida por transpiração das plantas) continua o seu percurso descendente ao

longo dos espaços porosos da matriz das rochas e de pequenas fissuras e fracturas no epicarso e ao longo da zona vadosa², processo designado na literatura científica como *percolação vadosa* (*vadose percolation* ou *vadose seepage*). Devido à velocidade e ao modo como faz o seu percurso e atinge a zona saturada, este movimento da água de recarga é também denominado de *fluxo lento* (*slow flow*), *fluxo difuso* (*diffuse flow*) ou ainda *recarga lenta* (*slow recharge*).

Em contraste com os processos de infiltração e percolação anteriores, a água que entra no hidrossistema de forma concentrada continua a sua descida ao longo da zona não-saturada através de uma rede de condutas subterrâneas, pelo que o seu percurso, e o modo como chega à zona saturada, são rápidos e concentrados. Este processo é comumente designado por *fluxo rápido* (*fast flow*, *shaft flow*, *quick flow*) ou *recarga rápida* (*fast recharge*), sendo que em alguma literatura científica surge o termo *fluxo vadoso rápido* (*vadose fast flow*) para o distinguir claramente de *percolação vadosa* (Jocson *et al.*, 2002).

Uma das maiores particularidades da recarga nos hidrossistemas cársicos é o facto de uma parte da recarga que ocorre de modo difuso ficar armazenada na base do epicarso (aquífero epicársico) que, posteriormente, a vai cedendo de forma gradual, assegurando a recarga mesmo depois de ter terminado o episódio (ou período) pluvioso. No entanto, no respeitante ao processo de recarga, o epicarso pode assumir duas funções distintas e até mesmo contraditórias: (i) fornecer água em situações de intensa precipitação, aumentando o volume de escoamento rápido; (ii) regular temporalmente a recarga (retenção de parte da água infiltrada e posterior cedência).

Em situação de elevada pluviosidade, a importância da zona epicársica foi demonstrada pelos estudos de Trcek (2003, 2007; 2008) no sudoeste da Eslovénia, que revelaram que o contributo da água proveniente do epicarso pode corresponder a mais de 50% do caudal das exurgências no seguimento de tais eventos pluviosos. Também nessas circunstâncias, os hidrogramas simulados e desenvolvidos por Kiraly *et al.* (1995) mostraram que a existência do epicarso é fundamental para uma rápida drenagem da água infiltrada para a rede de condutas subterrâneas (*epifluxo*) e, conseqüentemente, para as exurgências, aumentando, deste modo, a quantidade de escoamento rápido (*quickflow*) por elas drenado.

Os estudos supra-referidos de Trcek, baseados na separação de elementos hidroquímicos, revelaram que o fluxo rápido proveniente do epicarso (*epifluxo*) que circula na zona vadosa durante episódios muito pluviosos é composto por água de acumulação epicársica e por água proveniente do evento pluvioso. Contudo, o epicarso funciona também como um importante regulador temporal da recarga de um hidrossistema cársico (Trcek, 2008), pela

² De relembrar, conforme explicado na parte teórica deste estudo, que devido à especificidade cársica, a zona vadosa é aqui entendida como uma parte (parte inferior) da zona não-saturada. Assim, entende-se que a zona não-saturada num hidrossistema cársico é composta por uma parte superior (epicarso) e por uma parte inferior (zona vadosa), imediatamente por baixo do epicarso.

sua acção na distribuição temporal da água proveniente da recarga autogénica difusa. De um modo geral, e apesar da sua elevada condutividade hidráulica interna, o epicarso actua como um retardador (Klimchouk, 2004), uma vez que, como referido anteriormente, uma parte da água infiltrada de modo difuso é armazenada, pelo menos temporariamente, na base do epicarso (devido à menor condutividade hidráulica da rocha subjacente).

Por conseguinte, e em virtude do exposto, o estudo aprofundado da recarga num hidrossistema cársico reveste-se, por norma, de uma enorme complexidade em virtude de: (i) dualidade dos processos de recarga e diferentes proveniências da água; (ii) dualidade das formas de circulação interna na zona não-saturada (epicarso e zona vadosa); (iii) existência de uma zona subcutânea (epicarso) que armazena água e que regula o tempo e o modo como a água infiltrada percorre a restante zona não-saturada.

A recarga neste tipo de hidrossistemas pode ser estimada utilizando diferentes métodos, mais ou menos complexos, consoante a quantidade e o tipo de informação disponível. Os métodos mais convencionais, mais simples e mais amplamente testados no carso, determinam a recarga a partir do balanço hidrológico (por exemplo Blavoux *et al.*, 1992; Jeannin e Grasso, 1995; Petric, 2002; Scanlon *et al.*, 2002; Jocson *et al.*, 2002; Carter e Driscoll, 2006; Sheffer *et al.*, 2011), de métodos empíricos (Kessler, 1957, 1967; Andreo *et al.*, 2008; Radulovic *et al.*, 2011; Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2012; Allocca *et al.*, 2014) e de métodos hidroquímicos e isotópicos (por exemplo Perrin, 2003; Aquilina *et al.*, 2006; Garry, 2007; Ozyurt e Bayarı, 2008; Williams, 2008).

A utilização do balanço hidrológico para cálculo da recarga apresenta várias vantagens, como sejam: (i) a facilidade de obtenção de dados (medição ou disponibilidade de séries de registos de variáveis climatológicas como a precipitação, temperatura do ar, número de horas de insolação, velocidade do vento, entre outras); (ii) a simplicidade e os baixos custos da sua implementação; (iii) o facto de qualquer *input* e *output* poder ser tido em consideração; (iv) a sua aplicabilidade a qualquer tipo de aquífero; (v) a sua capacidade de adaptação ao intervalo de tempo que se pretenda – mês, semestre, ano (Samper, 1998; Andreo *et al.*, 2008). A desvantagem que encerra é o facto de poder incluir erros de medições e cálculo em parâmetros que compõem a fórmula do balanço hidrológico (por exemplo a evapotranspiração potencial e real), o que irá diminuir um pouco o rigor da determinação da recarga, podendo originar alguns erros.

Por outro lado, os modelos de recarga mais complexos (modelos numéricos/matemáticos), tal como os baseados numa aproximação física do carso (*physically based approaches*), não obstante poderem fornecer informação espacial sobre as taxas de recarga, requerem um vasto conjunto de dados geofísicos minuciosos e de difícil obtenção para caracterizar o sistema (Kovács, 2003; Kovács e Sauter, 2008; Hartmann *et al.*, 2012; Jeannin, 2013). Para além disso, a complexidade das características hidrogeológicas do

carso bem como a sua heterogeneidade interna fazem com que a modelação dos parâmetros físicos seja muito difícil e forneça apenas informação relativa à infiltração, circulação e recarga de uma parte do hidrossistema cársico (Jeannin e Grasso, 1997).

Os modelos matemáticos baseados numa perspectiva agregada do hidrossistema cársico (perspectiva de conjunto – *lumped approach*), apesar de não requererem um conjunto tão vasto de dados como o anterior, baseiam-se numa forte simplificação dos processos hidrogeológicos específicos do carso, pelo que apenas fornecem informação da recarga para o conjunto do aquífero (Jukic e Denic-Jukic, 2009). Esta perspectiva, podendo ser interessante na gestão dos recursos hídricos subterrâneos (Bakalowicz, 2005), é, no entanto, redutora na análise dos processos de recarga do hidrossistema cársico, dada a enorme complexidade e heterogeneidade destes meios, como referido anteriormente.

Assim sendo, salvo hidrossistemas cársicos muito conhecidos e estudados, onde existe informação geofísica detalhada, os métodos mais utilizados são os baseados no balanço hidrológico, os métodos hidroquímicos e os métodos empíricos.

2. Considerações metodológicas e dados utilizados

O início do cálculo da recarga do hidrossistema de Degracias-Sicó colocou-nos, de imediato, uma importante questão conceptual e metodológica: o que considerar como *recarga*? Deve entender-se como *recarga* o total de precipitação registado ou apenas a parte que, efectivamente, se infiltra (ou seja, a parcela da precipitação que atinge a zona vadosa, depois de subtraídas as perdas originadas por processos atmosféricos, pedológicos e da vegetação).

A complexidade de que se reveste o processo de *input* nas regiões cársicas bem como a miríade de 'estudos de caso' e particularidades presentes na literatura da especialidade (com abordagens metodológicas muito específicas, adaptadas a cada realidade) obrigavam a uma definição muito clara do que entendíamos como *recarga*. O facto de estarmos, no presente estudo, a trabalhar em duas escalas temporais muito diferentes (ano e mês para caracterização do hidrossistema; dia e hora na análise da hidrodinâmica de pormenor na relação *input-output*) acrescentou ainda mais dificuldades na adopção de uma definição única. A complexidade desta situação bem como a possibilidade de introdução de erros grosseiros ao adoptarmos uma definição universal obrigaram a que tivéssemos de considerar, em definitivo, duas concepções de *recarga*, consoante a perspectiva temporal em questão, como explicaremos em seguida.

Esta é, de facto, uma das principais dificuldades no estudo da recarga no carso, como salientam Ford e Williams (2007), encontrando-se, por isso, profusamente referida e debati-

175

da em vários trabalhos (por exemplo Sauter, 1992; Jeannin e Grasso, 1997; Bonacci, 2001; Petric, 2002; Jocson *et al.*, 2002; Jemecov e Petric, 2009; Allocca *et al.*, 2014).

Alguns autores, de acordo com as características da respectiva área de estudo, consideram que não se deve considerar o total da precipitação sob pena de se sobrestimar o valor da recarga, já que uma parte da água acaba, inevitavelmente, por se perder por: (i) evapotranspiração, em particular em áreas onde existem solos espessos, com grande capacidade de retenção de água; vegetação arbórea que ocupa parte considerável da área de recarga; acumulação de água em depressões naturais ou antrópicas; (ii) escoamento superficial para terrenos adjacentes não-cársicos, em áreas de declives acentuados e/ou presença de escoamento superficial exorreico. Assim, o valor de precipitação total é substituído pelo de *precipitação efectiva* ou *infiltração efectiva*.

Outros autores, por seu lado, afirmam que, perante a falta de dados mais específicos e detalhados na maior parte dos casos em estudo e a elevada dificuldade em calcular valores diários para alguns parâmetros do balanço hidrológico (com a conseqüente introdução de maior erro nos cálculos) é preferível considerar a *precipitação total* em detrimento da *precipitação efectiva*. Alegam, pois, que estariam a introduzir ainda mais incerteza numa análise recarga-descarga já por si extremamente complexa nestes meios. Assim sendo, o ruído introduzido no cálculo da recarga baseado em parâmetros obtidos de forma indirecta (por exemplo parâmetros para determinação da evapotranspiração) poderia ser de tal ordem que comprometesse os valores obtidos. Isto porque estaríamos a proceder a sucessivos cálculos com base sempre em parâmetros estimados e não em dados obtidos directamente no campo. Advogam, ainda, que a complexidade da hidrodinâmica cársica e a heterogeneidade interna destes meios originam um grau de incerteza tão elevado que um pequeno erro decorrente da simplificação do processo de recarga (considerar o total da precipitação) não tem qualquer significado no resultado final do estudo.

Perante estas duas concepções metodológicas e devido à necessidade de considerar, neste estudo, duas perspectivas temporais diferentes e com objectivos distintos, levou a que definíssemos *recarga* do seguinte modo:

(i) no cálculo da recarga anual e mensal, a recarga define-se como 'a *quantidade de água que entra no hidrossistema depois de subtraídas as perdas por evapotranspiração real*'. Considera-se, neste ponto do trabalho, a *precipitação efectiva* (ou *infiltração efectiva*), isto é, a água, proveniente da precipitação³ que, efectivamente, entra no sistema cársico e atinge o topo da zona vadosa, já sem possibilidade de influência de qualquer perda para a atmosfera que possa ocorrer no solo/epicarso, ou seja:

³ Em ambas as definições de recarga utilizadas na presente investigação, o tipo de precipitação considerada é apenas a chuva, uma vez que a presença de outros hidrometeoros (neve, por exemplo) é, na área em estudo, extremamente rara, sendo, por isso, totalmente desprezável. O granizo, quando ocorre, tem um comportamento hidrológico semelhante ao da chuva.

$$\text{Recarga} = \text{Precipitação} - \text{Evapotranspiração real}^4$$

(ii) na análise pormenorizada da hidrodinâmica cársica (dados diários e horários) o valor da recarga é dado pela *precipitação total*. Desse modo:

$$\text{Recarga} = \text{Precipitação total (diária e horária)}$$

No caso da recarga anual e mensal, o facto de trabalharmos apenas com o valor absoluto de recarga (utilizado depois no cálculo do balanço hidrológico) faz com que, se utilizássemos a precipitação total estaríamos a sobrestimar bastante a quantidade total anual ou mensal de água que entra no hidrossistema (em média cerca de 40%, como veremos mais à frente). A justificação para o subtrair da fracção de água perdida para a atmosfera a nível anual e mensal reside nos valores elevados de evapotranspiração real dos meses primaveris, característicos do clima da região em estudo. O aumento acentuado da temperatura numa época ainda com possibilidade de ocorrência de precipitação abundante conjugado com o facto de, estando no final da estação húmida, existir grande quantidade de água armazenada no solo/epicarso contribuem para consideráveis perdas por evapotranspiração.

Pelo contrário, a opção, na análise de pormenor, em utilizar como *input* a *precipitação total* em detrimento da *precipitação efectiva* justifica-se, para além dos argumentos aduzidos por vários autores (e referidos anteriormente), pelas características da área em estudo, pela informação existente e/ou disponível e, principalmente, pelo período em que é feita a análise dos episódios de pormenor (final do Outono-Inverno-início da Primavera), em que as perdas da água precipitada são bastante baixas. Assim, e de uma forma detalhada, apresentamos as razões que justificam esta opção:

(i) a extrema dificuldade em calcular os valores diários e horários de *infiltração efectiva* devido à inexistência de dados necessários ao cálculo tão pormenorizado da evapotranspiração (por exemplo o teor de humidade do solo, a evaporação, a humidade do ar, a velocidade do vento);

(ii) a grande planura da principal área de recarga (Planalto Degracias-Alvorge) – Figura I.II.1.1, o que favorece a rápida infiltração, sendo praticamente inexistente o escoamento subaéreo e, conseqüentemente, as perdas por evaporação⁵;

⁴ Para sermos precisos há que referir que esta situação, tal como descrita pela fórmula apresentada, ocorre apenas quando os solos estão saturados (reserva útil do solo completa) e corresponde ao período de maior recarga. Se está a ocorrer reposição da reserva útil (no início do ano hidrológico), há que ter em consideração a variação dessa reserva útil, pelo que a fórmula deve ser ajustada, passando a escrever-se:
Recarga = (Precipitação – Evapotranspiração potencial) – Variação da reserva útil do solo

(iii) o facto de a vegetação arbórea não ocupar grandes extensões na área de recarga, existindo, inclusive, sectores com muito pouca vegetação e solos esqueléticos e também alguns sectores de rocha nua (reduzida evapotranspiração nestes sectores) – Figura I.II.1.8;

(iv) grandes extensões de carso descoberto a que acresce a existência de formas cársicas⁶ que favorecem a entrada rápida da precipitação para o interior do Maciço (caso dos algares – Figura I.II.1.7);

(v) a inexistência de importantes retenções subaéreas da precipitação (por exemplo sob a forma de neve ou em grandes represas naturais ou artificiais);

(vi) a coincidência entre a estação mais húmida e mais fria faz com que as perdas por evapotranspiração no período de recarga máxima sejam muito reduzidas, ao que acresce o facto de ser uma área alta no enquadramento regional (400-550 m), pelo que a precipitação é ainda mais elevada e as temperaturas mais baixas;

(vii) o facto de os dados de *precipitação total* provirem de equipamentos digitais modernos e de elevada fiabilidade, numa rede de estações perfeitamente adequada para a cobertura de toda a área de recarga. Em caso de dúvida sobre a sua fiabilidade dos dados, é possível a comparação entre os registos das várias estações, evitando ou reduzindo ao máximo os erros.

Estes esclarecimentos metodológicos acautelam a aparente incoerência que poderia advir do facto de, numa primeira fase deste trabalho, efectuarmos cálculos considerando a *infiltração efectiva* para o estudo da recarga e, aquando da análise pormenorizada *input-output*, no próximo capítulo, procedermos aos cálculos com base apenas na *precipitação total* e não na *infiltração efectiva*.

No seguimento da definição do conceito de *recarga* (e dos pressupostos metodológicos associados) procedemos à determinação da recarga anual e mensal do hidrossistema de Degracias-Sicó. Os primeiros cálculos referem-se a uma série temporal maior, considerada de referência e basearam-se nos dados de precipitação da estação de Degracias e de temperatura média do ar da estação de Ansião⁷ ao longo de 28 anos (1979/80-2006/07).

⁵ Declive suave (< 8%) é apontado como um dos factores que mais influencia a infiltração em áreas cársicas, sobretudo em extensos afloramentos calcários com formas cársicas que favoreçam a rápida infiltração (Andreo *et al.*, 2008). No mesmo sentido, Allocca *et al.* (2014) referem que para áreas planálticas com declives suaves (< 5°) e características endorreicas, a infiltração atinge o seu valor máximo, que pode rondar, em alguns casos, os 100%.

⁶ A utilização neste estudo (em particular no capítulo da recarga) da designação genérica *formas cársicas* em detrimento de designações mais precisas (endocarso/exocarso) justifica-se pela dificuldade para definir, em simultâneo, o tipo de forma cársica e a respectiva intervenção no processo de recarga. É o caso dos algares, formas endocársicas, cuja acção no processo de recarga é exocársica (infiltração da água através da sua abertura na superfície de recarga).

⁷ Embora seja desejável que os dados da temperatura e precipitação se reportem ao mesmo local, a inexistência de valores de temperatura para Degracias levou a que tivéssemos de considerar, nessa variável, a única estação próxima com dados de temperatura que apresenta posição topográfica semelhante – Ansião (275 m

Os valores obtidos serviram para fornecer uma primeira noção dos quantitativos da recarga e para conseguirmos valores de referência para os que iríamos obter para o período em estudo. Para aferir a validade dos valores encontrados para a recarga nesse período servimo-nos dos registos do caudal das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão enquanto *output* do hidrossistema (medições pontuais com micro-molinete a partir de 1993/94⁸).

Para o período em estudo (de 1 de Outubro de 2009 a 30 de Setembro de 2013), onde pretendíamos uma análise mais rigorosa da recarga, utilizámos os dados de precipitação e de temperatura média do ar das estações climatológicas por nós instaladas (neste caso a da Sra. da Estrela, por ser a que possuía séries praticamente sem hiatos). Para atestar a fiabilidade dos cálculos e validar os resultados, usámos os valores de caudal registados nas sondas colocadas nas duas principais exsurgências do hidrossistema (Olhos d'Água do Anços e Ourão).

Relativamente ao método utilizado, a posse deste vasto conjunto de dados digitais de precipitação e de temperatura do ar e a inexistência de informação que permitisse a implementação de outro tipo de métodos (métodos hidroquímicos, por exemplo) levaram a que tivéssemos optado por estimar a recarga através do método do balanço hidrológico e de métodos empíricos (método de Kessler). A partir destes métodos, conseguimos estabelecer a recarga sem ter de recorrer a parâmetros de difícil determinação, como nos modelos matemáticos, onde os parâmetros físicos considerados são, *a priori*, muito bem conhecidos.

Embora conscientes da especificidade e complexidade dos hidrossistemas cársicos e da simplicidade dos métodos utilizados, esta opção justifica-se, como referido anteriormente, pelas características morfológicas da superfície de recarga (grande planura) e pelo carácter simples da recarga do hidrossistema de Degraças-Sicó (recarga autogénica, apenas). Acresce ainda, para o período posterior a 2009, a elevada fiabilidade da informação digital por nós recolhida e utilizada no cálculo da recarga (dados instantâneos de precipitação e dados horários de temperatura do ar) e a fiabilidade e pormenor dos dados digitais de caudal das exsurgências (registo a cada 20 minutos) para aferir a veracidade dos valores de recarga calculados. Os problemas na medição e obtenção dos dados de base são normalmente apontados como um factor susceptível de introduzir erros substanciais na estimação da recarga por estes métodos, o que não se verifica neste estudo.

Tentámos, pois, através de métodos de custo reduzido, de fácil implementação e já amplamente utilizados e testados, estimar a recarga do hidrossistema em estudo, embora estejamos conscientes de que se trata de um cálculo aproximado que deverá ser futura-

relativamente aos 326 de Degraças). Ambas as estações pertencem à rede do SNIRH (Serviço Nacional de Informação de Recursos Hídricos), disponível *on-line*.

⁸ Dados gentilmente cedidos pela ex-Direcção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território do Centro (DRAOT).

179

mente aprimorado, já que não possuíamos, no momento, muita da informação necessária a uma determinação mais rigorosa e pormenorizada (características dos solos; teor de humidade dos solos; inventário actualizado e localização de formas cársicas que promovem a infiltração concentrada e das estruturas subterrâneas que favorecem a rápida circulação da água; espessura e características do epicarso; cartografia geológica de pormenor; nível piezométrico).

3. O cálculo da recarga a partir do método do balanço hidrológico⁹

O balanço hidrológico constitui um dos métodos mais utilizados na caracterização e estudo de um aquífero mediante a relação que é estabelecida entre a entrada e a saída de água com a variação do volume de água nesse mesmo aquífero, num determinado período.

A complexidade e a especificidade que caracterizam os hidrossistemas cársicos fazem com que o estudo e a quantificação das interações hidrodinâmicas superfície-profundidade sejam efectuados através de equações de balanço hidrológico muito mais complexas do que noutros hidrossistemas, sendo necessário incluir variáveis adicionais, específicas do meio cársico (White, 1988; Bonacci, 2001; Jocson *et al.*, 2002; Petric, 2002; Bailly-Comte, 2008; Jukic e Denic-Jukic, 2009; Hartmann *et al.*, 2012).

É, por isso, muito frequente a consideração, no respeitante ao *input*, de parâmetros tão específicos como a recarga alóctone (rios que se perdem para o meio subterrâneo), os contributos subterrâneos de água, provenientes de hidrossistemas vizinhos (variáveis segundo a posição do nível piezométrico) e a dinâmica hidrológica no epicarso. O modo e a velocidade da circulação subterrânea são igualmente tidos em consideração na equação, através dos quantitativos de água que circula em condutas, fracturas e na própria rocha bem como da velocidade dessa circulação até ao exutório. Estas variáveis podem ser medidas directamente através da instalação de aparelhos ou estimadas a partir de outros parâmetros ou, ainda, obtidos por forma indirecta (traçagens).

Não obstante essa complexidade, a equação do balanço hidrológico adoptada neste trabalho encontra-se bastante simplificada, tal como referido anteriormente, dadas as características hidrogeomorfológicas da área em estudo e a escassez, ou mesmo inexistência, de dados que permitam um maior aprofundamento dos diferentes termos das equações mais complexas. Assim sendo, a equação do balanço hidrológico foi simplificada e adaptada para um hidrossistema cársico de recarga puramente autogénica e sem contri-

⁹ De salientar que, apesar deste ponto de análise se reportar apenas ao estudo da recarga (*input*), será frequente a presença dos valores de caudal das exsurgências (*output*) nos quadros e gráficos que ilustram e completam o texto, informação imprescindível à validação dos resultados obtidos para a recarga (e respectivo comportamento mensal) e, também, para o armazenamento no hidrossistema em estudo. Por vezes a inclusão do *output* neste ponto do trabalho servirá também para enquadrar e enriquecer a análise da recarga.

butos subterrâneos oriundos de bacias vizinhas (Goldscheider e Drew, 2007; Taylor e Greene, 2008). A fórmula final utilizada foi, portanto, a seguinte:

$$P = Q + ETR + \Delta AP$$

em que: P é a precipitação; Q o caudal das exurgências; ETR a evapotranspiração real e ΔAP representa a variação do armazenamento de água em profundidade.

De notar que excluímos desta equação duas variáveis que normalmente estão presentes no balanço hidrológico, inclusive em bacias cársicas: no lado das perdas, o escoamento superficial, uma vez que na área em estudo este parâmetro é negligenciável devido às suas características topográficas (planura) e geomorfológicas (carso), que favorecem fortemente a infiltração. Por outro lado, não considerámos, no lado do *input*, qualquer parâmetro de recarga alóctone, seja proveniente de cursos de água vindos de áreas não-cársicas (pelo facto de não se verificar na área em estudo) seja de recarga subterrânea lateral, pelo facto de ser extremamente difícil de quantificar e do conhecimento prévio da área nos indicar que é desprezável ou mesmo inexistente.

A equação do balanço hidrológico pode, pois, ser mais ou menos complexa de acordo com os objectivos de cada estudo e, principalmente, com os dados existentes e disponíveis ou que podem ser facilmente medidos ou estimados directa ou indirectamente (dados hidroclimáticos, geomorfológicos, de vegetação, de solos). Nesse sentido, consideramos que a fórmula acima apresentada serve plenamente os objectivos do presente estudo.

Assim sendo, e no seguimento de trabalhos já efectuados para o cálculo do balanço hidrológico em áreas cársicas mediterrânicas (por exemplo Ferreira *et al.*, 1994, Trisic, 1997; Horbat e Rubinic, 2006; Mendes, 2010; Fiorillo, 2011), começámos por estimar a evapotranspiração real anual segundo os métodos de Turc, Coutagne e Thornthwaite primeiramente para uma série de referência (estação de Degracias) e, posteriormente, para os quatro anos hidrológicos em estudo (2009/2010-2012/2013).

Trata-se, portanto, de métodos empíricos, baseados na precipitação e na temperatura do ar, sendo que, no caso da fórmula de Thornthwaite, a evapotranspiração real é determinada a partir da relação entre a precipitação e a evapotranspiração potencial, considerando a disponibilidade hídrica do solo. De salientar ainda que, segundo este método, o valor da evapotranspiração real anual apresentado não resulta da aplicação directa de uma fórmula, mas antes da soma dos valores de evapotranspiração real mensal, previamente calculados a partir da evapotranspiração potencial mensal. A vantagem desta forma de cálculo reside na possibilidade de análise da variação intermensal (e sazonal), aumentando o pormenor e o rigor da análise.

181

3.1. A determinação da evapotranspiração real (ETR)

Nos estudos de hidrologia, e em particular nos que pretendem estimar a recarga natural de um aquífero ou conhecer a sua hidrodinâmica interna, a determinação da evapotranspiração constitui o primeiro passo no conhecimento da água disponível para circulação subterrânea.

O estudo da recarga iniciou-se, portanto, com o cálculo da evapotranspiração real (ETR), que constituiu uma das principais variáveis consideradas na determinação dos valores da recarga do hidrossistema em estudo¹⁰. Apesar de alguns trabalhos em hidrologia utilizarem, preferencialmente, a evapotranspiração potencial (ETP), nesta investigação optámos por empregar a evapotranspiração real em detrimento da evapotranspiração potencial, o que se justifica com base nas seguintes premissas:

(i) a evapotranspiração potencial pressupõe que exista sempre humidade disponível para o processo, o que nem sempre ocorre pois depende da precipitação e, no caso da área de estudo, há meses em que praticamente não ocorre precipitação. Assim, do final da Primavera ao início do Outono, os valores de evapotranspiração potencial seriam completamente irreais face ao que realmente ocorre, com grande sobrestimação dos valores de água perdida para a atmosfera. Acresce ainda o facto de se tratar de uma superfície cársica onde, em grande parte da sua área, os solos são pouco espessos ou praticamente inexistentes, o que diminui a quantidade de água (humidade do solo) disponível para evapotranspiração. Os cálculos efectuados para as estações de Degracias (1979/1980 – 2006/2007) e da Sra. da Estrela (nos quatro anos em estudo) mostraram que, na realidade, essa perda de água, principalmente nos meses mais quentes e secos (Julho e Agosto), é muito inferior à determinada como evapotranspiração potencial ($ETR/ETP < 28\%$). Esta discrepância estival deve-se à escassa precipitação que ocorre durante esse período, às elevadas temperaturas e, conseqüentemente, aos baixos teores de água no solo. Situação que é particularmente vincada em anos muito secos;

(ii) obtenção de valores mais realistas do balanço hidrológico, ou seja, mais do que estimar a quantidade máxima de água susceptível de se evaporar do solo e das plantas (definida pela evapotranspiração potencial), importa avaliar a quantidade de água que é

¹⁰ A evapotranspiração real, como veremos mais adiante, tem sido considerada por alguns autores um parâmetro de menor importância no estudo da recarga em regiões cársicas devido à rapidez e à elevada taxa de infiltração favorecida pelas formas cársicas de superfície e de profundidade. No entanto, o facto da área em estudo apresentar características climáticas marcadamente mediterrânicas com quantitativos anuais de precipitação superiores a 1200 mm e existirem algumas áreas (em particular no sector leste) cobertas por depósitos onde se desenvolve vegetação arbórea leva a que, no cálculo da recarga anual e mensal, tenha de se considerar, obrigatoriamente, a evapotranspiração real. O desprezar destes quantitativos de água perdida para a atmosfera levaria, naquela escala temporal, à sobrestimação da recarga, até porque os meses primaveris e alguns meses outonais são, por norma, tépidos e húmidos.

realmente perdida para a atmosfera (evapotranspiração real) pois só assim se conhece com maior exactidão a quantidade de água que, efectivamente, se infiltra;

(iii) ter sido largamente calculada e utilizada nos estudos de recarga em regiões cársicas com características próximas das da área em estudo, o que permite ter uma base quantitativa para comparar e aferir os resultados por nós obtidos, tarefa que executaremos mais à frente, na interpretação dos resultados.

De entre os numerosos métodos desenvolvidos para o cálculo da evapotranspiração real e potencial (apresentados, por exemplo, em Lu *et al.*, 2005 e em Shaw, 1988), seleccionámos três métodos com base nos seguintes critérios: (i) quantidade e tipo de parâmetros necessários ao seu cálculo bem como a existência/disponibilidade dos mesmos; (ii) complexidade/simplicidade dos cálculos; (iii) o terem sido já amplamente testados em regiões cársicas, com resultados de elevado rigor e fiabilidade; (iv) bom ajustamento às características climáticas da área em estudo.

Os métodos seleccionados foram, por isso, os desenvolvidos por **Turc**, **Coutagne** e **Thornthwaite**. Para além das razões supra-referidas, as fórmulas de Turc e Coutagne são dos poucos métodos que permitem o cálculo directo da evapotranspiração real, pelo que são amplamente referidos e utilizados em estudos sobre o balanço hidrológico em bacias hidrográficas. Trata-se de métodos empíricos, escolhidos pela simplicidade da sua implementação, uma vez que requerem apenas dados de precipitação e temperatura média do ar, informação normalmente simples de obter. Para além destas variáveis, no caso do método de Thornthwaite são necessários conhecimentos básicos sobre as principais características dos solos (tipo, textura, estrutura, principais constituintes, espessura) para a formulação do valor da reserva útil do solo.

Um dos métodos empíricos aplicados foi o proposto por **Turc**, em 1954 (Shaw, 1988), amplamente utilizado em estudos de hidrologia por todo o mundo e que expressa a evapotranspiração real (*ETR*) como uma função da precipitação (*P*) e do factor da temperatura (*L*), de modo que o aumento da evapotranspiração não é proporcional ao aumento da precipitação. Assim:

$$ETR = \frac{P}{\left(0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2\right)^{1/2}}$$

em que: *ETR* é a evapotranspiração real (mm/ano), *P* a precipitação (mm/ano), *L* é dado pela fórmula $300 + 25t + 0,05t^2$, sendo *t* a temperatura média anual (em graus Celsius). Os resultados obtidos mediante a aplicação deste método em áreas cársicas na Europa, e em particular na região do Mediterrâneo, têm-se revelado altamente consistentes e fiáveis

183

(Santorio, 1970; Boni *et al.*, 1982; Celico, 1983; Parajka e Szolgay, 1998; Horvat e Rubinic, 2006; Allocca *et al.*, 2007a todos citados por Allocca *et al.*, 2014).

Coutagne, em 1954, propôs outro método, expresso através da seguinte fórmula (Custodio e Llamas, 1976):

$$ETR = P - P^2 \cdot \lambda$$

sendo: *P* a precipitação (metros/ano), λ um parâmetro cujo valor é obtido por $1/(0,8 + 0,14t)$, sendo *t* a temperatura média anual (em graus Celsius). A fórmula só é válida para valores de precipitação entre 0,125*A* e 0,5*A*.

O método desenvolvido por **Thornthwaite** (1948) possibilita o cálculo da evapotranspiração real (*ETR*) a partir dos valores da evapotranspiração potencial (*ETP*), previamente calculados, considerando duas situações hidrometeorológicas:

(i) nos meses húmidos, $P \geq ETP$, logo:

$$ETR = ETP$$

(ii) nos meses de escassez de água ($P < ETP$), a *ETR* < *ETP*, ou seja, a evapotranspiração real faz-se à custa da água existente no solo, sendo o seu valor, o resultado da soma da precipitação com a água cedida pelo solo (ou seja, com a variação de armazenamento da água no solo, ΔS), de acordo com a seguinte fórmula:

$$ETR = P + \Delta S$$

Com este método foi possível determinar, para cada mês, as perdas por evapotranspiração potencial e, conseqüentemente, por evapotranspiração real. A partir daqui conseguiu-se avaliar a quantidade de água que realmente entrou no sistema e a percentagem de água disponível para armazenamento (recarga profunda do aquífero).

Neste ponto, de realçar dois apontamentos teóricos relacionados com a utilização do método de **Thornthwaite**. O primeiro prende-se com o mês em que iniciamos o cálculo. Embora os cálculos devessem ter início em Outubro (primeiro mês do ano hidrológico português), considerando nulo o armazenamento de água neste mês, a verdade é que existe sempre água no solo, ainda que em pequena quantidade, parâmetro que é extremamente difícil de medir. Assim sendo, e para evitar incorrecção na estimativa desse parâmetro, iniciamos o cálculo em plena estação húmida (Janeiro), quando as reservas do solo se encontram normalmente completas. Deste modo, evitam-se erros, uma vez que se conhece a quantidade de água no solo, para além de se conseguir determinar com rigor o *deficit* hidrológico dos primeiros meses de Outono, quando se inicia a recarga dos aquíferos e, no caso em estudo, se eleva o nível de água nas exsurgências. No entanto, por razões de uniformidade temporal neste estudo, apesar dos cálculos terem sido iniciados em Janeiro, aparecem por ano hidrológico nos gráficos e tabelas que ilustram o texto. Contudo, não se

desvirtuam os valores obtidos e a análise respectiva, já que o cálculo foi elaborado em contínuo desde Janeiro de 2009 a final de Setembro de 2013.

O segundo apontamento teórico refere-se à dificuldade em estabelecer o valor da Reserva Útil do Solo (RU) utilizado no cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) devido à inexistência de cartografia do tipo de solo e à grande heterogeneidade da superfície em estudo (características e distribuição do solo e tipo e densidade do coberto vegetal). Assim, a área de recarga das exsurgências (Serras do Rabaçal e Sicó e Planalto Degracias-Alvorçe) constituiu um verdadeiro mosaico em termos de ocupação do solo e do tipo de vegetação, não sendo rara a existência de uma mancha de pinhal ou terrenos agrícolas (correspondendo a áreas de espessos depósitos gresosos de cobertura) ladeados por áreas de rocha nua ou de solo esquelético ocupadas por olival esparsa ou por vegetação esclerófila (correspondendo ao carso descoberto) – Figura I.II.II.8.

Esta complexidade levou a que optássemos por estabelecer uma reserva útil de 75 mm, valor que consideramos mais adequado para áreas cársicas, nas quais é frequente o valor da reserva útil variar entre os 75 mm (solos muito finos) e os 150 mm (solos espessos, típicos do 'carso coberto'), embora sejam utilizados valores de 25 e 50 mm em áreas mediterrânicas (Andreo *et al.*, 2008; Liñán Baena, 2005). Embora se tenha usado, inicialmente, uma reserva útil de 100 mm, rapidamente nos apercebemos de que não correspondia à realidade, já que se estava a sobrestimar os valores de evapotranspiração real e, conseqüentemente, a diminuir em demasia os valores da recarga, deturpando a relação recarga-descarga, posteriormente aferida pelos caudais medidos nas exsurgências do bordo oeste do Maciço.

O cálculo da evapotranspiração real foi, assim, efectuado segundo os métodos anteriormente explicados para a estação de referência (Degracias, 1979/1980 – 2006/2007) e para cada um dos anos em análise, devido à grande discrepância interanual dos quantitativos pluviométricos – Quadro II.III.I.

Os resultados obtidos pelos três métodos supra-referidos revelaram, relativamente aos quantitativos de evapotranspiração real na área de recarga do hidrossistema de Degracias-Sicó, duas situações: (i) diferença muito pequena entre os resultados mais elevados, obtidos pelos métodos de Turc e Coutagne; (ii) um afastamento considerável dos resultados obtidos por esses dois métodos em relação aos valores obtidos pelo método de Thornthwaite.

Para a estação de Degracias, o resultado mais elevado foi determinado pela fórmula de Coutagne (697,6 mm), valor muito semelhante ao obtido pelo método de Turc (690,4 mm),

185

sendo o valor mais baixo o calculado segundo o método de Thornthwaite¹¹ (531,0 mm). Para o conjunto do período em estudo (2009/2010-2012/2013), a evapotranspiração real média segundo o método de Turc foi de 669,3 mm, valor próximo ao obtido pela fórmula de Coutagne (660,4 mm) e bastante superior ao valor calculado pelo método de Thornthwaite (476,5 mm) – Quadro II.III.I.

Quadro II.III.I – Evapotranspiração real anual (em mm) e infiltração efectiva anual (em mm) segundo os métodos de Turc, Coutagne e Thornthwaite, e respectivas percentagens relativamente ao total de precipitação anual para a série de referência e para o período 2009/2010 – 2012/2013, por ano

		Degracias		Sra. da Estrela			
		1979/80-2006/07	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2009/10-2012/13
Precipitação anual (P)	mm	1228,7	1278,3	1230,4	688,7	1464,6	1165,5
Temperatura média anual	°C	14,5	14,9	14,7	15,1	14,4	14,8
Evapotranspiração real (ETR)							
TURC	mm	690,4	711,5	697,0	551,5	717,0	669,3
ETR _{TURC} / P	%	56,2	55,7	56,6	80,1	49,0	57,4
COUTAGNE	mm	697,6	712,1	700,8	525,7	703,1	660,4
ETR _{COUTAGNE} / P	%	56,8	55,7	57,0	76,3	48,0	56,7
THORNTHWAITÉ¹							
RU = 100 mm	mm	598,0	381,2	496,1	535,1	515,1	481,9
ETR _{THORNTHWAITÉ} / P	%	48,7	29,8	40,3	77,7	35,2	41,3
RU = 75 mm	mm	531,0	428,0	473,6	509,7	469,3	476,5
ETR _{THORNTHWAITÉ} / P	%	43,2	33,5	38,5	74,0	32,0	40,9
Infiltração efectiva (P - ETR) - Recarga							
TURC	mm	538,3	566,8	533,4	137,2	747,5	496,2
(P - ETR _{TURC}) / P	%	43,8	44,3	43,4	19,9	51,0	42,6
COUTAGNE	mm	531,6	566,3	529,6	163,0	761,5	505,1
(P - ETR _{COUTAGNE}) / P	%	43,3	44,3	43,0	23,7	52,0	43,3
THORNTHWAITÉ							
RU = 100 mm	mm	630,7	897,2	734,3	153,6	949,5	683,7
(P - ETR _{THORNTHWAITÉ}) / P	%	51,3	70,2	59,7	22,3	64,8	58,7
RU = 75 mm	mm	697,7	850,3	756,8	179,1	995,3	689,0
(P - ETR _{THORNTHWAITÉ}) / P	%	56,8	66,5	61,5	26,0	68,0	59,1

¹RU (reserva útil do solo). A negrito os valores de evapotranspiração real e recarga que iremos considerar no presente estudo (a partir do método de Thornthwaite com RU = 75 mm).

A existência de diferenças entre os valores obtidos para a mesma área segundo diferentes fórmulas é comum e encontra-se amplamente documentada na literatura científica,

¹¹ Os resultados apresentados ao longo do texto, decorrentes da aplicação do método de Thornthwaite, referem-se aos cálculos utilizando uma reserva útil de 75 mm. Apesar de, no Quadro II.III.I, aparecerem, também, os resultados para uma reserva útil de 100 mm, estes têm apenas um carácter meramente informativo e de contextualização para os valores determinados com 75 mm.

onde se demonstra que, em comparação com outros métodos, a fórmula de Turc tende a sobrestimar os valores de evapotranspiração real enquanto o método de Thornthwaite parece subestimá-los (Custódio e Llamas, 1976; Lu *et al.*, 2005; Portela e Santos, 2006; Mendes, 2010). Num estudo comparativo entre várias fórmulas de determinação da evapotranspiração, Lencastre e Franco (1992) mostraram isso mesmo, sublinhando que o método de Thornthwaite é dos que mais subestima a evapotranspiração.

Situação semelhante parece ocorrer na área em estudo, dada a diferença de cerca de 190 mm entre este método e os outros dois métodos aplicados. No entanto, cremos que os valores obtidos pelo método de Thornthwaite são os que mais se aproximam da realidade da nossa área de recarga porque grande parte dessa área (à excepção do sector leste e de algumas depressões onde existem depósitos) possui um solo esquelético e vegetação esclerófila, em alguns locais pouco abundante e predominantemente arbustiva e subarbustiva, o que não favorece a evapotranspiração.

Os resultados obtidos pelos métodos de Turc e Coutagne são, salvo raras excepções, ligeiramente superiores aos apresentados por Carreira (1986) para a área em estudo, considerando as estações de Pombal e Penela (1944-1974) e cujos valores são, respectivamente, de 617 e 665 mm (método de Turc) e 620 e 676 mm (método de Coutagne).

Em termos percentuais (evapotranspiração real anual relativamente à precipitação total anual), os resultados decorrentes da aplicação destes dois métodos tanto para a estação da Sra. da Estrela quanto para a estação de Degraçias, são bastante inferiores aos apresentados naquele estudo (Quadro II.III.I). As percentagens calculadas por Carreira (1986) variam, pois, para a estação de Pombal, entre os 66,1 e os 57,3% (Turc e Coutagne, respectivamente) e, para Penela, entre os 66,4 e os 58,3% (*idem*). Estes valores, em particular os obtidos pelo método de Turc, encontram-se bastante acima dos valores por nós calculados (56 e 57% respectivamente para Degraçias e para a Sra. da Estrela).

Os valores absolutos calculados por estes dois métodos afiguram-se demasiado elevados, sendo mesmo inverosímeis quando consideramos o total do caudal das principais exsurgências como factor de validação. Esta conclusão provém do facto de o valor do caudal ser, em ambas as séries, e em todos os anos analisados em pormenor, sempre superior à infiltração afectiva, o que é altamente improvável. A justificação estará em se utilizar, no processo de cálculo, um único valor anual de precipitação e de temperatura, sem ter em consideração a distribuição destas variáveis ao longo do ano.

De acordo com os valores de caudal, em particular no período em estudo, constatámos que as fórmulas de Turc e Coutagne sobrestimam a evapotranspiração real, sendo mais adequadas para regiões com climas mais húmidos. A perda de 56 a 57% da precipitação anual por evapotranspiração parece demasiado na área em estudo, uma área cársica onde a topografia aplanada favorece a infiltração e a circulação hidrológica é quase totalmente

187

subterrânea, com solos predominantemente esqueléticos e onde o tipo e a densidade de vegetação não se caracterizam por grandes consumos de água. Para além disso, a não coincidência entre os meses mais chuvosos e mais quentes (que favorece extraordinariamente a perda de água para a atmosfera) parece indicar que tanto os valores obtidos pelo método de Turc quanto os resultantes da fórmula de Coutagne se encontram nitidamente sobrestimados.

Assim sendo, e apoiados na vasta bibliografia da especialidade, concluímos que o método que mais se adequa às características desta região é o de Thornthwaite, conclusão semelhante à referida por Mendes (2010) e Liñán Baena (2005) para áreas cársicas no Algarve e em Málaga (sul de Espanha), respectivamente. Por conseguinte, a decisão em adoptar o método de Thornthwaite para o cálculo da evapotranspiração real, em detrimento dos outros dois métodos, é fundamentada pelas seguintes razões:

(i) o facto de este método contemplar uma repartição desigual da precipitação e da temperatura ao longo do ano ao contrário dos outros dois que fornecem apenas o valor anual. A consideração dos valores mensais daquelas duas variáveis climáticas é particularmente importante na área em estudo que se caracteriza pela irregularidade da distribuição da precipitação e da temperatura ao longo do ano, com um forte contraste sazonal entre o Inverno e o Verão. O facto de os cálculos serem mensais e sequenciais (considerar as reservas de água provenientes do mês anterior) faz com que os valores de evapotranspiração sejam mais realistas;

(ii) o facto de se tratar de uma fórmula de cálculo que, para além das variáveis climáticas, considera a variação do armazenamento de água no solo como um parâmetro da equação e aplica-o de forma sequencial, aspecto particularmente importante nos estudos de hidrologia. Para além disso, o facto de se tratar de um maciço cársico, com infiltração rápida e circulação hipogea implica que os valores de evapotranspiração real sejam mais baixos do que em outros terrenos, pelo que os valores obtidos por este método (por vezes apontados como subestimados) nos parecem ser os que melhor se adequam à presente tarefa.

A determinação da evapotranspiração real para cada mês do ano é, portanto, extremamente importante no conhecimento do ritmo e dos quantitativos de recarga do hidrossistema, uma vez que esta depende, em parte, da repartição da evapotranspiração ao longo do ano, tal como concluem Bonacci (2001) e Fiorillo (2011) para áreas cársicas mediterrânicas. Segundo estes autores, mais do que os quantitativos anuais totais de precipitação, é a distribuição ao longo do ano da precipitação e da evapotranspiração real que comanda os processos de recarga dos aquíferos.

3.2. A recarga anual e mensal

No seguimento do processo de cálculo da evapotranspiração real, e da escolha do método mais ajustado à área de estudo, procedemos ao cálculo da recarga anual e mensal do hidrossistema de Degracias-Sicó, através do método do balanço hidrológico adaptado para regiões cársicas. Partiu-se, assim, do princípio que o volume de água que entra no hidrossistema cársico (*input*) é igual ao volume de água que sai desse mesmo hidrossistema (*output*), segundo a fórmula já anteriormente apresentada (ajustada às características da área de estudo):

$$P - ETR = Q + \Delta AP$$

A aplicação desta equação no cálculo da recarga de um hidrossistema reflecte a influência de variáveis como a precipitação, a temperatura, o tipo e espessura do solo, a cobertura vegetal (tipo e extensão das manchas de vegetação), os usos do solo, a retenção superficial de água em depressões naturais, o declive, a litologia, a fracturação, a dissolução cársica, formas exocársicas e endocársicas, bem como outras características físicas específicas da área de recarga e do próprio hidrossistema. De um modo geral, pode dizer-se que estas variáveis são tidas em consideração e aplicadas, pelo menos em parte, na determinação e na interpretação dos quantitativos de recarga do hidrossistema cársico aqui em estudo.

Recarga anual

Começámos, portanto, por calcular a recarga anual segundo o método do balanço hidrológico anual para a série temporal de referência (1979/1980-2006/2007) e para cada um dos anos hidrológicos em estudo (2009/2010-2012/2013).

O valor de recarga anual determinado para o conjunto dos quatro anos em análise – 689,0 mm – aproxima-se muito do valor médio calculado para a série de referência (697,7 mm). A quantidade de água, que efectivamente se infiltrou no sistema cársico, representa, assim, mais de 50% do total de precipitação caída na área de recarga tanto na série de referência (56,8%) quanto no quadriénio em análise (59,1%) – Quadro II.III.II. Estes quantitativos de recarga enquadram-se nos valores médios apresentados por outros autores para a região onde se localiza o hidrossistema em estudo: Carreira (1986) – 60%; Crispim (1986) – 50%; Cunha (1988) – 55%; Velho e Silva (1990) – 50%; Novo *et al.* (1991) – 50%.

Os valores de recarga anual por nós calculados são substancialmente superiores aos determinados para o aquífero Sicó-Alvaiázere por Lobo Ferreira *et al.* (1994) – 414 mm e Almeida *et al.* (2000) – 360 mm. A explicação para esta diferença tão pronunciada (mais de 40%) reside no facto de esses trabalhos considerarem o conjunto do aquífero Sicó-Alvaiázere

189

enquanto nós apenas consideramos o sector centro-norte (Degracias-Sicó), o de maior altitude, que determina, portanto, valores mais elevados de precipitação e valores mais baixos de temperatura média que se repercutem em menor evapotranspiração e maior infiltração (resultado também da planura e da concentração de formas cársicas que favorecem a infiltração neste sector do aquífero Sicó-Alvaiázere).

Acresce ainda, no caso de Almeida *et al.* (2000), a precipitação média considerada (900 mm) e a taxa de recarga da ordem dos 40%. Este último valor é, em nosso entender, manifestamente baixo para a área de recarga em estudo, já que é igual à taxa utilizada por Almeida (1985) para o Algarve central onde, segundo o autor, as formas de absorção do carso (superficial) são pouco desenvolvidas, extensas áreas estão cobertas por *terra rossa* e a precipitação tem um carácter fortemente torrencial, perdendo-se parte dela por escoamento superficial. Este quadro regional é muito diferente da área de estudo, onde, como vimos, é comum registarem-se valores de precipitação anual superiores a 1100 mm (num regime de precipitação persistente – mais de 120 dias de precipitação por ano) e se observa um inquestionável favorecimento da infiltração.

Quadro II.III.II – Determinação dos componentes do balanço hidrológico anual, em mm e Mm³, para a série de referência (Degracias) e para cada ano do período em estudo

	Degracias		Sra. da Estrela					
	1979/80-2006/07	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2009/10-2012/13		
Precipitação anual (P)	mm	1228,7	1278,3	1230,4	688,7	1464,6	1165,5	
Input								
Recarga (R) ¹ (infiltração efectiva)	R/P	mm	697,7	850,3	756,8	179,1	995,3	689,0
		%	56,8	66,5	61,5	26,0	68,0	59,1
		Mm ³	78,3	95,4	84,9	20,1	111,7	77,3
Output (Caudal - Q)								
Olhos d'Água do Anços + Ourão	QR	mm	553,6	769,4	533,4	252,1	940,6	623,9
		%	79,3	90,5	70,5	140,8	94,5	90,6
		Mm ³	66,4	86,4	59,9	28,3	105,6	70,0
Restantes exurgências ²	QR	mm	55,4	76,9	53,3	25,2	94,1	62,4
		%	7,9	9,0	7,05	14,1	9,5	9,1
		Mm ³	7,4	8,6	6,0	2,8	10,6	7,0
Total	QR	mm	609,0	846,3	586,8	277,4	1034,7	686,3
		%	87,3	99,5	77,5	154,9	104,0	99,6
		Mm ³	73,8	95,0	65,9	31,1	116,1	77,0
Armanamento (ΔAP)								
Recarga - Caudal (total)	ΔAP/R	mm	88,7	4,0	170,0	-98,3	-39,5	2,7
		%	12,7	0,5	22,5	-	-	0,4
		Mm ³	10,0	0,4	19,1	-11,0	-4,4	0,3

¹ Calculada com base na evapotranspiração real, obtida pelo método de Thornthwaite (R = P - ETR com RU=75 mm)

² Inclui: Rio da Estrada, Canuncho, Casal dos Moregos, Fonte da Rainha

Mm³ = 1 milhão de m³ = (1 hm³). Área considerada nos cálculos = 112 Km² (Área de recarga)

Para além da justificação relacionada com as características da área de estudo, outra possível explicação para parte desta diferença residirá no facto de, no presente estudo, se tratar de uma série temporal curta (quatro anos apenas) e na qual predominam anos tendencialmente húmidos.

Os valores de recarga aqui determinados, particularmente os correspondentes aos quatro anos em análise são, portanto, ligeiramente superiores ao volume de recarga tido como o mais comum em hidrossistemas cársicos – entre 45% e 55% da precipitação total (Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2012). Na interpretação das taxas de recarga obtidas para o hidrossistema de Degraças-Sicó, e uma vez que não temos valores similares para outros hidrossistemas cársicos próximos para aferir os resultados obtidos, optámos pela comparação com regiões cársicas mediterrânicas de características climáticas e morfológicas aproximadas (precipitação anual média superior a 800-1000 mm; período Outono/Inverno frio e húmido e verões quentes e secos; áreas de média montanha com altitude superior a 400 m) – Quadro II.III.III.

Não obstante a especificidade de cada sistema cársico e a diversidade dos valores de recarga determinados, pode afirmar-se que os valores obtidos no presente estudo não diferem muito dos resultados de outras investigações semelhantes em regiões cársicas de média montanha no Mediterrâneo. Verifica-se, portanto, o seu enquadramento nos intervalos estimados para esses hidrossistemas, não se afastando muito dos respectivos valores médios.

Em termos anuais, a recarga foi muito desigual nos quatro anos analisados, tanto em valores absolutos quanto em valores relativos (relação percentual com a precipitação anual total). O valor mais baixo de recarga (179,1 mm, cerca de 26% da precipitação) ocorreu no ano hidrológico de 2011/2012 coincidente com o ano mais seco da série, onde se verificou uma prolongada e acentuada seca invernal. Em contrapartida, os anos de 2009/2010 e 2012/2013 caracterizaram-se por valores de recarga elevados (850,3 mm e 995,3 mm, respectivamente), que representaram, no primeiro caso, 66,5% da precipitação anual ocorrida e, no segundo caso, 68,0%, valores muito superiores à média para estas regiões. A explicação para esta vincada variação interanual radica nos valores muito diferentes dos quantitativos pluviais do Inverno e início de Primavera e também da evapotranspiração real primaveril que ocorreram nestes quatro anos, como veremos mais à frente ao analisar a variação mensal da recarga de forma pormenorizada.

Para além do valor de recarga anual, calculámos também o armazenamento da água infiltrada no interior do hidrossistema em estudo (Armazenamento = Recarga anual – Caudal anual médio), já que nem toda a água que entra durante um ano hidrológico é drenada pelas

191

Quadro II.III.III – Recarga relativamente à precipitação total (em percentagem) em hidrossistemas cársicos de média montanha em regiões do Mediterrâneo

Sistema cársico / Localização	Recarga / Precipitação total (%)			Autor
	Método(s)	Intervalo de variação	Média	
Unidade Jurquera-Nieves (Málaga - Espanha)	Kessler; balanço de cloretos; balanço hidrológico (Turc, Coutagne, Thornthwaite)	21 - 67	52	Lifán Baena (2005)
Cordilheira Bética (Espanha)		33 - 55		
Sierra de Libar	Kessler; balanço de cloretos; balanço hidrológico	53 - 55	55	Andreo <i>et al.</i> (2004) e
Sierra de las Nieves	(Thornthwaite); Modelo APLIS		45	Andreo <i>et al.</i> (2008)
Sierra Gorda			50	
Sierra de las Nieves	Método geo-estatístico	52 - 66		Pardo-Igúzquiza <i>et al.</i> (2012)
Apeninos (Itália central)	"Annual effective infiltration coefficient"	48 - 78	59	Allocca <i>et al.</i> (2014)
Sector sul	"Annual effective infiltration coefficient"	até 90		Celico (1983) ¹ ; Allocca <i>et al.</i> (2007) ¹
Sector central	-		70	Boni <i>et al.</i> (1982) ¹
Aqüífero de Murgia (SE Itália)	Modelação a partir do balanço hidrológico (Penman-Monteith) e da percentagem de área de recarga com presença de solo	25 - 83		Canora <i>et al.</i> (2008)
Saugras (Sul de França)	-	50±5		Chemin <i>et al.</i> (1974) ³
Causses (Sul de França)	Balanço hidrológico		50	Drouge (1971) ³
Gradole Spring (Croácia)	-	50 - 53		Drouge (1971) ³
Regiões cársicas (Croácia)	"Annual effective infiltration coefficient"	35 - 76	57	Bonacci (2001)
Sierra de Gádor (SE Espanha)	Balanço hidrológico	35 - 70	53	Vilimonovic (1965) ¹
Sierra de Gádor (SE Espanha)	Balanço de cloretos; modelação matemática; traçagens	25 - 55		Andreo <i>et al.</i> (2012)
Sierra Grossa (Valência - Espanha)	-		46	Pulido-Bosch (1975) ³
Parnassos-Ghiona (Grécia)	-		49,8	Soulios (1984) ¹
Mácio Calcário Estremenho (Portugal)	Método de Kessler		50,7	Burdon (1965)
Aqüíferos cársicos do Algarve central (Portugal)	-	37 - 43		Novo <i>et al.</i> (1991) in Almeida <i>et al.</i> (2000)
	Método de Kessler	42 - 58		Almeida (1992)
	Balanço de cloretos	62 - 68	40 ²	Almeida (1985)
	Balanço de cloretos	30 - 50		(idem)
	-		40	Almeida <i>et al.</i> (2000)
Aqüífero Sicó-Alvaiázere (Portugal)	Método de Kessler	58 - 62		Carreira (1986)
	Balanço hidrológico		50	Crispim (1986)
	Balanço hidrológico		55	Cunha (1988)

¹Clados por Allocca *et al.* (2014); ²Valor corrigido, adaptado às características exocársicas e climáticas da região em estudo; ³Clados por Almeida (1985)

exurgências durante esse ano ou, em contrapartida, em anos de escassa recarga é a água armazenada em profundidade que assegura grande parte do caudal das exurgências permanentes do bordo oeste do Maciço Cársico de Sicó. O valor médio calculado para o período em análise é de 0,3 Mm³, o que equivale a 0,4% da recarga anual média do hidrossistema em estudo. Em termos interanuais, a diferença de armazenamento em profundidade é muito mais acentuada, indo dos 0,5% da recarga anual em 2009/2010 aos 22,5% em 2010/2011 (0,4 Mm³ e 19,1 Mm³, respectivamente). No ano de 2011/2012 nem

sequer ocorreu armazenamento, tendo o hidrossistema perdido água das suas reservas, o que se compreende pela escassa recarga ocorrida nesse ano e pelo facto das exsurgências permanentes continuarem a debitar água.

Os resultados obtidos para o período em análise parecem-nos bastante realistas, até porque se encontram apoiados em séries de registos digitais da precipitação e do caudal. No seu conjunto, e mesmo sendo um período bastante curto (apenas quatro anos) encerra uma grande diversidade de situações hidrometeorológicas, pelo que o valor calculado aproximar-se-á bastante de um valor médio, muito mais próximo da realidade. Decorrente dessa variabilidade (quantitativa e temporal) da recarga, a variação do armazenamento no interior do hidrossistema foi também muito desigual neste período, com valores excepcionalmente altos em 2010/2011 (19,1 Mm³), negativos em 2011/2012 (devido à grande secura invernal) e surpreendentemente negativos em 2012/2013 (a descarga foi superior à recarga, o que parece estar ligado ao caudal muito elevado durante a Primavera na sequência de um mês de Março muito chuvoso, embora esta explicação careça ainda de um estudo muito mais aprofundado).

Não obstante o rigor que colocamos nos dados e nos cálculos, cremos que os valores de armazenamento no período em estudo possam estar ainda ligeiramente sobrestimados, uma vez que não estão contabilizadas no caudal total as pequenas exsurgências de *trop plein* que funcionam durante o período mais húmido do ano bem como pequenas saídas pontuais de água, cujos quantitativos são praticamente impossíveis de avaliar. Assim sendo, os cálculos efectuados são perfeitamente válidos e conformes ao princípio segundo o qual volume de água que entra no hidrossistema cársico (recarga, $P - ETR$) é igual ao volume de água que sai desse mesmo hidrossistema (descarga, $Q + \Delta AP$).

Recarga mensal

O cálculo da recarga mensal foi elaborado com base no balanço hidrológico sequencial de Thornthwaite-Mather, cuja vantagem principal reside no facto de o balanço para um determinado mês ter em consideração as condições edafo-climáticas procedentes (do mês anterior). O processo de cálculo foi semelhante ao da recarga anual, tendo-se iniciado com a determinação da evapotranspiração real mensal, a partir da qual se determinou a recarga mensal do hidrossistema, ou seja, $R = P - ETR$ (nos meses em que a reserva útil do solo está completa) ou $R = (P - ETP) - \Delta S$ (quando ocorre reposição da reserva útil)¹².

A enorme importância hidrológica da recarga mensal e, conseqüentemente, da sua distribuição ao longo do ano hidrológico obrigou a que procedêssemos a uma aprofundada análise da dinâmica mensal da recarga e da intrincada relação dos factores que a condi-

¹² Ver nota de rodapé 4 do presente capítulo.

cionam. Procurámos, pois, dissecar a complexa relação *precipitação / temperatura / evapotranspiração / infiltração efectiva (recarga)* através dos seguintes cálculos estatísticos: (i) coeficiente de correlação bivariada entre todos aqueles parâmetros para o conjunto do ano hidrológico e, mais especificamente ainda, para o período mais chuvoso (Novembro a Março), quando ocorre a maior parte a recarga; (ii) análise factorial em componentes principais, ferramenta estatística utilizada para discriminar quais as variáveis mais importantes num conjunto de amostras e para identificar grupos ou famílias que possam ter, potencialmente, relação. No presente trabalho, esta técnica estatística foi utilizada em detrimento de outras provavelmente mais adequadas (por exemplo a regressão múltipla) por permitir, em simultâneo, determinar qual das variáveis em análise (temperatura, precipitação, evapotranspiração) apresentava um maior peso na recarga e identificar/individualizar grupos de meses em que essas variáveis (*per si* ou interrelacionadas) exerceram uma influência semelhante nesse processo. Esta técnica estatística assumiu, assim, uma dupla função: em primeiro lugar, constatar a configuração dos meses em função dos eixos factoriais (dois factores) e, conseqüentemente, agrupá-los em função da similitude de parâmetros (e processos associados) que, em cada grupo de meses, mais interferiram no comportamento da recarga (perspectiva temporal). A partir daí foi possível aferir (ainda que indirectamente) qual desses parâmetros teve maior influência na recarga mensal (ritmo e quantitativos mensais) ao longo de cada ano hidrológico em estudo. Procurámos, pois, compreender e estimar quantitativamente (a partir das tabelas associadas a cada eixo factorial) e temporalmente (em cada mês) como essas variáveis, e respectivas inter-relações, se vão repercutir no comportamento mensal da recarga.

A primeira constatação referente ao processo de recarga mensal foi a de uma multiplicidade de situações, em resultado do quadriénio em estudo encerrar em si anos hidrológicos profundamente desiguais em termos dos quantitativos totais e da distribuição mensal da precipitação de Outubro a Maio. Face à heterogeneidade de situações hidrometeorológicas ocorridas durante o período em estudo e às imensas particularidades (e respectivas explicações), a primeira abordagem nesta análise incidirá sobre o comportamento da recarga (e das variáveis relacionadas) na série de referência e no conjunto dos quatro anos em análise. Após essa visão inicial de conjunto, proceder-se-á a uma análise mais específica dos diferentes anos hidrológicos, individualmente.

Numa perspectiva geral, constata-se que a recarga, tal como se previa, segue fielmente a distribuição mensal da precipitação – coeficiente de correlação (r) > 0,9 –, ou seja, um aumento da precipitação representa um aumento da recarga e uma descida da precipitação significa uma descida na recarga (Quadro II.III.IV). De notar, contudo, que esta estrita relação se mantém apenas até Maio, pelo que um aumento da precipitação em Maio ou em

Junho não se reflecte na recarga, dado que a evapotranspiração real suplanta a precipitação. Ainda uma outra particularidade na relação precipitação-recarga: independentemente da quantidade de precipitação acumulada durante o semestre húmido a recarga termina, impreterivelmente, em Maio.

Quadro II.III.IV – Coeficientes de correlação r entre as variáveis precipitação, temperatura, evapotranspiração real (ETR) e recarga na série de referência (estação de Degraças) e no período em estudo (estação da Sra. da Estrela) para o conjunto do ano hidrológico e para o período de recarga (Novembro – Março)

		Ano hidrológico				Novembro - Março			
		Precipitação	Temperatura	ETR	Recarga	Precipitação	Temperatura	ETR	Recarga
Degraças (1979/80 - 2006/07)	Precipitação	1	-0,82**	-0,39	0,97*	1	-0,25	-0,83	0,995**
	Temperatura		1	0,47	-0,841**		1	0,73	-0,35
	ETR			1	-0,605*			1	-0,884*
	Recarga				1				1
	N = 12 / N = 5								
S. Estrela (2008/10 - 2012/13)	Precipitação	1	-0,874**	-0,22	0,958*	1	0,36	0,18	0,970*
	Temperatura		1	0,28	-0,863**		1	0,964**	0,13
	ETR			1	-0,49			1	-0,06
	Recarga				1				1
	N = 12 / N = 5								
2009/2010	Precipitação	1	-0,872**	-0,20	0,976*	1	0,20	-0,09	0,986*
	Temperatura		1	0,07	-0,828**		1	0,949**	0,03
	ETR			1	-0,41			1	-0,26
	Recarga				1				1
	N = 12 / N = 5								
2010/2011	Precipitação	1	-0,787**	-0,06	0,957**	1	-0,80	-0,76	0,996**
	Temperatura		1	0,42	-0,862**		1	0,963**	-0,85
	ETR			1	-0,35			1	-0,81
	Recarga				1				1
	N = 12 / N = 5								
2011/2012	Precipitação	1	-0,20	0,11	0,926**	1	0,19	0,37	0,997**
	Temperatura		1	0,581*	-0,42		1	0,979**	0,12
	ETR			1	-0,27			1	0,30
	Recarga				1				1
	N = 12 / N = 5								
2012/2013	Precipitação	1	-0,687**	-0,10	0,980**	1	0,29	0,79	0,999**
	Temperatura		1	0,13	-0,685*		1	0,45	0,28
	ETR			1	-0,30			1	0,77
	Recarga				1				1
	N = 12 / N = 5								

** Correlação estatisticamente significativa ao nível de 0,01.

* Correlação estatisticamente significativa ao nível de 0,05.

195

Outra das conclusões desta análise é a forte relação dos valores médios da recarga com os valores médios da temperatura do ar ($r > -0,8$), indicando uma significativa influência da temperatura no processo de transformação da precipitação em recarga. De realçar também que a quantidade anual de água perdida para a atmosfera por evapotranspiração parece ser independente do total de precipitação anual, como comprovam, por um lado, o valor médio de $r (-0,14)$ e, por outro lado, os quantitativos de evapotranspiração real em anos secos poderem ser mais elevados do que em anos húmidos. Esta situação verificou-se em 2011/2012 com uma evapotranspiração real de 509,7 mm num total anual de precipitação de 688,7 mm, valor de pluviosidade bastante baixo quando comparado com os 1464,4 mm de 2012/2013 onde a evapotranspiração real foi de apenas 469,3 mm. Situação idêntica foi constatada por Fiorillo (2011) em regiões cársicas montanhosas em Itália.

Relativamente ao comportamento intermensual (Figura II.III.2), o balanço entre a precipitação total, a evapotranspiração real e a recarga mostrou, inequivocamente, que o período de **Novembro a Março** é aquele que mais contribui para a recarga do hidrossistema de Degraças-Sicó. A justificação reside nos elevados quantitativos pluviométricos e no diminuto valor de evapotranspiração real, que não ultrapassa os 19% da precipitação total, chegando mesmo, em Janeiro, a quedar-se abaixo dos 12% – Quadro II.III.V(A; B). Apesar de ser o período mais húmido, as baixas temperaturas da área de recarga, de maior altitude, fazem com que os valores de evapotranspiração sejam muito baixos, pelo que a maior parte da precipitação acaba por se infiltrar, processo favorecido pelas características geomorfológicas da área. Consequentemente, a infiltração efectiva (recarga) aproxima-se, e ultrapassa mesmo os 80% da precipitação registada nestes meses, chegando quase aos 89% em Janeiro – Quadro II.III.V(A; B).

O processo de recarga, que na maioria dos anos se inicia em Outubro, ganha expressão nos meses de Novembro, Dezembro e Janeiro, por norma os mais chuvosos do ano (série de referência e média 2009/2010 – 2012/2013). A precipitação elevada e, por norma persistente, que ocorre neste trimestre, juntamente com baixas perdas por evapotranspiração, e com a reserva do solo já completa, faz com que sejam estes os meses que mais contribuem para a recarga e para o armazenamento no hidrossistema cársico em estudo. Neste período, a que se junta por vezes Fevereiro e Março, a recarga é muito superior à descarga, o que permite que, quando a alimentação pluvial diminui drasticamente e a recarga cessa, o caudal das exsurgências do bordo oeste do Maciço de Sicó (muitas delas permanentes) seja assegurado pela água que se infiltrou e ficou armazenada no hidrossistema. Os dados da série de referência comprovam esta realidade, ou seja, em média, cerca de 82% da recarga total anual ocorre no período Novembro-Março (589 mm), mas pouco mais de metade do caudal anual (399 mm – 66%) é registado neste mesmo período, pelo

que parte da água infiltrada fica temporariamente armazenada no interior do hidrossistema, drenando nos meses seguintes e durante o estio.

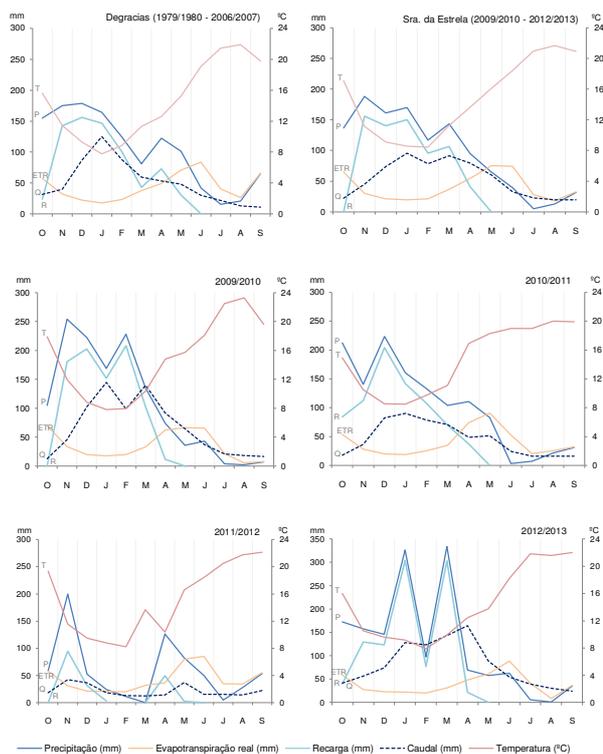


Figura II.III.2 – Evolução mensal da precipitação, temperatura média do ar, evapotranspiração real, recarga e caudal mensal médio na série de referência, no conjunto dos quatro anos e em cada ano hidrológico em estudo

197

A grande importância do final do Outono e do Inverno na recarga e no armazenamento no hidrossistema cársico de Degracias-Sicó é ainda sublinhada pela manutenção do caudal em muitas nascentes cársicas mesmo após longos períodos (vários meses) com quantitativos pluviométricos excepcionalmente baixos (caso da prolongada seca estival em 2009/2010 e da acentuada seca invernal de 2011/2012).

Quadro II.III.V – As componentes do balanço hidrológico (e relações percentuais entre elas) calculadas com base nos dados das estações de Degracias e da Sra. da Estrela (por ano)

A. Degracias (1979/1980-2006/2007)

	Precipitação total (P)	Temp. média	ETR ¹	ETR/P	Recarga ²	R/P
	mm	°C	mm	%	mm	%
O	158,1	15,6	57,1	36,1	27,7	17,5
N	173,9	11,4	32,2	18,5	141,6	81,5
D	173,8	9,3	22,2	12,8	151,5	87,2
J	155,4	7,8	17,6	11,3	137,9	88,7
F	123,1	8,8	23,6	19,2	99,5	80,8
M	81,7	11,3	37,8	46,3	43,9	53,7
A	118,5	12,6	49,2	41,5	69,3	58,5
M	97,3	15,2	71,2	73,2	26,1	26,8
J	43,4	19,1	84,7	195,3	0,0	-
J	15,7	21,4	41,1	261,9	0,0	-
A	21,0	21,9	27,0	128,3	0,0	-
S	66,7	19,8	67,3	101,0	0,0	-
Total/Média	1228,7	14,5	531,0		697,6	
(%)			ETR/P 43,2		R/P 56,8	

B. Sra. da Estrela (2009/2010-2012/2013)

	Precipitação total (P)	Temp. média	ETR ¹	ETR/P	Recarga ²	R/P	Caudal (Q) ³
	mm	°C	mm	%	mm	%	mm
O	136,9	17,1	64,6	47,2	-	-	24,1
N	188,0	11,1	30,2	16,1	155,8	82,9	48,4
D	161,1	9,1	21,0	13,1	140,1	86,9	78,8
J	169,8	8,6	19,6	11,6	150,1	88,4	101,9
F	117,2	8,5	21,4	18,3	95,8	81,7	83,8
M	143,3	11,3	36,7	25,6	106,5	74,4	97,9
A	95,1	13,6	54,4	57,2	40,7	42,8	85,1
M	64,7	16,1	75,3	116,4	0,0	-	64,5
J	39,5	18,4	74,2	187,7	0,0	-	35,1
J	5,2	20,9	28,2	541,8	0,0	-	24,4
A	13,2	21,7	18,2	138,1	0,0	-	21,1
S	31,7	20,9	32,7	103,3	0,0	-	21,2
Total/Média	1165,5	14,8	476,5		689,0		686,3
(%)			ETR/P 40,9		R/P 59,1		

¹ Evapotranspiração real pelo método de Thornthwaite (Reserva útil do solo = 75 mm)

² Recarga (R) = P - ETR (quando a reserva útil do solo está completa e P ≥ ETR). No início do ano hidrológico, quando ocorre a reposição da reserva útil há que considerar a variação dessa água armazenada no solo. Nessa situação: Recarga = (P - ETR) - ΔS, sendo ΔS a variação da água armazenada no solo.

³ Caudal mensal médio (Q) = Ochos d'Água do Anços (OAA) + Ourão + ((OAA+Ourão)*10%)

C. Sra. da Estrela (por ano hidrológico)

		Precipitação total (P)		ETR ¹	ETR/P	Recarga ²		R/P	Caudal (Q) ³
		mm	°C			mm	%		
2009/2010	O	104,6	17,9	69,7	66,6	0,0	-	13,6	
	N	254,0	11,9	33,8	13,3	180,6	71,1	48,9	
	D	222,5	8,8	20,0	9,0	202,4	91,0	108,9	
	J	169,0	7,8	17,4	10,3	151,6	89,7	154,7	
	F	228,0	8,0	20,0	8,8	208,0	91,2	105,6	
	M	134,8	10,4	32,9	24,4	101,9	75,6	149,3	
	A	74,0	14,8	62,2	84,0	11,8	16,0	97,9	
	M	35,8	15,7	65,9	184,0	0,0	-	69,1	
	J	42,8	18,1	65,5	153,0	0,0	-	39,6	
	J	3,4	22,5	21,5	632,7	0,0	-	22,3	
	A	2,2	23,3	5,6	252,7	0,0	-	19,0	
	S	7,2	19,6	7,7	107,2	0,0	-	17,3	
	Total/Média	1278,3	14,9	428,0	850,3			846,3	
%			ETR/P 33,5	R/P 66,5					
2010/2011	O	212,6	14,9	53,6	25,2	84,2	39,6	18,9	
	N	140,6	10,5	28,1	20,0	112,5	80,0	39,1	
	D	223,4	8,6	19,6	6,8	203,8	91,2	88,1	
	J	160,2	8,5	18,5	11,6	141,7	88,4	96,5	
	F	132,6	9,7	25,4	19,2	107,2	80,8	83,8	
	M	104,2	11,1	34,5	33,1	69,7	66,9	75,8	
	A	110,8	16,9	73,8	66,6	37,0	33,4	51,8	
	M	83,2	18,3	90,4	108,6	0,0	-	55,2	
	J	3,0	19,0	52,3	1742,5	0,0	-	26,0	
	J	7,4	19,0	20,4	276,3	0,0	-	16,9	
	A	21,6	20,0	25,2	116,5	0,0	-	17,4	
	S	30,8	19,9	31,9	103,4	0,0	-	17,4	
	Total/Média	1230,4	14,7	473,6	756,8			586,8	
%			ETR/P 38,5	R/P 61,5					
2011/2012	O	58,1	19,4	58,3	100,3	0,0	-	19,5	
	N	199,7	11,6	30,9	15,5	94,5	47,3	45,2	
	D	52,4	9,5	21,4	40,9	31,0	59,1	39,1	
	J	23,8	8,8	20,5	86,2	3,3	13,8	19,6	
	F	11,0	8,2	20,0	181,8	0,0	-	13,9	
	M	0,0	13,7	31,8	-	-	-	13,2	
	A	126,0	10,4	36,2	28,7	49,0	38,9	15,2	
	M	82,4	16,6	80,0	97,1	2,4	2,9	39,5	
	J	49,8	18,4	85,1	170,9	0,0	-	16,4	
	J	4,4	20,5	34,7	788,8	0,0	-	16,4	
	A	27,6	21,8	34,1	123,4	0,0	-	15,4	
	S	53,6	22,1	55,1	102,8	0,0	-	23,9	
	Total/Média	688,7	15,1	509,7	179,1			277,4	
%			ETR/P 74,0	R/P 26,0					
2012/2013	O	172,2	16,0	58,6	34,0	40,1	23,3	44,3	
	N	157,6	10,5	27,9	17,7	129,7	82,3	60,3	
	D	146,2	9,6	22,7	15,6	123,5	84,4	79,2	
	J	326,0	9,1	22,2	6,8	303,8	93,2	136,7	
	F	97,2	7,9	19,9	20,5	77,3	79,5	131,8	
	M	334,1	9,9	31,0	9,3	303,1	90,7	153,2	
	A	69,6	12,4	48,2	69,2	21,4	30,8	175,7	
	M	57,6	13,8	61,0	106,0	0,0	-	94,3	
	J	62,4	18,2	88,6	141,9	0,0	-	58,2	
	J	5,6	21,8	41,6	743,6	0,0	-	42,1	
	A	1,2	21,6	8,4	703,8	0,0	-	32,6	
	S	35,0	22,0	36,3	103,6	0	-	26,3	
	Total/Média	1464,6	14,4	469,3	995,3			1034,7	
%			ETR/P 32,0	R/P 68,0					

199

A ocorrência do maior volume da recarga no período Outono-Inverno, quando a perda por evapotranspiração está no nível mínimo, é extremamente importante nas regiões cársicas, tal como sublinham, por exemplo, Bonacci (2001) e Fiorillo (2011). Segundo este último autor, uma distribuição da precipitação ao longo do ano hidrológico que se afaste desta pode reduzir o caudal das exsurgências e provocar graves problemas no abastecimento da população.

A média estimada para os vários componentes do balanço hidrológico no período em estudo (2009/2010-2012/2013) acompanha, de perto, o comportamento desses mesmos componentes na série de referência, tal como acabamos de observar. A percentagem de evapotranspiração real relativamente ao total pluviométrico nos cinco meses mais chuvosos (Novembro a Março) não é muito diferente, variando entre os 10,7% e os 25,6% da precipitação total (apenas Março na série de referência sai deste intervalo). Consequentemente, a quantidade de água infiltrada correspondeu a mais de 75% da precipitação total, o que significa que a perda para a atmosfera foi muito baixa nestes meses, tendo-se infiltrado a maior parte da precipitação ocorrida – Quadro II.III.V(B).

Valores percentuais tão elevados de recarga são comuns em sistemas cársicos de montanha na região do Mediterrâneo, tal como o documentado por Canora *et al.* (2008); Celico (1983) e Allocca *et al.* (2007) in Allocca *et al.* (2014) para os Apeninos, Itália. Estes últimos estudos determinaram coeficientes de recarga próximos dos 0,9 em áreas somitais aplanadas e com características endorreicas (Quadro II.III.III.). No mesmo sentido, Andreo *et al.* (2008), concluem para vários hidrossistemas cársicos de montanha no sudeste de Espanha, a existência de elevadas taxas de recarga (as mais altas superiores a 80%) em regiões calcárias elevadas e aplanadas (declive inferior a 8%) e de abundante precipitação.

Os meses de **Março e Abril**, por serem meses de transição hidrometeorológica podem ter comportamentos variáveis de ano para ano, podendo qualquer um destes dois meses aparecer como o pico primaveril de precipitação e, consequentemente, de recarga. Assim, de 1979/1980 a 2006/2007, Março caracterizou-se por valores médios de precipitação baixos (81 mm), numa diminuição acentuada da precipitação e um aumento assinalável da evapotranspiração real e, consequentemente, uma descida pronunciada da infiltração efectiva. Comportamento inverso foi registado em Abril, com valores de precipitação elevados (122,3 mm – pico primaveril), o que significou um aumento na recarga, com uma parte considerável a ser armazenada, uma vez que esse aumento da recarga pouco se reflectiu no caudal das exsurgências (apenas amorteceu a descida mais rápida do caudal, característica desta altura do ano). Não obstante as variações pluviométricas de ano para ano e as situações de recarga associadas, Março e Abril caracterizam-se pela descida acentuada da recarga justificada pela redução da precipitação e aumento da evapotrans-

piração real (em função do aumento da temperatura e do desenvolvimento da vegetação que caracteriza o início da Primavera)

Maio significa a cessação por completo do processo de recarga em resultado da diminuição abrupta da precipitação (para cerca de metade da precipitação de Abril) e a subida destacada da evapotranspiração real, marcando, assim, o início do período de *deficit* hidrológico. A comparação entre o período analisado e a série de referência mostra que a diferença mais relevante, nos anos em análise, se centra, exactamente, em Maio (Quadro II.III.V e Figura II.III.2). Este deixou de ser o último mês de recarga para passar a ser o primeiro mês de *deficit* hidrológico (a evapotranspiração real a ser muito superior à precipitação), o que significa a antecipação, em 1 mês, da época mais seca do ano, aumentando, assim, a duração do período em que não ocorre recarga.

O intervalo temporal que se estende de **Junho a meados de Setembro** é marcadamente seco, sem ocorrência de recarga, sendo, portanto, o caudal das exsurgências totalmente assegurado pelas reservas internas do hidrossistema, já que a escassa precipitação ocorrida nestes meses é imediatamente devolvida à atmosfera por evapotranspiração devido às elevadas temperaturas.

Setembro e Outubro são, igualmente, meses de transição hidrometeorológica, caracterizados por uma enorme subida nos quantitativos pluviométricos, embora sem uma proporcional subida na recarga. Setembro marca o final do Verão, com a chegada da primeira precipitação, insuficiente, contudo, para produzir recarga devido às elevadas perdas por evapotranspiração real (valores, por vezes, semelhantes aos da Primavera) e à necessidade de reposição das reservas hídricas do solo.

O mês de Outubro, embora sendo bastante variável em termos pluviométricos, representa, por norma, o início do período de recarga, em particular nos anos em que se registam elevados valores de precipitação (por vezes superiores a 200 mm). Os quantitativos de recarga são, igualmente, muito variáveis neste mês, podendo, inclusive, ser nulos, quando as reservas do solo ainda não se encontram satisfeitas apesar do aumento considerável da precipitação, tal como aconteceu em 2009/2010 e 2011/2012. Dos anos analisados sobressai que, em Outubro, quando ocorre recarga, a percentagem face à precipitação é bastante baixa (23,3% em 2012/2013), excepto em situações de precipitação muito abundante neste mês (caso de 2010/2011).

A complexidade da hidrodinâmica destes meios, e deste em particular, ressalta ainda mais nítida do estudo individual de cada ano hidrológico, principalmente porque os quatro anos em estudo têm características hidrometeorológicas distintas (totais de precipitação e recarga muito diferentes bem como a sua distribuição ao longo do período Outono-Inverno). Tentando não ser demasiadamente exaustivos na análise, procuraremos identificar e

201

explicar as principais particularidades do processo de recarga ao longo do ano hidrológico, considerando o período dos quatro anos em análise. Assim, de salientar:

(i) elevada variabilidade interanual dos quantitativos de recarga e da respectiva percentagem face ao total de precipitação anual. A variação vai dos 179,1 mm (2011/2012, ano seco) aos 995,3 mm (2012/2013 – ano húmido), representando uma percentagem de, respectivamente, 26,0% e 68,0% do total pluviométrico anual. Os anos de 2009/2010 e 2010/2011 registaram valores intermédios de 850,3 mm (66,5%) e 756,8 mm (61,5%), decalcando, em qualquer dos anos, o ritmo sazonal e mensal da precipitação. A recarga será tanto mais elevada quanto maior for o total anual da precipitação, mostrando, como se esperava, um maior peso do factor precipitação na explicação dos valores de recarga, em particular no período Novembro-Março (coeficientes de correlação precipitação-recarga superiores a 0,98);

(ii) a crucial importância do período Novembro-Março nos valores e no comportamento da recarga. O estudo da relação precipitação/recarga em cada um dos anos em análise, mesmo com características pluviométricas muito diferentes, mostrou, incontestavelmente, que os máximos de precipitação ocorridos de Novembro a Março se traduzem em taxas de infiltração extremamente elevadas, superiores a 66%, ultrapassando mesmo os 90% – Quadro II.III.V(C), com excepção apenas do ano de 2011/2012, pelas razões já referidas. O mesmo não acontece nos picos primaveris de precipitação, principalmente se ocorrerem em Abril, quando, apesar da resposta positiva da recarga, a água infiltrada corresponde a menos de 40% do total de precipitação mensal. Esse pico pluvial primaveril pode mesmo nem sequer se repercutir na recarga, tal como se verificou em 2010/2011 no seguimento de um Outono-Inverno 'normal' em termos de pluviosidade. Situação que se explica pela temperatura mensal média bastante alta desse mês (16,9°C), o que favoreceu a evapotranspiração. Pelo contrário, mesmo que se traduza numa subida acentuada da recarga (caso de 2011/2012), favorecida pela temperatura mensal média anormalmente baixa (10,4°C), essa percentagem de água infiltrada queda-se pelos 39% da precipitação registada.

A importância fulcral do período de Novembro a Março (e da distribuição mensal da precipitação) na recarga deste hidrossistema cársico foi demonstrada pela comparação pormenorizada dos anos de 2009/2010 e 2010/2011. Trata-se de anos hidrológicos muito semelhantes, tanto do ponto de vista pluviométrico (1278,3 mm e 1230,4 mm, respectivamente) quanto da evapotranspiração real (428,0 mm em 2009/2010 e 473,6 mm em 2010/2011). No entanto, os totais anuais de recarga foram, proporcionalmente, mais elevados em 2009/2010 (850,3 mm) do que em 2010/2011 (756,8 mm) e, principalmente, a repercussão da recarga nos quantitativos anuais de caudal foi bastante dispar, com 2010/2011 a representar apenas 69% do caudal de 2009/2010 (586,8 mm vs 846,3 mm), o

que obrigou a um estudo mais pormenorizado, ao nível do principal período de recarga (Novembro a Março), para tentar compreender esta diferença tão pronunciada.

A primeira explicação para esta diferença nos valores da recarga e do caudal reside, principalmente, no facto de em 2009/2010, de Novembro a Março, ter ocorrido 78,9% da precipitação total anual e se ter registado 99,3% da recarga anual; enquanto, no ano seguinte, aqueles valores descem para 61,8% (percentagem de precipitação anual) e para 83,9% (percentagem de recarga anual) – Quadro II.III.VI. A diferença percentual da recarga entre os dois anos representa uma diferença substancial em termos de volume de recarga – 95,4 Mm³ (850,3 mm) em 2009/2010 e apenas 84,9 Mm³ (756,8 mm) no ano seguinte. Para além dos quantitativos mensais, importa salientar o número de dias com precipitação e as características da precipitação, em particular dos dias com precipitação superior a 10 mm e a 20 mm (ver Quadro II.II.II). Em 2009/2010, no período Novembro-Março, registou-se um total de 90 dias com precipitação, tendo ocorrido 38 dias com precipitação superior a 10 mm, sendo que desses, 20 dias foram de precipitação elevada (superior a 20 mm, 53%) enquanto, no mesmo período em 2010/2011, o número de dias com precipitação foi de 79, sendo que 28 totalizaram mais de 10 mm e, desses, apenas 11 registaram mais de 20 mm (39%). As sequências de dias com precipitação (≥ 1 mm) foram mais abundantes em 2009/2010, com cerca de cinco sequências de poucos dias em que, no total, se registaram mais de 70 mm (três delas acima dos 100 mm) – ver Figura II.II.7. No ano de 2010/2011 esses valores foram um pouco mais baixos (apenas três sequências com mais de 70 mm e duas com mais de 100 mm).

A segunda explicação reside no facto do pico outonal de precipitação em 2009/2010 ter ocorrido em Novembro (temperatura e evapotranspiração já bastante baixas) enquanto em 2010/2011 ocorreu em Outubro, quando a temperatura média era ainda de 14,9°C e a evapotranspiração era igualmente elevada (cerca de 25% da precipitação mensal). A maior interferência da temperatura e da evapotranspiração no período Outono-Inverno na recarga do hidrossistema de Degraças-Sicó no ano de 2010/2011 é suportada pelos valores dos coeficientes de correlação inverniais ($r_{inv} = -0,85$ e $-0,81$, respectivamente com a temperatura e com a evapotranspiração real) – Quadro II.III.IV. Esses valores mostram a maior relação da recarga no Outono-Inverno de 2010/2011 com a temperatura e a evapotranspiração (r_{inv} mais elevados), o que não sucedeu no ano anterior, onde os valores de r_{inv} próximos de 0 indicam praticamente uma dissociação entre o comportamento destes parâmetros.

Em síntese, o período de Novembro a Março em 2009/2010 face ao mesmo período no ano seguinte registou: (i) quantitativos pluviométricos bastante mais elevados, correspondentes a bem mais de metade do total anual e com mais dias com registo de precipitação e de precipitação elevada (> 20 mm); (ii) maior concentração da recarga anual total nestes meses (99,3% face aos 83,9% de 2010/2011); (iii) menor perda, por evapotranspiração, da

203

água precipitada (12,3% em relação aos 16,6%) também em resultado das temperaturas médias mais baixas, em particular de Dezembro a Fevereiro (8,2°C comparativamente aos 8,9°C de 2010/2011). A importância da recarga que ocorre neste período para o armazenamento em profundidade é nuclear e é evidente quando se observa que, ao longo destes cinco meses, apenas é drenado cerca de dois terços do caudal total anual (67,0% e 65,3% respectivamente em 2009/2010 e 2010/2011), valores que baixam ainda mais se considerarmos a relação Caudal_(Nov.-Março)/Recarga_(Nov.-Março) – 67,2% em 2009/2010 e 60,4% em 2010/2011 (Quadro II.III.VI).

Quadro II.III.VI – Os quantitativos de precipitação, evapotranspiração real, recarga e caudal de Novembro a Março e respectiva percentagem face ao total anual. Relação percentual entre as referidas variáveis para o mesmo período

	Precipitação (P)		Evapotranspiração real (ETR)		Recarga (R)		Caudal (Q)	
	Nov.-Março	Total anual	Nov.-Março	Total anual	Nov.-Março	Total anual	Nov.-Março	Total anual
	mm							
Degraças	722,4	1243,9	133,2	427,0	589,3	716,9	-	-
Sra.Estrela	779,3	1165,5	129,1	476,5	648,3	689,0	410,7	686,3
2009/2010	1008,3	1278,3	124,1	428,0	844,5	850,3	567,4	846,3
2010/2011	761,0	1230,4	126,1	473,6	634,9	756,8	383,3	586,8
2011/2012	286,8	688,7	126,1	509,7	126,1	179,1	131,0	277,4
2012/2013	1061,1	1464,6	123,7	469,3	937,3	995,3	561,1	1034,7
	$P_{Nov-Março}/P_{Total}$		$ETR_{Nov-Março}/ETR_{Total}$		$R_{Nov-Março}/R_{Total}$		$Q_{Nov-Março}/Q_{Total}$	
	%							
Degraças	58,1		31,2		82,2		-	
Sra.Estrela	66,9		27,1		94,1		59,8	
2009/2010	78,9		29,0		99,3		67,0	
2010/2011	61,8		26,6		83,9		65,3	
2011/2012	41,6		24,7		70,4		47,2	
2012/2013	72,4		26,4		94,2		54,2	
	$ETR_{Nov-Março}/P_{Nov-Março}$		$R_{Nov-Março}/P_{Nov-Março}$		$Q_{Nov-Março}/R_{Nov-Março}$			
	%							
Degraças	18,4		81,6		-		-	
Sra.Estrela	16,6		83,2		63,4		63,4	
2009/2010	12,3		83,8		67,2		67,2	
2010/2011	16,6		83,4		60,4		60,4	
2011/2012	44,0		44,0		103,9		103,9	
2012/2013	11,7		88,3		59,9		59,9	

A importância destes cinco meses na recarga e no armazenamento temporário em profundidade neste hidrossistema é particularmente notória em anos húmidos. Em 2012/2013, da água que constituiu a recarga nesses meses (937,3 mm – 88,3% da precipitação desse mesmo período) apenas 59,9% foi debitada pelas exsurgências (561,1 mm), o que significa que um volume muito considerável de água foi armazenado no hidrossistema, assegurando o caudal ainda abundante registado durante o final da Primavera e o Verão (apenas comparável ao de 2009/2010).

Pode, por isso, concluir-se que, em anos onde não se verificarem anomalias hidrometeorológicas (seca ou quantitativos mensais excepcionais de precipitação na Primavera), a recarga do hidrossistema cársico em estudo depende fundamentalmente da quantidade de precipitação que se regista nestes quatro/cinco meses;

(iii) as variáveis hidrometeorológicas que mais influenciam a recarga apresentam um peso diferente consoante a estação do ano e, para um determinado mês, o peso relativo de cada variável pode alterar-se de ano para ano. Esta constatação emana da análise factorial em componentes principais que efectuámos considerando os valores mensais da temperatura do ar, precipitação, evapotranspiração real e recarga. Definimos dois eixos (Factor I e Factor II) que, juntos, explicam 93,6% da variância. O Factor I é definido pela oposição da precipitação/recarga com a temperatura, explicando, em média, 69,3% da variância. O Factor II é definido pela evapotranspiração e explica apenas 24,3% da variância. Este valor tão baixo referente ao Factor II encontra-se em consonância com os resultados de Andreo *et al.* (2008) para o sudeste de Espanha, onde concluem que a evapotranspiração não é um factor-chave na recarga de hidrossistemas cársicos, ao contrário de variáveis como a precipitação, o declive, a litologia e as formas cársicas de superfície e profundidade (favorecimento da infiltração). No presente estudo, e enquanto não é possível abordar o tema da recarga de um modo ainda mais aprofundado (considerando mais variáveis), podemos constatar que a recarga é muito mais influenciada por variáveis climáticas (precipitação e temperatura, que demonstram, indirectamente, a importância da altitude) do que por outras variáveis, implícitas no cálculo da evapotranspiração real (tipo e humidade do solo, cobertura vegetal). Esta constatação é reforçada pelo facto de o ano de 2011/2012 (secura invernal), ser aquele em que o Factor I explica menor variância – apenas 55%, enquanto o Factor II explica 35% da variância (valor mais elevado de todos os anos).

Em termos mensais, no conjunto dos quatro anos em estudo, o posicionamento de cada mês em relação aos eixos factoriais permite identificar facilmente grupos de meses em que a explicação para o comportamento da recarga é similar. No entanto, como referido no início desta alínea, de ano para ano pode variar esse posicionamento, em particular o dos meses outonais e primaveris (Outubro, Novembro, Março, Abril e Maio) – Figura II.III.3. A posição dos diferentes meses permite compreender, em cada ano, quais as variáveis e respectivas inter-relações, que, em cada um desses meses, foram cruciais na recarga.

Este método de análise ajuda, por isso, na confirmação de características e aspectos variados do processo de recarga referidos até ao momento: (i) a individualização de um grupo de meses (Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro e, frequentemente, Março) onde a recarga é explicada quase na totalidade pela elevada precipitação e baixa temperatura (valores positivos elevados no Factor I). Esta regra apenas não se confirma no ano de

205

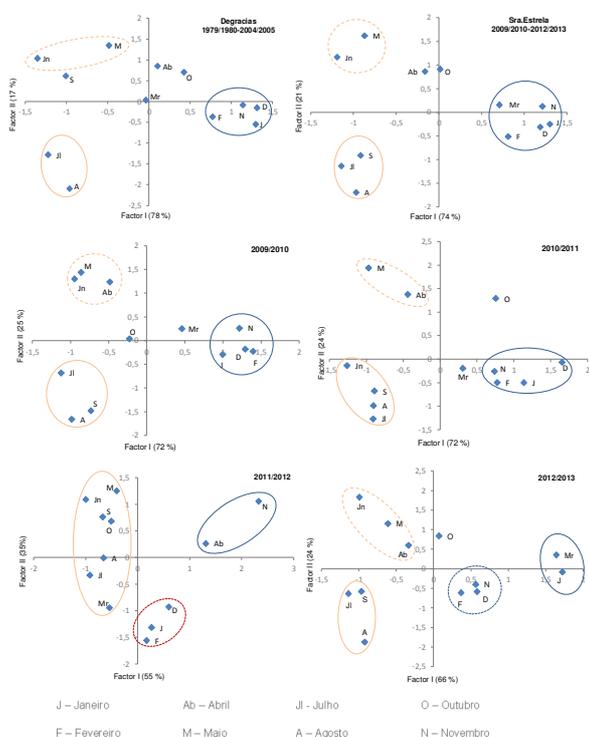


Figura II.III.3 – Planos de observação de cada mês em relação às componentes do balanço hidrológico (precipitação mensal total, temperatura média mensal do ar, evapotranspiração real mensal, recarga mensal) obtidos a partir da análise em componentes principais para cada ano hidrológico

2011/2012 pelas razões já anteriormente referidas; (ii) os meses de Julho, Agosto e Setembro constituem um grupo de meses mais secos, onde não existe qualquer tipo de

recarga e, por isso, apresentam, valores bastante negativos para ambos os Factores; (iii) variação da posição (nos eixos factoriais) dos meses de Outubro, Abril, Maio e Junho. De acordo com a Figura II.III.3, parece individualizar-se um pequeno grupo constituído pelos meses de Maio e Junho, onde a recarga é fortemente influenciada pela temperatura, mais alta, e pela menor precipitação (Factor I), mas também pela evapotranspiração real, bastante mais elevada (Factor II). Os gráficos vêm confirmar o que já havia sido sublinhado anteriormente, de que Maio passou a ser o primeiro mês em que já não ocorre recarga do hidrossistema em estudo.

A alteração da posição do mês de Abril principalmente no eixo factorial I mostra que a recarga neste mês tem um carácter bastante irregular, claramente explicada em função dos quantitativos de precipitação, já que a sua posição face ao eixo factorial II não varia muito. Deste modo, em 2011/2012, foram a elevada precipitação (pico secundário anual) e a baixa temperatura do mês de Abril que mais explicam a elevada e anormal recarga que ocorreu nesse mês. Em contrapartida, por exemplo, em 2009/2010, Abril foi o mês de recarga mínima, facto naturalmente explicado pela forte subida da evapotranspiração real (Factor II) e diminuição acentuada da precipitação (Factor I).

Outubro é outro dos meses que não se enquadra em nenhum dos grupos já apresentados, variando a sua posição ao longo de ambos os eixos factoriais, o que espelha a forte irregularidade interanual de todas as variáveis aqui consideradas que influenciam a recarga, o que se traduz, numa igualmente elevada irregularidade interanual da recarga neste mês (ver Quadro II.III.V). Os casos mais ilustrativos desta situação ocorreram em 2010/2011 e 2011/2012. No primeiro caso, a recarga em Outubro foi fortemente explicada pela elevada pluviosidade e considerável evapotranspiração (valores positivos altos em ambos os eixos factoriais) enquanto em 2011/2012 a escassa precipitação e a elevada evapotranspiração (resultante de valores de temperatura média anormalmente elevados) explicam a inexistência de recarga neste mês.

Em **síntese**, a aplicação do método do balanço hidrológico no cálculo da recarga no hidrossistema de Degraçias-Sicó demonstrou que:

(i) a evapotranspiração real deve ser considerada no estudo da recarga anual e mensal, uma vez que, mesmo tratando-se de uma área alta (favorecendo a ocorrência de precipitação e de temperaturas baixas) e aplanada (facilitar da infiltração), a vegetação arbórea que ocupa vastas áreas com depósitos na parte centro-leste da superfície de recarga é responsável por grande parte dos 40% de precipitação que se perde para a atmosfera. Na determinação da evapotranspiração real, o método de Thornthwaite revelou ser o que mais se aproxima da realidade da área em estudo, já que os métodos de Turc e de Coutagne sobrestimam essas perdas;

207

(ii) 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, como provam os 179,1 mm de recarga em 2011/2012 (ano muito seco) e os 995,3 mm em 2012/2013 (ano húmido);

(iii) em termos mensais, a recarga decalca fielmente o ritmo mensal da precipitação, com os valores mais elevados a ocorrerem no período de Novembro a Março, podendo atingir mais de 80% da precipitação mensal. Este decalque conjuga-se também com o comportamento da temperatura e, conseqüentemente, da evapotranspiração real;

(iv) o mês de Maio passou a ser, no quadriénio em estudo, o mês em que termina por completo a recarga e se inicia o período de *deficit* hídrico, independentemente do valor de precipitação acumulada até essa data, verificando-se, portanto, uma tendência para o encurtamento, em 1 mês, do período de recarga relativamente à série de referência (estação udométrica de Degraçias);

(v) os meses de Abril e Outubro constituem meses de transição, com valores de recarga fortemente variáveis, em que o aumento da precipitação (pico primaveril de precipitação e início do ano hidrológico, respectivamente) pode não ter uma repercussão proporcional nos valores da recarga, em razão dos valores altos de evapotranspiração.

4. O método de Kessler

Este método empírico foi desenvolvido como forma de aperfeiçoar o cálculo da recarga em hidrossistemas cársicos onde, devido à sua enorme especificidade e ao facto de a quantidade de água no solo assumir um papel secundário no processo de recarga, os tradicionais métodos hidrológicos não serem plenamente aplicáveis. O necessitar apenas de dados mensais de precipitação para estimar a recarga faz com que seja uma ferramenta muito útil em áreas de escassa informação, o que conduziu à sua vasta disseminação e aplicação, por exemplo, nas regiões cársicas circum-mediterrânicas.

O método foi desenvolvido e amplamente testado por Kessler (1957, 1967) para uma região cársica na Hungria de modo a avaliar a quantidade de água que 'alimenta naturalmente' os hidrossistemas cársicos. Este método foi aplicado na média montanha húngara (até 900 m de altitude) e baseia-se nos dados da precipitação, a partir dos quais se calculam os valores de recarga. Não obstante as características particulares da região (área montanhosa, com cobertura florestal e retenção nival) este método tem sido bastante utilizado e com resultados muito satisfatórios em regiões mediterrânicas (Quadro II.III.III), continuando ainda a ser utilizado (por exemplo Liñán Baena, 2005; Mendes, 2010).

A partir dos registos diários de precipitação (e de caudal, para validação dos valores da recarga) ao longo de 22 anos, o autor concluiu, inequivocamente, que a quantidade total de precipitação registada nos primeiros quatro meses do ano civil (de Janeiro a Abril) é determinante na quantidade de água que se infiltra e que assegurará o caudal das exurgências. Para além disso, verificou ainda que as condições de precipitação ocorrida nos últimos quatro meses do ano precedente também influenciam significativamente as condições de infiltração. Como o próprio autor enfatiza, na determinação da recarga natural de um hidrossistema cársico é de primordial importância conhecer não só a quantidade anual de precipitação mas, principalmente, a sua distribuição mensal, a qual define a percentagem de infiltração anual. Isto porque, numa mesma área e perante a mesma quantidade de precipitação anual, a percentagem de infiltração pode variar entre 7% e 70%, sendo este valor determinado exactamente pela distribuição da precipitação ao longo do ano.

A utilização deste método empírico na estimativa da recarga do hidrossistema de Degraças-Sicó justifica-se, à semelhança do referido no método anterior, pela inexistência ou muito difícil acesso a informação mais detalhada, necessária em cálculos mais complexos (por exemplo nível da superfície piezométrica, valores de evaporação, características dos solos e das formas cársicas de superfície e de profundidade). Acresce ainda o facto de, sendo um método já amplamente testado em regiões de características semelhantes ou próximas das da área em estudo, permitir aferir os resultados obtidos.

De salientar, contudo, uma nota metodológica relacionada com a forma como os resultados obtidos por este método serão apresentados. Ao longo do texto e nos quadros que ilustram e completam a análise textual, os resultados serão apresentados e enquadrados na perspectiva do *ano hidrológico* e não do *ano civil*, como normalmente acontece, o que se justifica pelo facto de os primeiros quatro meses do ano civil serem centrais para este método. A nossa opção em apresentá-los por ano hidrológico e não por ano civil é fundamentada por:

(i) apesar da análise se focar na importância, no processo de recarga, dos quantitativos de precipitação do primeiro quadrimestre de cada ano (Janeiro – Abril), será sempre evidenciada, em simultâneo, a influência dos quatro meses precedentes (Setembro a Dezembro do ano anterior), dadas as características climáticas (em particular as pluviométricas) das regiões a norte do mediterrâneo, onde nos inserimos. Significa isto que estamos a considerar, na mesma análise, um período que se estende de Setembro de um determinado ano a Abril do ano seguinte, muito mais próximo, por isso, do ano hidrológico (neste caso, contudo, iniciado em Setembro devido ao processo de cálculo deste método);

(ii) consideramos que o estudo da recarga baseada na distribuição sazonal da precipitação faz muito mais sentido sob a noção temporal de *ano hidrológico* do que de *ano civil* porque, este último, não engloba um ciclo completo de recarga (Setembro/Outubro –

209

– Abril/Maio) mas sim partes de dois ciclos, dado que o início do Verão significa o fim de um ciclo de recarga e a chegada do Outono marca o início de um novo ciclo, após o estio;

(iii) parece-nos mais coerente, estando a utilizar dois métodos de estimativa da recarga, considerar e apresentar os resultados sob a mesma unidade temporal – o *ano hidrológico* –, que, pelas razões já referidas, é mais adequado ao estudo da recarga na zona climática onde se insere o hidrossistema em estudo.

O processo de cálculo inicia-se com a determinação da razão (em percentagem) entre o total da precipitação registada nos primeiros quatro meses do ano civil e o total de precipitação anual. Essa razão foi designada pelo autor de *DPR – determinative precipitation rate (razão de precipitação determinante)*. No entanto, esta razão deve ser ajustada por um factor de correcção (*k*) que tenha em consideração os quatro últimos meses do ano precedente.

Assim, para determinar o factor de correcção começa-se por calcular a precipitação média ocorrida no último quadrimestre da série ($\bar{P}_{Set.-Dez.}$). Em seguida determina-se a precipitação caída nos quatro últimos meses do ano anterior ao que está a ser analisado ($P_{Set.-Dez.}$) e calcula-se *x* (*corrective precipitation rate*) segundo a razão:

$$x = \frac{P_{Set.-Dez.} - \bar{P}_{Set.-Dez.}}{\bar{P}_{Set.-Dez.}} * 100$$

sendo:

$P_{Set.-Dez.}$ a precipitação dos quatro últimos meses anteriores ao ano em estudo;

$\bar{P}_{Set.-Dez.}$ a precipitação média dos quatro últimos meses do ano no total da série.

A partir do valor *x*, obtido pela fórmula anterior, encontra-se o factor de correcção *k* através do Quadro II.III.VII

Quadro II.III.VII – Factores de correcção *k* para os valores de *x*

<i>x</i> (%)	<i>k</i>	<i>x</i> (%)	<i>k</i>
0 – 5	0	46 – 55	5
6 – 15	1	56 – 60	7
16 – 25	2	61 – 65	10
26 – 35	3	66 – 70	13
36 – 45	4	> 70	15

O factor *k* deve adoptar o sinal de $P_{Set.-Dez.} - \bar{P}_{Set.-Dez.}$ e, em seguida, deverá ser adicionado ao valor de *DPR (determinative precipitation rate)*. Após esta correcção, o valor da

recarga (em percentagem) determina-se através de regressão polinomial, considerando a relação entre uma variável resposta, y (percentagem de infiltração), e uma única variável preditora, x (razão de precipitação determinante).

No presente estudo houve necessidade de proceder a um pequeno ajustamento pelo facto de o método original apenas contemplar *DPR* (*determinative precipitation rate*) até 60% (Figura II.III.4A), enquanto neste trabalho existiam alguns valores superiores (até 72%)¹³. Recorrendo a métodos numéricos de ajuste de polinómios, foi possível obter a função analítica da relação entre a taxa de infiltração (recarga) e a *DPR* (*determinative precipitation rate*) para valores superiores a 60%, como representado na Figura II.III.4B.

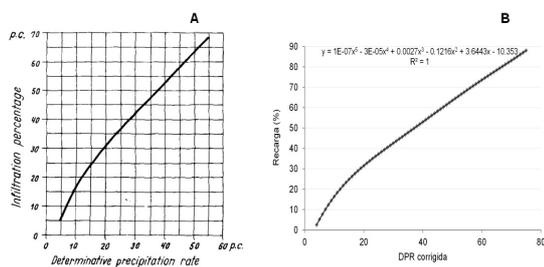


Figura II.III.4 – Relação entre a recarga anual (em percentagem) e a *DPR* (*determinative precipitation rate*) segundo Kessler (A) e após o ajustamento introduzido (B)

Os quantitativos da recarga foram determinados, assim, através da seguinte expressão polinomial:

$$\text{Recarga (Y)} = 1E-07x^5 - 3E-05x^4 + 0,0027x^3 - 0,1216x^2 + 3,6443x - 10,353$$

Não obstante a simplicidade do método, os resultados são semelhantes aos obtidos através do balanço hidrológico, tanto para a série de referência quanto para o período em estudo – Quadro II.III.VIII.

¹³ Uma das explicações para estes valores tão elevados radica nos quantitativos de precipitação registados na área em estudo serem bastante mais elevados do que os considerados por Kessler e em estudos no Algarve (Almeida, 1985; Mendes, 2010). Na série temporal em questão (1979/1980 – 2006/2007) registaram-se valores de precipitação mensal entre 300 e 500 mm em alguns dos primeiros quatro meses do ano (em especial no mês de Janeiro).

Quadro II.III.VIII – Recarga anual (em milímetros e em percentagem) calculada através do método de Kessler para a estação de Degraças (1979/1980 – 2006/2007) e para a Sra. da Estrela (2009/2010 – 2012/2013). Comparação com a recarga calculada pelo método do balanço hidrológico

	Precipitação anual	DPR* (Inicial)	DPR* (Corrigido)	Recarga		
				Kessler		Balanço hidrológico
	mm	%	%	%	mm	mm
Degraças						
1979/80	1054	38	38	51	533	
1980/81	765	29	25	38	287	
1981/82	1097	37	33	50	551	
1982/83	1181	32	32	45	526	
1983/84	1288	36	36	48	619	
1984/85	1672	56	55	72	1202	
1985/86	1326	60	58	71	947	
1986/87	1176	41	39	50	593	
1987/88	1770	41	38	65	1145	
1988/89	898	37	47	44	399	
1989/90	1243	33	28	51	635	
1990/91	1239	54	57	70	862	
1991/92	855	29	31	38	326	
1992/93	1131	23	20	33	376	
1993/94	1450	42	40	60	875	
1994/95	1005	43	48	53	532	
1995/96	1747	48	45	63	1104	
1996/97	1207	18	20	31	378	
1997/98	1889	49	50	77	1457	
1998/99	993	31	46	42	414	
1999/00	1123	27	23	41	466	
2000/01	2046	67	69	87	1788	
2001/02	943	26	31	32	305	
2002/03	1686	56	51	80	1343	
2003/04	1161	48	58	60	701	
2004/05	396	29	28	23	92	
2005/06	938	31	28	41	384	
Média	1232,5	39,3	39,8	52,5	647,1	56,8 697,6
Sra. da Estrela						
2009/10	1278	47	49	63	803	67 850
2010/11	1230	41	42	55	681	62 757
2011/12	689	23	20	32	220	26 179
2012/13	1465	56	56	70	1026	68 995
Média	1165,5	42,1	42,1	55,1	642,2	59,1 689,0

DPR* - *determinative precipitation rate*. DPR (corrigido) corresponde ao valor após a introdução do factor k (correção de DPR)

O valor médio de recarga, calculado para a série de referência (Degraças, 1979/1980 – 2006/2007), foi de 647,1 mm, ou seja, 52,5% da precipitação anual média, valor ligeiramente inferior ao encontrado pelo método do balanço hidrológico (697 mm – Quadro II.III.II). No período em estudo, os quantitativos médios de recarga obtidos por este método

foram também um pouco inferiores aos da série de referência (642,2 mm, ou seja, 55,1% do total de precipitação anual) e foram também um pouco inferiores aos calculados pelo balanço hidrológico (59,1%; 689 mm), o que se justifica pelo reduzido número de anos, havendo, portanto, consonância entre os valores obtidos por ambos os métodos.

Em termos anuais, no período em estudo, a recarga determinada pelo método de Kessler oscilou entre os 70% em 2012/2013 e os 32% em 2011/2012, este último reflectindo a escassa precipitação ocorrida nos primeiros três meses do ano (secura invernal), o que se deduz também pelo baixo valor de *DPR* (*determinative precipitation rate*). Em contrapartida, os valores bastante acima da média em 2009/2010 e 2012/2013 justificaram-se pela elevada quantidade de precipitação acumulada de Janeiro a Abril (47% e 56% do total anual, respectivamente) que se somam aos elevados quantitativos no período precedente (mais de 500 mm de Setembro a Dezembro em ambos os casos).

As percentagens de infiltração determinadas tanto na série de referência quanto nos quatro anos em análise são bastante próximas (52,5% e 55,1%, respectivamente) mas um pouco inferiores às anteriormente calculadas para a área de estudo com o mesmo método, que rondam os 60% (Carreira, 1986). Os valores agora calculados encontram-se no intervalo referido pelo autor para a Hungria – 7% a 70% (Kessler, 1957), sendo semelhantes aos determinados para regiões cársicas do Mediterrâneo (Quadro II.III.III).

A análise temporal pormenorizada dos resultados obtidos para a área em estudo (com base na estação de Degracias – 28 anos de registos) confirma os pressupostos de Kessler (1957) relativamente à importância dos diferentes períodos sazonais, em particular do período Janeiro-Abril, nos quantitativos de recarga. Para se conseguir compreender e justificar os valores, por vezes inesperados, da recarga, mais do que conhecer o total de precipitação ocorrida num ano, é necessário conhecer, tal como salientou o autor, o ritmo sazonal da precipitação. Por exemplo, como explicar que totais pluviométricos anuais semelhantes resultem em taxas (e valores absolutos de recarga) muito desiguais?

A partir do Quadro II.III.IX podemos analisar situações aparentemente de difícil explicação, como as ocorridas nos anos de 1985/1986 e 1996/1997, em que tendo-se registado valores aproximados de precipitação (1326 mm e 1207 mm, respectivamente), os quantitativos de recarga foram completamente díspares: em 1985/1986, a percentagem de infiltração foi de 71%, correspondente a 812 mm, e em 1996/1997 foi de apenas 31%, num total de 519 mm. A justificação para esta discrepância está nos meses em que se concentrou a maior parte da precipitação. No primeiro caso, 51% da precipitação ocorreu de Janeiro a Abril a seguir a um quadrimestre seco enquanto, em 1996/1997, os meses de Setembro a Dezembro foram muito húmidos mas os primeiros quatro meses de 1997 foram de grande secura (24% da precipitação anual), o que provocou a descida drástica dos valores da recarga.

Quadro II.III.IX – Precipitação acumulada nos períodos de Setembro-Dezembro e de Janeiro-Abril e respectiva percentagem face à precipitação anual (por ano hidrológico) e valores de recarga anual (em mm e %) segundo o método de Kessler para a estação de Degracias (1979/1980-2006/2007) e para a Sra. da Estrela (2009/2010-2012/2013)¹⁴

Degracias	Precipitação total			Setembro - Janeiro - Abril		Setembro - Janeiro - Abril		Recarga	
	mm	mm	mm	%	%	%	mm		
2000/01	2045,8	850	988	43	48	87	1788		
2002/03	1686,0	938	777	56	46	80	1343		
1997/98	1888,6	1047	548	55	29	77	1457		
1984/85	1672,2	669	937	40	50	72	1202		
1985/86	1326,3	472	890	36	51	71	947		
1990/91	1238,9	664	538	54	43	70	862		
1987/88	1770,1	941	498	53	28	65	1145		
1995/96	1747,2	665	894	38	46	63	1104		
1993/94	1449,5	857	465	59	32	60	875		
2003/04	1160,6	510	385	44	33	60	701		
1994/95	1005,4	393	543	39	54	53	532		
1989/90	1243,0	738	366	59	29	51	635		
1979/80	1053,9	583	309	55	29	51	533		
1986/87	1176,3	398	691	34	59	50	593		
1981/82	1097,1	568	397	52	36	50	551		
1983/84	1287,9	505	525	39	41	48	619		
1982/83	1181,2	547	390	46	33	45	526		
1988/89	898,0	281	502	29	56	44	399		
1998/99	993,1	358	392	36	39	42	414		
1999/00	1122,9	637	393	62	35	41	466		
2005/06	938,3	425	347	45	37	40	375		
1991/92	854,7	387	264	45	31	38	326		
1980/81	764,6	314	294	41	37	38	287		
1992/93	1130,8	441	338	39	30	33	376		
2001/02	942,8	290	379	30	40	32	305		
1996/97	1207,1	648	296	54	24	31	378		
2004/05	396,4	164	193	41	49	23	92		
Média	1232,5	569	486	45	40	52,5	647,1		
Sra. da Estrela									
2012/13	1465	530	526,3	36	56	70	1026		
2009/10	1278	581	606	45	47	63	803		
2010/11	1230	584	508	47	41	55	609		
2011/12	689	341	161	50	23	32	267		
Média	1165,5	509	525	45	42	55,1	642,2		

Muito seco (<1º quartil)

Moderadamente seco (1º - 2º quartis)

Moderadamente húmido (2º - 3º quartis)

Muito húmido (> 3º quartil)

A escassa precipitação no período Janeiro-Abril reflecte-se, pois, fortemente na diminuição da recarga, o que se verificou também nos anos de 1981/1982, 1989/1990 e 1999/2000 (menos de 390 mm, cerca de 35% do total anual), e, mesmo tendo-se seguido a períodos

¹⁴ Por uma questão de legibilidade (tornar mais simples a leitura e relação entre os períodos considerados) optamos por simplificar a classificação pluviométrica, passando de uma divisão da série em decis para uma divisão em quartis.

húmidos (mais de 500 mm entre Setembro e Dezembro), reflectiu-se substancialmente na recarga, fazendo as percentagens baixar para valores próximos dos 50% e até mesmo inferiores. Decorre, portanto, destes casos que, se os meses de Janeiro a Abril registarem escassa precipitação, os valores percentuais e absolutos da recarga vão, no contexto do ano hidrológico, ser baixos. Situação que ocorre mesmo que o período que os precede (neste caso Setembro-Outubro) se caracterize por valores de precipitação acima da média (meses húmidos).

A importância do período Janeiro-Abril é, igualmente, constatada em anos com uma distribuição da precipitação oposta à dos anos supra referidos, ou seja, se este período for húmido, com valores de precipitação acumulada superiores a 50% do total anual, a recarga será, igualmente, elevada. Realidade que se observa mesmo que o período que o antecede (Setembro-Dezembro) tenha sido muito seco. Exemplo desta situação, nos anos de 1985/1986 e 1994/1995, os meses de Janeiro a Abril totalizaram 51% e 54% da precipitação anual, respectivamente, e, apesar do quadrimestre anterior ter sido tendencialmente seco (menos de 39% da precipitação anual), verificaram-se percentagens de infiltração elevadas (71% em 1985/1986 e 53% em 1994/1995). De notar que a importante influência do período Janeiro-Abril no comportamento da recarga é independente das características hidrometeorológicas de cada ano (anos secos ou húmidos).

Os casos que vimos salientando comprovam, pois, a importância nuclear do período Janeiro-Abril nas taxas de recarga anuais, tal como sublinhou Kessler (1957), confirmando, que a influência da distribuição da precipitação ao longo do ano nos valores de recarga é muito superior à do total anual da precipitação, à semelhança do referido por outros autores em estudos de regiões cársicas mediterrânicas (Bonacci, 2001; Fiorillo, 2011).

Apesar de reconhecermos a primordial relevância dos quatro primeiros meses do ano civil nos quantitativos de recarga anual, não se pode negligenciar a importância dos meses que lhe antecederam. A correção introduzida por Kessler através do factor k opera no sentido de, se o período Setembro-Dezembro for chuvoso, a recarga que decorrerá principalmente no período Janeiro-Abril será potencializada, aumentando a percentagem anual de infiltração. Pelo contrário, se os meses de Setembro a Dezembro forem tendencialmente secos a muito secos, a recarga que se regista nos meses de Inverno e início de Primavera tenderá a ser menor do que a recarga proporcional aos quantitativos pluviométricos destes meses. Isto porque uma parte da precipitação acabará por não se infiltrar em profundidade, ficando à superfície (ou nos primeiros metros de solo/epicarso) para satisfazer, entre outros, a reposição da humidade dos solos, as necessidades hídricas da vegetação, o enchimento de depressões naturais e antrópicas (o que já deveria ter sido ocorrido com a precipitação dos meses do final do Outono).

215

O considerar da influência do período Setembro-Dezembro nos quantitativos de recarga anual adquire especial importância na área em estudo, já que é a altura do ano que, em média, regista mais precipitação e onde se inserem os dois meses mais chuvosos do ano na série de referência (Novembro e Dezembro). De um modo resumido, e a partir da observação do Quadro II.III.IX, é possível delinear alguns cenários sobre a influência das condições hidrometeorológicas do período Setembro-Dezembro na recarga anual e retirar daí algumas características gerais sobre a recarga na área em estudo. Assim:

(i) os valores máximos e mínimos de recarga verificaram-se em anos em que as características pluviométricas de Janeiro-Abril foram reforçadas por características idênticas nos meses precedentes (de Setembro a Dezembro). Assim, valores de recarga acima de 75% registaram-se em anos em que o quadrimestre Janeiro-Abril foi bastante chuvoso e se seguiu a meses outonais igualmente muito húmidos. Convém ainda salientar que esses valores máximos de recarga correspondem a anos em que o total de precipitação Setembro-Dezembro equivale a mais de 50% da precipitação desse ano hidrológico. Em contrapartida, os valores mínimos de recarga (entre 30 e 40%) foram o resultado de um período Janeiro-Abril seco ou muito seco que se seguiu a um período igualmente muito seco;

(ii) os valores de infiltração anual bastante elevados (superiores a 60%) correspondem, na sua grande maioria, a anos em que o período de Janeiro a Abril foi húmido ou muito húmido, ou seja, em que a precipitação acumulada se aproximou ou superou mesmo os 50% da precipitação anual. Do mesmo modo, os anos com percentagens altas de infiltração (entre os 50% e os 60%) caracterizaram-se por elevada pluviosidade nos primeiros quatro meses (precipitação superior a 40% do total anual). No entanto, se a um período Janeiro-Abril húmido ou muito húmido preceder um quadrimestre seco, os valores da recarga já não são tão elevados;

(iii) os valores de recarga baixos (entre os 40% e os 50%) ocorreram em anos em que o período de Janeiro a Abril foi seco ou mesmo muito seco (menos de 40% do total pluviométrico anual). No entanto, se o período precedente (Setembro a Dezembro) tiver sido tendencialmente húmido, os valores de recarga não são tão baixos quanto se esperaria em face da secura ocorrida no principal período de recarga do ano.

Os anos em investigação (2009/2010 – 2012/2013) reproduzem fielmente o comportamento da recarga e a sua relação com a distribuição da precipitação ao longo do ano, que temos vindo a analisar relativa à série de referência.

Em 2009/2010 e 2010/2011, os quantitativos de precipitação foram semelhantes, mas os valores da recarga foram mais elevados no primeiro ano (63% e 55%, respectivamente), num total de 803 mm e 609 mm. Esta diferença, de aproximadamente 200 mm, justifica-se, à semelhança do que constatámos no método do balanço hidrológico, por uma desigual distribuição sazonal da precipitação. Como nos mostra o Quadro II.III.IX, a diferença reside

no período de Janeiro a Abril, que foi mais chuvoso em 2009/2010, já que os meses que lhes antecederam em ambos os anos são idênticos (tendencialmente húmidos). Neste caso, o total de precipitação acumulada de Janeiro a Abril foi de 41% e 35%, respectivamente em 2009/2010 e 2010/2011.

Os anos seguintes, 2011/2012 e 2012/2013 foram, em termos hidrometeorológicos, absolutamente contrastados, com o primeiro a apresentar o valor mínimo de recarga (31%; 267 mm) e o segundo o valor máximo dos quatro anos em estudo (70%; 1026 mm). E, uma vez mais, a principal diferença centra-se nos quantitativos de precipitação entre Janeiro e Abril, que no ano de 2011/2012 foram anormalmente baixos (apenas 11% da precipitação anual, numa situação de seca meteorológica). Em contrapartida, no ano de 2012/2013 esses valores foram anormalmente altos (826 mm), tendo sido reforçados ainda por um valor acumulado de precipitação de Setembro a Dezembro de 503 mm.

II. Distribuição espacial da recarga

1. Os modelos de cálculo e representação espacial da recarga em hidrossistemas cársicos – breve enquadramento teórico

A recarga de um hidrossistema é um processo altamente variável no tempo e no espaço, sendo que, em muitos hidrossistemas, em especial nas áreas mediterrânicas, a recarga ocorre em áreas montanhosas onde a precipitação e a evapotranspiração podem variar consideravelmente no tempo e no espaço, dificultando de sobremaneira o processo de cálculo e a cartografia das principais áreas de recarga.

Vários métodos têm sido desenvolvidos para o cálculo da recarga, embora com aplicação quase sempre a hidrossistemas em rochas detríticas (inventariados e revistos em Goldscheider, 2002). As características específicas dos sistemas cársicos bem como o seu funcionamento hidrológico complexo e de grande heterogeneidade justificam a necessidade de desenvolvimento e aplicação de métodos especificamente direccionados para o estudo da sua recarga. No entanto, esses estudos maioritariamente baseados em simulações matemáticas (por exemplo Andreu *et al.*, 2011; Hartmann *et al.*, 2012) são bastante complexos, requerendo um conjunto vasto de informação, normalmente muito difícil de obter. Consequentemente, a representação cartográfica dos resultados está praticamente ausente dos estudos do cálculo da recarga, não sendo, assim, possível visualizar a sua repartição geográfica, aspecto central na análise do funcionamento hidrodinâmico de um sistema hidrológico cársico.

217

A determinação da recarga e da sua variação espacial em hidrossistemas cársicos tem sido desenvolvida na perspectiva da determinação e representação espacial da vulnerabilidade à poluição deste tipo de hidrossistemas e, consequentemente, da criação de perímetros de protecção. Deste modo, são métodos muito mais complexos do que um modelo simples de recarga, considerando parâmetros como a rede de drenagem subterrânea, as características das zonas não-saturadas e saturada, entre outros. De um modo resumido, e no intuito de enquadrar o modelo que serviu de base ao presente estudo, apresentamos os principais métodos que têm sido utilizados para, ainda que de forma indirecta, determinar e representar espacialmente a recarga de um hidrossistema cársico. Assim:

(i) um dos primeiros métodos especialmente dedicado à vulnerabilidade em regiões cársicas foi o EPIK, desenvolvido e apresentado por Doerfliger e Zwahlen (1995), designação que corresponde ao acrónimo dos quatro factores considerados – epicarso; cobertura de protecção; condições de infiltração e desenvolvimento da rede cársica. É o método utilizado no zonamento de perímetros de protecção de exurgências na Suíça mas pode ser aplicado noutras regiões cársicas, mesmo aquelas onde existem complexos sistemas hidrogeológicos. É também o método utilizado oficialmente em Portugal, desde 2012, para definição das "Áreas estratégicas de protecção e recarga de aquíferos" no domínio da Reserva Ecológica Nacional¹⁵. Trata-se de um método multicritério, baseado na atribuição de diferentes pesos a cada parâmetro, reflectindo a importância de cada um deles na definição da vulnerabilidade desses hidrossistemas;

(ii) o método COP (Vias *et al.*, 2006) foi desenvolvido pelo grupo de trabalho do European COST Action 620¹⁶, tendo em consideração características específicas dos hidrossistemas cársicos. O método considera as características das camadas suprajectas à toalha freática (*factor O*), os parâmetros que controlam os fluxos concentrados (*factor C*) e a precipitação (*factor P*). O *factor O* reflecte a capacidade de protecção das camadas situadas acima da toalha freática, designadamente dos solos (textura e espessura), da litologia da zona não-saturada (grau de fracturação e espessura de cada camada). A geomorfologia cársica, o declive e a vegetação são tidos em consideração no *factor C*, que faz a separação entre áreas onde a infiltração é concentrada (via sumidouros) e a restante área. O *factor P* considera a variabilidade espacial e temporal da precipitação. Recentemente,

¹⁵ Resolução do Conselho de Ministros nº 81/2012 de 03 de Outubro de 2012 (Diário da República, 1.ª série — N.º 192, p.5519 e seguintes), alterada pela Declaração de Rectificação do Conselho de Ministros nº 71/2012, Diário da República, 1.ª série — N.º 232 — 30 de Novembro de 2012, p. 6852-6853.

¹⁶ Projecto da Comunidade Europeia, envolvendo 15 países, intitulado "Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers", cujo principal objectivo era o desenvolvimento de uma perspectiva europeia integrada e consistente para a protecção das águas subterrâneas no carso. Assim, mediante fundamentação científica, foi criado um conjunto de ferramentas de apoio à gestão destas áreas e dos seus recursos hídricos, de onde se destacam os mapas de vulnerabilidade. Consultável em: http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/F+E/Cost620/cost620_fb_02_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

Andreo *et al.* (2009) desenvolveram mais este método, adicionando-lhe mais um factor – o factor *K*, passando, assim, a designar-se COP+K. Este novo factor considera o tempo de atravessamento do hidrossistema bem como a rede de condutas subterrâneas em funcionamento. Em Portugal, o método COP foi utilizado nas colinas dolomíticas a sul de Coimbra (Dimuccio e Cunha, 2008);

(iii) o método PI (Goldscheider *et al.*, 2000; Goldscheider, 2002) apoia-se na elaboração de mapas em ambiente SIG e o seu modelo conceptual é baseado na perspectiva 'origem-caminho-destino' (*origin-pathway-target*). A superfície é considerada a *origem*, a toalha freática o *destino* e o *caminho* são todas as camadas entre a origem e o destino. A partir daqui calculam-se dois factores – cobertura de protecção (*factor P*) e as condições de infiltração/circulação (*factor I*) – que permitem o cálculo da recarga e cujo produto determina a vulnerabilidade do hidrossistema;

(iv) o método PaPRIKa (Doerfliger *et al.*, 2009) tem em consideração tanto a estrutura como o funcionamento do hidrossistema cársico. Baseado em métodos já existentes, como o EPIK e o RISK (Marín *et al.*, 2009), este novo método de cálculo e mapeamento da vulnerabilidade tem em consideração quatro critérios: Protecção (*P* – textura, estrutura e espessura do solo; espessura e grau de fracturação da zona não-saturada; existência ou não de aquífero epicársico), Tipo de rocha (*R* – litologia e grau de fracturação da zona saturada), Infiltração (*I* – distinção entre infiltração concentrada e difusa) e desenvolvimento da carsificação (*Ka* – calcula a capacidade de drenagem e a organização da rede de condutas cársicas).

1.1. O modelo APLIS

O modelo APLIS (Andreo *et al.*, 2004) foi elaborado pelo *Instituto Geológico y Minero de España* e é o acrónimo formado pelas iniciais das palavras que representam as características intrínsecas dos hidrossistemas cársicos utilizadas pelo método. Em espanhol: *Altitud (A); Pendiente (P), Litología (L), Áreas preferenciales de infiltración (I)* e tipo de *Suelo (S)*, ou seja, Altitude, Declive, Litologia, Áreas de Infiltração preferencial e tipo de Solo. Este método possibilita, em simultâneo, o cálculo da taxa de recarga anual média (expressa em percentagem da precipitação anual) e a sua distribuição espacial de acordo com as características específicas dos hidrossistemas cársicos.

Trata-se de um método empírico desenvolvido em oito aquíferos carbonatados na Cordilheira Bética (sul de Espanha), representando uma ampla variedade de características climáticas e geomorfológicas, tendo-se obtido muito bons resultados e considerando-se, por isso, um método adequado a hidrossistemas cársicos noutros locais. A sua aplicação a

219

outros aquíferos carbonatados em Espanha e a nível internacional foi bem sucedida, o que corroborou a validade deste método. De acordo com o estudo elaborado por Andreo *et al.* (2008) em vários hidrossistemas cársicos no sudeste de Espanha utilizando vários métodos, o APLIS foi o que mais se aproximou dos valores de referência para a recarga (calculados previamente), não excedendo 5% de diferença.

Para além de calcular os valores de recarga para um hidrossistema cársico, este modelo permite obter mapas da distribuição espacial da mesma, de acordo com as características desse hidrossistema, processo desenvolvido por Andreo *et al.* (2004). O processo de cálculo e cartografia é efectuado a partir da sobreposição e cruzamento de 'camadas de informação' correspondentes a cada uma das variáveis que influenciam a recarga (altitude, declive, áreas de infiltração preferencial e tipo de solo) mediante Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Para cada uma dessas variáveis é criado um mapa, definindo-se uma série de categorias ou intervalos a que se atribui pontuação compreendida entre 1 (mínima influência na recarga) e 10 (influência máxima), tal como se pode ver no Quadro II.III.X.

Quadro II.III.X – Pontuação atribuída às várias classes em cada uma das variáveis utilizadas no modelo APLIS (*Altitude; Declive; Litología; Áreas de infiltración preferencial; Tipo de Solo*) e classes de recarga

Altitud (m)	P	Pendiente (%)	P	Litología	P
≤ 300	1	≤ 3	10	Calizas y dolomías karstificadas	10, 9
(300-600)	2	(3-8]	9	Calizas y dolomías fracturadas, algo karstificadas	8, 7
(600-900)	3	(8-16]	8	Calizas y dolomías fisuradas	6, 5
(900-1200)	4	(16-21]	7	Arenas y gravas, coluviones	4
(1200-1500)	5	(21-31]	5	Brechas y conglomerados	3
(1500-1800)	6	(31-46]	4	Rocas plutónicas y metamórficas	2
(1800-2100)	7	(46-76]	3	Esquistos, pizarras, limos, arcillas	1
(2100-2400)	8	(76-100]	2		
(2400-2700)	9	> 100	1		
> 2700	10				
Puntuación del parámetro Altitud		Puntuación del parámetro Pendiente		Puntuación del parámetro Litología	
Infiltración-absorción preferencial		P		Puntuación del parámetro Suelo	
Abundantes formas de infiltración preferencial		10		Leptosoles	
Escasas formas de infiltración preferencial		1		Arenosoles álbicos y Xerosoles cálcicos	
Puntuación de las formas de Infiltración preferencial				Regosoles calcáreos y Fluvisoles	
Clase de recarga		Muy Baja		Regosoles éútricos, dístricos y Solonchaks	
Intervalos de Recarga (% P)		≤ 20		Cambisoles cálcicos	
		20-40		Cambisoles éútricos	
		40-60		Histosoles éútricos y Luvisoles éútricos y cálcicos	
		60-80		Luvisoles crómicos	
		> 80		Planosoles	
				Vertisoles crómicos	
				Puntuación del parámetro Suelo	

Intervalos y clases de recarga según el método APLIS

Fonte: Andreo *et al.* (2007)

A combinação dessas 'camadas de informação', mediante a aplicação de vários procedimentos em ArcGIS, permitiu obter uma fórmula de cálculo para determinar o valor médio de recarga e o mapa de distribuição espacial dessa mesma recarga:

$$R = (A + P + 3 \cdot L + 2 \cdot I + S) / 0,9$$

sendo: A – *Altitude*; P – *Declive*; L – *Litologia*; I – *Áreas de infiltração preferencial*; S – *Tipo de solo*. O peso atribuído a cada variável procura expressar a sua respectiva importância no processo de recarga. A divisão por 0,9 permite obter uma taxa de recarga que representa o valor percentual da recarga relativamente à precipitação registada. Segundo Andreo *et al.* (2008), esta fórmula é o resultado de múltiplos ensaios com expressões matemáticas (considerando as variáveis que mais influenciam a recarga), no intuito de obter taxas de recarga o mais próximas possível das previamente calculadas por outros métodos. Os resultados obtidos para a recarga e para a sua distribuição espacial foram agrupados em cinco classes de recarga: *Muito elevada*; *Elevada*; *Moderada*; *Baixa* e *Muito Baixa*.

Esta perspectiva de análise é, por isso, muito semelhante a outras utilizadas no estudo da vulnerabilidade dos hidrossistemas carbonatados e definição dos respectivos perímetros de protecção, tais como o EPIK (Doerfliger *et al.*, 1999), o PI (Goldscheider, 2002) ou o COP (Vias *et al.*, 2006).

2. Adaptação do método APLIS à área em estudo

2.1. As variáveis utilizadas e respectiva classificação ordinal em ambiente SIG

O objectivo neste ponto do trabalho passa, principalmente, pela elaboração de um mapa de distribuição espacial da recarga a partir da conjugação das características da superfície de recarga do hidrossistema cársico de Degraçias-Sicó. Esse mapa servirá de base para a análise do comportamento hidrológico das exurgências do bordo oeste, que se efectuará a partir do estudo do hidrograma e da variação da condutividade eléctrica e da temperatura da água drenada pelo seu principal exutório – os Olhos d'Água do Anços (Parte II, Capítulo IV).

O exercício cartográfico que aqui apresentamos não resulta de uma transposição e aplicação fiéis do método APLIS, mas sim de uma adaptação desse modelo, de acordo com as características físicas da área em estudo e da informação cartográfica existente/disponível. Trata-se, pois, de um modelo gerado num Sistema de Informação Geográfica (ArcGIS) através da elaboração de 'camadas de informação' relativas a cada uma das variáveis em questão e à sua sobreposição para a determinação da distribuição espacial da recarga

221

através da soma ponderada das diferentes variáveis, segundo a sua importância na recarga do hidrossistema em estudo.

A escolha do modelo APLIS (como base metodológica para a criação de um modelo adaptado à área em estudo) em detrimento de outros, em particular do EPIK (modelo adoptado na legislação portuguesa), prende-se com o facto de possuímos praticamente toda a informação necessária para elaborar um modelo aproximado, ajustado às características da área em estudo. Em contrapartida, para a implementação ou adaptação do modelo EPIK, não possuíamos informação em relação a dois dos seus parâmetros – *P* (cobertura de protecção) e *K* (grau de desenvolvimento da rede cársica). Para além disso, o modelo APLIS (ou um modelo semelhante) é de simples implementação e necessita apenas de variáveis disponíveis em bases de dados das Administrações Públicas (Central e Local), em alguns casos de acesso *online* gratuito.

O modelo de distribuição espacial da recarga que aqui desenvolvemos apresenta, à semelhança do APLIS, um carácter marcadamente empírico, uma vez que os pesos atribuídos às diferentes variáveis na soma ponderada resultam do conhecimento que possuímos da área em estudo. O facto de o hidrossistema em estudo apresentar, em relação às áreas do modelo original, muito menor variação na maior parte das variáveis utilizadas (em particular na altitude, no declive e na litologia) fez com que considerássemos apenas cinco categorias em detrimento das dez apresentadas no método original¹⁷. Outra adaptação introduzida refere-se ao *Tipo de Solo* que, devido à inexistência de informação cartográfica, foi substituída pela carta de uso e ocupação do solo (COS2007), como explicaremos mais adiante.

Assim, no que se refere aos parâmetros utilizados, três são de natureza qualitativa (litologia; áreas preferenciais de infiltração; usos do solo) e dois de natureza quantitativa (altitude e declive). Como o cálculo da recarga é de carácter quantitativo (embora surja no mapa final de forma qualitativa), transformámos as variáveis qualitativas em variáveis quantitativas mediante o estabelecimento de classes a que atribuímos valores ordinais (*ratings* de 1 a 5) para o seu posterior tratamento – Quadro II.III.II.XI. Nesta ordenação, o valor 1 indica uma influência mínima desses valores da variável no processo de recarga enquanto 5 significa uma influência máxima. Em ambiente SIG elaborámos uma 'camada de informação' para cada variável a partir desta ordenação, constituindo essas 'camadas' a base estrutural para a determinação da repartição espacial da recarga (ver Figura II.III.5 no final do capítulo). Assim:

¹⁷ O facto de se tratar, no modelo original, de oito hidrossistemas cársicos com propriedades físicas diferenciadas faz com que exista uma grande diversidade de características a considerar, pelo que as diferenças, no conjunto do modelo, são bastante acentuadas. É o caso da *Altitude*, em que a diferença altimétrica é superior a 2400 m (desde altitudes inferiores a 300 m a altitudes superiores a 2700 m), da *Litologia* agrupada em 14 classes (reduzidas posteriormente a 10 classes) e o *Declive*, com classes que se estendem de valores inferiores a 3% a valores superiores a 100%.

Quadro II.III.XI – Pontuação atribuída a cada uma das variáveis utilizadas na determinação da distribuição da recarga no hidrossistema cársico de Degraças-Sicó (Altitude; Declive; Litologia; Áreas de infiltração preferencial; Usos do solo)

Altitude (m)			Uso do solo (COS2007)		
Classes	% da área de recarga	Pontuação	Classes	% da área de recarga	Pontuação
> 400	33,3	5	Áreas de extracção de inertes; zonas de rocha descoberta e com pouca vegetação (solo muito esquelético e muito pedregoso. Alternância com áreas de rocha exposta)	5,2	5
300 - 400	53,5	4	Áreas com vegetação herbácea; vegetação esclerófila e olival (solo esquelético e pedregoso)	50,0	4
200 - 300	8,5	3	Áreas agrícolas heterogêneas (culturas temporárias e pastagens; agricultura com espaços naturais e seminaturais. Solos finos a mediamente desenvolvidos, correspondentes a depósitos em áreas baixas no interior da superfície cársica de recarga)	11,1	3
100 - 200	4,7	2	Áreas florestais (florestas de resinosas e de folhosas, florestas mistas e novas plantações. Solos espessos)	30,3	2
< 100	0,0	1	Áreas com edificações antrópicas (impermeabilização)	3,4	1

Declive (%)		
Classes	% da área de recarga	Pontuação
0 - 8	26,4	5
8 - 16	31,3	4
16 - 32	21,2	3
32 - 40	15,6	2
> 40%	5,5	1

Litologia		
Classes	% da área de recarga	Pontuação
Calcários puros (Batoniano e Bajociano)	95,7	5
Calcários margosos (Aaleniano)	2,8	4
Arenitos (Cretácico inferior)	1,5	2

Áreas de infiltração preferencial					
Falhas / Fracturas			Formas cársicas*		
Classes	% da área de recarga	Pontuação	Classes	% da área de recarga	Pontuação
Locais de intersecção dos principais alinhamentos de falha	9,6	5	Algares de elevada importância (aberturas consideráveis e/ou profundidade >40 m)	0,6	5
Principais falhas; locais de intersecção de fracturas	9,3	4	Algares de importância mediana (profundidade 16 - 40 m)	1,9	4
Falhas de menor importância; fracturas de maior extensão	23,9	3	Algares de pequena importância (pequenas aberturas e/ou profundidade <16 m)	4,4	3
Fracturas de pequena extensão	40,2	2	Restante área	93,1	1
Restante área	17,1	1			

* Designação genérica que representa aqui formas endocársicas (algares) com acção exocársica no processo de recarga (infiltração através das respectivas aberturas na superfície).

223

(i) a **Altitude** (variável A) foi agrupada em intervalos de 100 m, que seguem uma progressão aritmética de diferença 1 na pontuação, de modo a espelhar o aumento da precipitação e, conseqüentemente, da recarga com a altitude. No entanto, o facto da diferença altimétrica na área de recarga não ser muito elevada (cerca de 450 m) faz com que esta variável não tenha uma importância crucial na diferenciação espacial da recarga. Para além disso, grande parte da área de recarga (53,5%) situa-se entre os 300 e os 400 m (Planalto de Degraças-Alvorge), o que testemunha o carácter aplanado de grande parte da superfície de recarga;

(ii) o **Declive** (variável P) foi dividido em classes e a pontuação atribuída diminui uma unidade em função do aumento do declive, ou seja, quanto maior o declive menor a recarga do hidrossistema. Este parâmetro assume uma dupla perspectiva no presente modelo, ou seja, por um lado revela uma forte prevalência da infiltração (78,9% da área tem declives inferiores a 24%), mas, por outro lado, deixa antever que não é um factor preponderante na repartição espacial da recarga;

(iii) a **Litologia** (variável L) apresenta uma enorme homogeneidade, com a quase totalidade da área de recarga a desenvolver-se em calcários puros do Jurássico médio (Batoniano e Bajociano). Esta variável apresenta apenas 3 classes, cuja pontuação foi atribuída em função do grau de carsificação, de fissuração e do potencial carsificável de cada unidade litológica, uma vez que a recarga do hidrossistema aumenta à medida que aumenta o grau de qualquer uma destas características;

(iv) as **Áreas de Infiltração Preferencial** (variável I) englobam duas variáveis de extrema importância na recarga – a fracturação e as formas cársicas (algares) –, as quais, pelo seu carácter espacial muito restrito, permitem uma perspectiva muito nítida da localização das áreas onde a recarga é mais elevada. No que se refere à fracturação atribuímos pontuação de variação 1, progressivamente menor à medida que os acidentes tectónicos têm menor importância, com o valor máximo (5) a ser atribuído às áreas onde se cruzam falhas importantes e um valor muito menor (2) às fracturas, detectáveis apenas por análise de fotografia aérea. Relativamente às formas cársicas (exocarso e endocarso) consideramos apenas aquelas que promovem fortemente a infiltração e que lhe inculcem, inclusive, um carácter concentrado – os algares (através da sua abertura à superfície). A variedade de dimensões dos algares (e das respectivas aberturas) e a sua influência diferenciada no processo de recarga fez com que os agrupássemos em 3 classes, em que a pontuação máxima, também de variação 1, foi atribuída aos algares de grandes dimensões (profundidade superior a 40 m), diminuindo de importância consoante a sua dimensão e respectiva abertura à superfície. Deste modo, a variável I do modelo APLIS resulta, no presente estudo, do cruzamento espacial (mediante sobreposição de ambas as camadas de

informação) da fracturação e dos algares, identificando locais preferenciais de infiltração, ou seja, a área que drena para cada algar juntamente com a área que é afectada pelos acidentes tectónicos;

(v) o **tipo de Solo** (variável S) foi a variável que necessitou de maior alteração relativamente ao modelo original APLIS, uma vez que não existe cartografia de pormenor relativa ao tipo de solos. Assim sendo, tivemos de recorrer à carta de uso e ocupação do solo (COS2007) como forma de, a partir do tipo de uso, obtermos informação indirecta sobre os solos, confirmada pelo conhecimento que possuímos da área através do trabalho de campo. Os critérios para a atribuição da pontuação relacionam-se com a espessura necessária para determinadas actividades e desenvolvimento da vegetação bem como a presença de materiais rochosos, que, em vastas áreas, alternam com algum solo. Os valores mais elevados (5 e 4) foram atribuídos a áreas que facilitam a infiltração, como as áreas de rocha descoberta e pouca vegetação, de olival, de vegetação esclerófila e herbácea, onde os solos são esqueléticos, com muitos calhaus e blocos, alternando, por vezes com manchas de rocha descoberta e fortemente carsificada. As áreas com classificação mais baixa referem-se a áreas que dificultam e retardam claramente a infiltração devido à maior espessura dos solos e à presença de argila (parcelas agricultadas e de pastagem e áreas de floresta). Esta variável apresenta uma enorme importância na distribuição espacial da recarga, já que divide a área praticamente em dois sectores: as áreas mais a oeste do Planalto de Degraças-Alvorge e as Serras de Sicó e do Rabaçal onde predominam os solos esqueléticos e pedregosos (alternando com áreas de rocha descoberta) e o sector centro-leste do referido Planalto onde dominam os solos mais espessos, correspondentes a depósitos que colmatam o fundo de antigas formas cársicas (dolinas) ou se acumulam em áreas mais baixas.

Uma das principais críticas que têm sido feitas a este modelo é a não consideração da repartição espacial da precipitação na superfície de recarga, embora os autores do modelo salientem a introdução indirecta desse parâmetro na variação do factor *Altitude*. Contudo, na área em estudo, este não parece ser um problema, uma vez que não se verifica uma grande desigualdade na distribuição espacial dos quantitativos médios de precipitação.

2.2. A fórmula de cálculo e a distribuição espacial da recarga

O modelo desenvolvido para o hidrossistema cársico de Degraças-Sicó constitui uma primeira abordagem a esta temática, apresentando, como referido anteriormente, um carácter fortemente empírico, baseado, principalmente, no profundo conhecimento do terreno após intenso trabalho de campo.

225

Com base nos pressupostos teóricos presentes na literatura científica e no conhecimento da área em estudo elaborámos uma fórmula de cálculo (soma linear ponderada), em que atribuímos diferentes pesos às variáveis consoante a importância que cada uma delas tem sobre a recarga. A relevância das diferentes variáveis deste modelo decorre de estudos anteriores em hidrossistemas cársicos no sul de Espanha (Durán *et al.*, 2004), onde se concluiu ser a altitude, o declive, a litologia, as áreas de infiltração preferencial e o solo os parâmetros que mais influenciavam a recarga naqueles hidrossistemas cársicos. No mesmo sentido, Alloca *et al.* (2014), num estudo de hidrossistemas cársicos no centro de Itália, mostraram que as variáveis que mais interferem na infiltração são a litologia, o grau de fracturação, o desenvolvimento do epicarso, o declive e o tipo e uso do solo.

Assim, utilizando as designações do modelo APLIS, e após várias simulações, chegamos à seguinte fórmula para o cálculo da taxa de recarga na área em estudo:

$$R = (A + P + 3 \cdot L + 3 \cdot I + 2 \cdot S) / 0,75$$

em que: A – *Altitude*; P – *Declive*; L – *Litologia*; I – *Áreas de infiltração preferencial* (tectónica e formas cársicas – algares); S – *Uso do solo* (COS2007).

A ponderação de cada variável na expressão anterior procura transmitir a importância que cada uma delas exerce na recarga no hidrossistema cársico de Degraças-Sicó. Deste modo, encontra-se espelhada a extrema importância das *Áreas de Infiltração Preferencial*, que se estima tenham uma importância três vezes superior à da *Altitude* e do *Declive*, sendo também a sua influência na recarga superior à da ocupação do *Solo*. Esta última variável exerce uma influência duas vezes superior à da *Altitude* e do *Declive*, sem dúvida as variáveis que, no conjunto, menos influenciam a quantidade e a distribuição espacial da recarga. A *Litologia*, embora não sendo, na área em estudo, um factor espacialmente muito diferenciador devido à grande homogeneidade (calcários do Dogger), é uma das variáveis que mais interfere na recarga, já que se trata de calcários extremamente carsificáveis, muito fracturados e em algumas áreas totalmente expostos (em particular nas serras do Rabaçal e de Sicó).

O ajustamento do valor do denominador da fórmula de 0,9 para 0,75 deve-se aos valores máximos de pontuação atribuídos às várias classes dentro de cada variável. Isto é, enquanto que no modelo original devido à enorme amplitude nas características físicas consideradas se estabeleceu uma pontuação máxima de 10 (escala de 1 a 10), no presente estudo a variação muito menor em todas as variáveis apenas justificou a classificação até um máximo de 5 (escala de 1 a 5). Assim sendo, os valores médio e máximo obtidos para a taxa de recarga com o denominador original eram baixos (43,5% e 72,2%, respectivamente), manifestamente desajustados da realidade da área em estudo, já constatada pelos métodos

de cálculo anteriores (balanço hidrológico e método de Kessler). A definição de 0,75 como valor mais adequado para a fórmula relativa à área em estudo teve por base a maior aproximação possível entre os valores calculados por esta fórmula e os valores já obtidos anteriormente pelos referidos métodos¹⁸. De salientar que esta havia sido a razão já aludida pelos autores do método no seguimento de várias tentativas para a definição da fórmula original.

Outra alteração relativamente à fórmula original do modelo APLIS reside na maior importância atribuída às *Áreas de Infiltração Preferencial* e ao *Solo (uso e ocupação)*. No caso da primeira variável, esta adaptação justifica-se pela enorme afectação da área em estudo pela tectónica, em particular do bordo oeste, que originou a enorme fracturação dos calcários do Dogger. Este conjunto de grandes falhas, fracturas e diáclases que, por si só, aumenta a infiltração, está relacionado ainda com a existência de inúmeras formas cársticas, algumas delas constituindo locais de infiltração excepcionais (aberturas superficiais dos algares), onde a recarga pode assumir um carácter concentrado. Atribuímos também uma maior importância ao *Uso do Solo*, relativamente ao modelo APLIS, uma vez que esta variável é fundamental na diferenciação espacial da recarga na área em estudo, promovendo uma divisão quase dicotómica entre áreas de solos esqueléticos, alternantes com rocha exposta e áreas em que a prática agrícola e a presença de uma floresta com árvores de grande porte revela a existência de uma camada de solo suficiente espessa que possibilite ambos. Esta diferenciação é responsável não só por uma maior taxa de infiltração no primeiro caso mas também pelo carácter mais rápido da infiltração nessas áreas de solos finos e descontínuos, marcados pela forte presença de calhaus e blocos. Segundo Alloca *et al.* (2014) nos terrenos cársticos de solos muito finos praticamente toda a precipitação se infiltra.

Os valores obtidos para a taxa de recarga variam entre um mínimo de 22,6% e um máximo de 86,6%, o que significa que mesmo em áreas onde a infiltração não é tão favorecida pelas características físicas da área de recarga, quase 23% da precipitação acaba por se infiltrar. Em contrapartida, a recarga nunca atinge os 100% da precipitação, mesmo em locais onde se encontrem reunidas as condições que favorecem ao máximo a

¹⁸ O ajustamento com o denominador 0,7 também forneceu valores médios de recarga bastante aproximados aos calculados pelo balanço hidrológico e pelo método de Kessler. No entanto, o valor máximo de recarga anual de 92,8% pareceu-nos claramente exagerado para a área em estudo, se considerarmos que: (i) no ano de 2000/2001 (o mais húmido da série de Degraçias) a recarga foi de 87,4% (método de Kessler); (ii) o valor médio da evapotranspiração real (método de Thornthwaite) ronda os 40%; (iii) a média da recarga (método do balanço hidrológico) nos três meses de maior recarga no período em estudo (excepto 2011/2012) foi de 88,9%. Perante estes valores de recarga, considerámos que a divisão por 0,7 poderia sobrevalorizar os quantitativos de recarga, optando, por isso, pelo valor 0,75 como denominador da fórmula. Consideramos também que este valor poderá ainda ser aperfeiçoado com a continuação da investigação sobre esta área e a recolha de novos dados.

infiltração. O valor médio¹⁹ obtido – 52,2% – aproxima-se bastante dos valores calculados pelos métodos anteriores (Quadro II.III.XII).

O carácter adequado deste método ao hidrossistema cárstico de Degraçias-Sicó é reforçado ainda pelo facto de a diferença encontrada no presente estudo concordar com as conclusões dos autores do APLIS de que os valores obtidos por este método são por vezes inferiores aos valores calculados por outros métodos convencionais em hidrossistemas com elevadas taxas de recarga (superiores a 50% da precipitação) – Andreo *et al.* (2008).

Quadro II.III.XII – Valores da recarga anual – total (mm) e em percentagem – e valores percentuais máximos e mínimos de recarga segundo diferentes métodos de cálculo

	Balanço hidrológico	Método de Kessler	APLIS				Precipitação (mm)	
			d=0,9	d=0,8	d=0,75	d=0,7		
Degraçias	%	56,8	52,5	43,5	48,9	52,2	55,9	1228,7
(1979/80-2006/07)	mm	697,6	647,1	534,5	600,8	641,4	686,8	
Sra. da Estrela	%	59,1	55,1	43,5	48,9	52,2	55,9	1165,5
(2009/10-2012/13)	mm	689,0	642,2	507,0	569,9	608,4	651,5	
V.mínimo V.máximo %								
Degraçias	-	23,2 87,4	18,8 72,2	21,3 81,3	22,6 86,6	24,2 92,8		
Sra. da Estrela	26,0 68,0	31,9 70,1						
V.mínimo - valor mínimo	V.máximo - valor máximo	d - denominador						

Para além do cálculo da taxa de recarga, o método APLIS permite-nos obter mapas da distribuição espacial da recarga pela sobreposição de camadas de informação em ambiente SIG. Os resultados obtidos (Figura II.III.5) foram agrupados em áreas com alguma homogeneidade em termos de taxas de recarga, as quais designámos de 'Sector' e que constituem um importante ponto de partida para a compreensão e explicação da hidrodinâmica do Maciço Cárstico em estudo, em particular das variações da quantidade e das características da água detectadas nas exsurgências do seu bordo oeste (vale do rio Anços). Os resultados obtidos para a distribuição espacial da recarga na área em estudo mostram:

(i) uma diferenciação espacial acentuada da recarga, com um claro contraste entre um sector de predomínio absoluto de classes de recarga *Elevada* a *Extremamente elevada* com infiltração normalmente rápida (54% de toda a área de recarga) e um outro sector onde a

¹⁹ O valor médio da taxa de recarga (R) foi obtido a partir da média dos valores de recarga de cada unidade espacial no mapa da distribuição da recarga, em ambiente SIG.

infiltração é *Moderada a Baixa* e o processo de infiltração é bastante mais lento (46% de toda a superfície de recarga);

(ii) a recarga é muito elevada (Sector I) numa extensa superfície no sector SW do hidrossistema, estendendo-se numa estreita faixa para a parte norte do hidrossistema, onde ocupa, igualmente, uma extensa área. Este sector, de configuração arqueada, corresponde às áreas mais elevadas (serras de Sicó, na parte SW, e do Rabaçal, na parte N-NW), talhadas em calcários do Jurássico médio e de solos esqueléticos alternando com rocha exposta e, sobretudo, às principais áreas de infiltração preferencial, que praticamente decalcam os mais importantes acidentes tectónicos responsáveis pela configuração estrutural do Maciço Calcário de Sicó e a maior densidade de formas cársicas que facilitam a infiltração rápida – os algares (através da sua abertura à superfície). A recarga neste sector, para além de ser globalmente bastante elevada, assume características de recarga rápida ou mesmo muito rápida e pontualmente concentrada (dependendo das características do episódio pluvioso e dos algares). Este sector ocupa uma parte considerável da área ocidental do hidrossistema, aspecto fundamental no comportamento hidrológico das exsurgências da bordadura ocidental do hidrossistema, como veremos mais à frente na análise da descarga;

(iii) contrariamente, as áreas onde a recarga é mais baixa e de carácter mais lento configuram o Sector III, uma extensa e regular superfície que ocupa quase toda a metade oriental do hidrossistema. Este sector, bastante bem definido, corresponde às áreas de declive mais suave, mas onde o solo/epicarso é relativamente espesso (actividade agrícola e floresta), o que diminui a recarga devido às maiores perdas por evapotranspiração e lhe incute um carácter mais demorado, já que a água é obrigada a fazer um percurso bastante mais extenso, de atravessamento desses materiais de cobertura. Esses solos, de carácter fortemente argiloso, encimam depósitos gresosos que se conservaram nas áreas mais baixas desta superfície de recarga, 'atapetando o fundo das depressões cársicas' (carso coberto - Cunha, 1988). Estes depósitos de cobertura invalidam a presença de áreas de infiltração preferencial na superfície de recarga, as quais, mesmo existindo, se encontram cobertas por estes materiais;

(iv) numa situação intermédia entre as características da recarga do Sector I e do Sector III encontram-se superfícies onde coexistem e se interpenetram áreas de recarga muito elevada e até rápida e áreas de recarga moderada a baixa e com carácter lento – Sector II. Estas superfícies ocupam grande parte da área central e da parte setentrional do hidrossistema de Degraças-Sicó e a sua heterogeneidade explica-se pelo facto de, mesmo apresentando características morfológicas e litológicas idênticas, possuem uma enorme variação espacial, coexistindo áreas com solo esquelético e rocha exposta onde se desenvolvem formas cársicas que facilitam a infiltração e áreas de solo mais espesso (agricultados), no fundo de pequenas depressões e nos fundos de vale. Estas áreas (Sector II), em

229

particular as que se situam no Planalto de Degraças-Alvorge, possuem, em nosso entender, uma enorme importância no comportamento das exsurgências da bordadura oeste porque constituem áreas onde a recarga é elevada mas mais lenta do que no Sector I, podendo ser uma das justificações para a existência de uma grande quantidade de escoamento diferido, como veremos mais adiante.

A distribuição da recarga no hidrossistema de Degraças-Sicó, elaborada a partir da adaptação da metodologia APLIS, parece, pois, ser bastante consistente com as características físicas da área e com as observações de campo e parece, ainda, justificar muitos dos comportamentos hidrológicos verificados nas exsurgências do vale do rio Anços, em particular no exutório principal (Olhos d'Água do Anços).

No entanto, voltamos a sublinhar o carácter empírico deste modelo bem como o estágio inicial da aplicação deste tipo de investigação e metodologia neste hidrossistema, pelo que estamos conscientes da necessidade de aperfeiçoamento que este exercício cartográfico requer, bem como a necessidade de comparação com outros métodos.

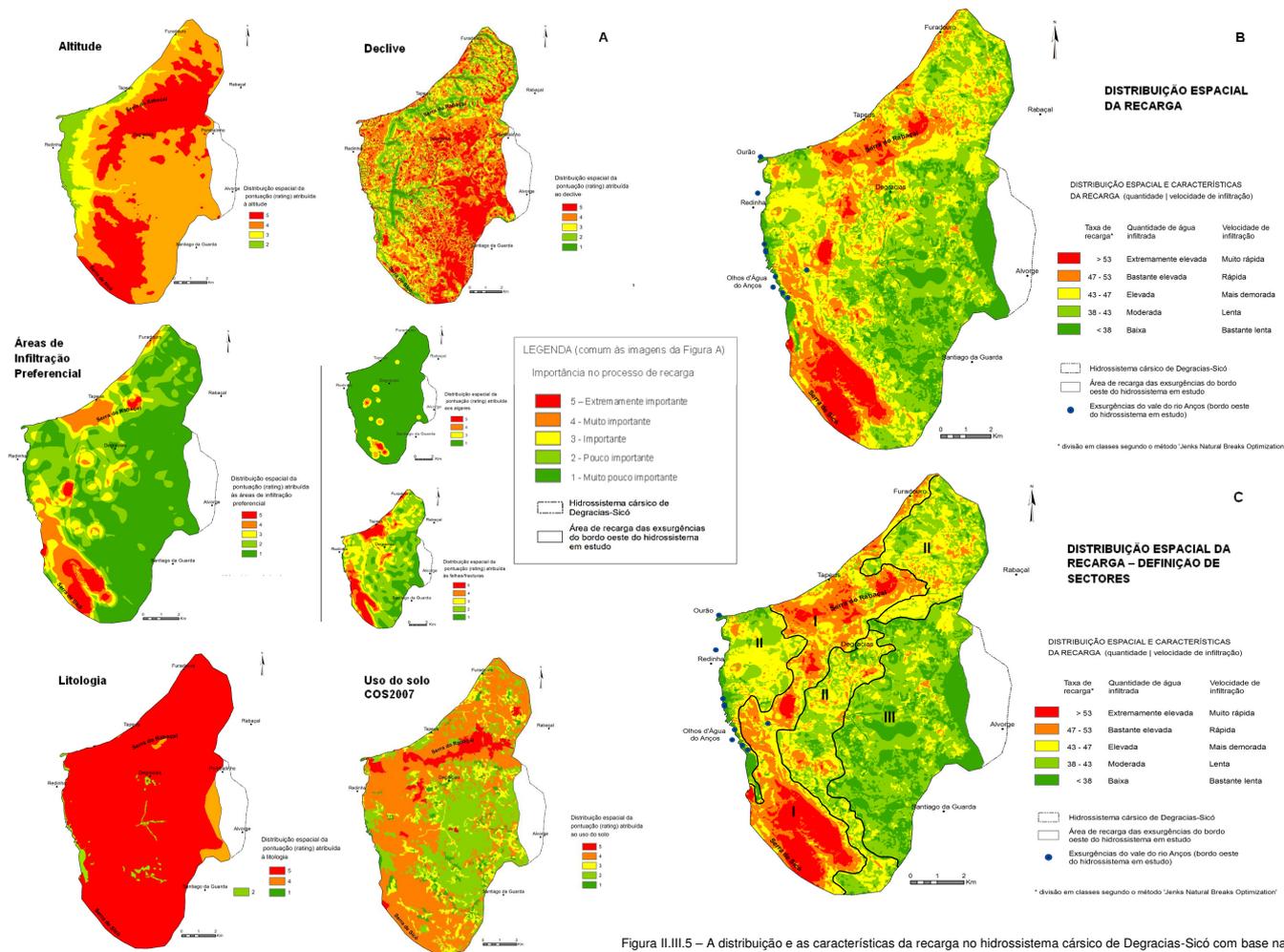


Figura II.III.5 – A distribuição e as características da recarga no hidrossistema cárstico de Degracias-Sicó com base na adaptação do modelo APLIS. Variáveis utilizadas e respectiva importância espacial para o processo de recarga (A); mapa final da distribuição da recarga (B) e definição de sectores com alguma homogeneidade nas características da recarga (C)

CAPÍTULO IV

A DESCARGA DO HIDROSSISTEMA

I. O funcionamento hidrodinâmico a partir do estudo da série de caudais 2009/2010 – 2012/2013

1. A análise do hidrograma: apontamentos teóricos

A forma do hidrograma de uma surgência é, de acordo com a literatura da especialidade, uma transcrição da estrutura do hidrossistema (grau de carsificação, por exemplo), dos parâmetros hidrodinâmicos (transmissividade), das diferentes formas de armazenamento e do funcionamento hidrológico do sistema cársico que alimenta essa surgência (por exemplo, Mangin, 1984; Soulios, 1991; Bonacci, 1993; Eisenlohr *et al.*, 1997; Larocque *et al.*, 1998; Labat *et al.*, 1999; Baedke e Krothe, 2001; Amit *et al.*, 2002; Grasso e Jeannin, 2002; Kovács *et al.*, 2005; Fiorillo, 2009; Jemcov e Petric, 2009).

O hidrograma representa, pois, uma integração de vários processos que controlam a recarga, o armazenamento e a circulação num hidrossistema cársico, desde a área de recarga até ao exutório (Kresic, 1997).

A inexistência de poços e de outros pontos de observação faz do hidrograma uma excelente ferramenta de estudo, cuja análise torna possível obter informação valiosa por exemplo, sobre o grau de estruturação da rede de circulação hipogea, a influência das condutas ou o efeito regulador exercido pelas reservas. Ou seja, permite avaliar as características da circulação no hidrossistema e estimar propriedades hidráulicas gerais

233

desse mesmo hidrossistema. Como salienta Kovács (2003) o hidrograma torna possível a caracterização integral do comportamento hidrológico do conjunto do hidrossistema.

A interpretação e a análise do hidrograma assumem que: (i) a descarga da surgência é controlada pelos episódios de *input* (quantidade e duração dos eventos de precipitação; água proveniente de um curso de água que se perdeu num sumidouro); (ii) a forma do hidrograma é controlada pela circulação subterrânea ao longo de vários 'caminhos' que têm diferentes condutividades e velocidades (Milanovic, 1981, citado por Taylor e Greene, 2008).

Contudo, a principal influência na forma do hidrograma das surgências provém da precipitação. A intensidade e a duração dos episódios imprimem uma configuração única no sinal de *input* (em termos de 'força' e padrão temporal) que é transmitido pelo hidrossistema, com modificações, aos exutórios. As características dos episódios de precipitação, a quantidade de água infiltrada e o armazenamento no hidrossistema determinam se a água de recarga atravessa completamente o hidrossistema (influenciando o caudal da surgência) ou se, pelo contrário, se vai acumulando no seu interior. As condições prévias de armazenamento influenciam fortemente a proporção de água infiltrada que se escoo no imediato (escoamento rápido) e o atraso entre o evento pluvioso e a resposta nas nascentes cársicas.

De acordo com Ford e Williams (2007), a forma dos hidrogramas, apesar de ser influenciada principalmente pelas características da precipitação, é moderada pelo estado de saturação das diferentes zonas e pelas características do hidrossistema, tais como a sua dimensão, a inclinação das camadas, o tipo de recarga (concentrada ou difusa), a variabilidade litológica, a densidade da rede de drenagem subterrânea e o solo/epicarso.

O princípio de base deste método de análise (baseado no hidrograma enquanto peça-chave no estudo *input-output*) é assemelhar o sistema cársico a um filtro que permite a maior ou menor passagem da informação contida no sinal de *input*. Por conseguinte, analisa-se e compara-se a informação do hidrograma (*output*) com o sinal de *input*.

Uma larga variedade de técnicas gráficas e de análise de séries temporais tem sido desenvolvida e aplicada no sentido da obtenção de mais (e mais rigorosa) informação sobre a relação *input-output* através dos hidrogramas, podendo distinguir-se dois tipos de métodos analíticos (Jeannin e Sauter, 1998; Kovács, 2003):

(i) **análise de séries temporais** (*time series analysis*) que lida com a resposta hidrológica global do hidrossistema cársico a uma sucessão de eventos de precipitação. Os métodos de análise univariada conseguem identificar variações cíclicas dentro de uma série de dados enquanto os de análise bivariada são bastante aplicados na análise da relação dos parâmetros de *input* e de *output* dos hidrossistemas cársicos. Estes métodos são baseados em operações puramente matemáticas, não podendo, por isso, ser directamente relacionados com fenómenos físicos, pelo que fornecem informação relativamente limitada sobre as propriedades físicas do hidrossistema. No entanto, a interpretação de alguns resultados

pode relacionar-se e até basear-se em comportamentos hidráulicos do hidrossistema. Incluem-se aqui as análises correlatória e espectral;

(ii) **métodos de eventos únicos** (*single event methods*) que lidam com a resposta hidrológica global do hidrossistema a um único episódio de precipitação, uma vez que nela se manifestam os três atributos básicos de um hidrossistema: recarga, armazenamento e transmissão (circulação). Estas técnicas tornam a caracterização destas propriedades físicas possível, principalmente em termos qualitativos (não conseguem, por exemplo, a quantificação do contributo dessas propriedades na intrincada relação *input-output*), embora a maior parte dessas técnicas considere os fenómenos físicos existentes. Incluem-se aqui as várias técnicas de análise de hidrogramas, em particular as várias formas de análise da curva de recessão.

Estes métodos de análise de hidrograma constituem o cerne do presente trabalho, uma vez que, tal como referido anteriormente, as variações na descarga das exurgências da bordadura oeste do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó são a única fonte de informação sobre o funcionamento hidrodinâmico e, indirectamente, sobre algumas propriedades físicas do próprio hidrossistema. Como salienta Labat *et al.* (1999), na ausência de outros dados, estes processos temporais (análise das séries de caudal e da sua relação com a precipitação) constituem a única informação disponível relativamente a um determinado hidrossistema cársico.

Não obstante a utilidade destes métodos baseados na análise de hidrograma, as críticas e limitações apontadas a este método (Jeannin e Sauter, 1998; Grasso, 1999) levaram a que não nos tivéssemos baseado apenas nas variações da quantidade de água drenada pelos principais exutórios do hidrossistema (traduzidas pelo hidrograma), mas também nas variações das características físicas da água drenada (temperatura e condutividade eléctrica), análise que se seguirá ao estudo do hidrograma.

1.1. O *output* – as exurgências do bordo oeste. Os Olhos d'Água do Anços enquanto exutório principal

Como vimos na caracterização da área de estudo (Parte I, Capítulo II), a grande maioria das exurgências que drenam o hidrossistema de Degraças-Sicó localiza-se ao longo do seu bordo oeste, dispondo-se, longitudinalmente, ao longo do vale do rio Anços, assegurando, algumas delas, o carácter perene desta linha de água. Aqui se localizam, também, as mais importantes exurgências, ou seja, aquelas que registam valor mais elevado de caudal e que têm um carácter permanente.

As exurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão, ambas permanentes, constituem os principais exutórios deste hidrossistema, drenando, em conjunto e em média,

235

75% a 80% da água que, anualmente, circula no sector setentrional do aquífero Sicó-Alvaiázere, embora essa percentagem possa atingir os 90%. O caudal médio anual dos Olhos d'Água do Anços é de $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$, independentemente da fonte de informação utilizada para o cálculo deste valor médio, ou seja, o resultado é idêntico quer se tenha por base, no processo de cálculo, as medições pontuais (mensais) com molinete e micro-molinete (de 1999 a 2008)¹ ou os registos digitais do período em estudo (2009/2010 – 2012/2013). Tal situação veio também corroborar a enorme fiabilidade e exactidão destes últimos dados.

O mesmo não sucede na exurgência do Ourão, que apresenta dois valores de caudal médio anual consoante os dados utilizados: $0,61 \text{ m}^3/\text{s}$ (medições pontuais realizadas entre 1999 e 2008) e $0,93 \text{ m}^3/\text{s}$ segundo os registos digitais do período em estudo. Apesar do carácter rigoroso da informação digital, cremos que se trata de um valor médio relativamente exagerado, que não corresponderá à realidade, tendo em atenção o caudal dos Olhos d'Água do Anços e as áreas das respectivas bacias hidrogeológicas.

Se considerarmos os registos digitais do período em estudo (tal como fizemos na análise da recarga), o volume anual médio drenado por estas exurgências é de cerca de 77 Mm^3 ($40,8 \text{ Mm}^3$ pelos Olhos d'Água do Anços e $29,2 \text{ Mm}^3$ pelo Ourão), valor a que se soma cerca de 7 Mm^3 do conjunto das restantes exurgências do bordo ocidental do hidrossistema, de pequena dimensão e de carácter permanente a jusante dos Olhos d'Água do Anços e temporárias a montante (ver Figura I.II.1.3).

A discrepância sazonal do volume de caudal drenado pelos Olhos d'Água do Anços é bastante acentuada acompanhando a distribuição da precipitação ao longo do ano hidrológico, embora não a decalcando na perfeição quando observada mais ao pormenor. Esse enorme contraste é visível nas imagens da Figura II.IV.1.1 A, que documentam diferentes contextos sazonais (e situações hidrometeorológicas) ao longo dos anos em estudo.

O período mais húmido (em particular os meses de Inverno) caracteriza-se por valores elevados de caudal, em resposta a quantitativos de precipitação (e recarga) igualmente elevados. Em termos de valores diários médios, os mais elevados foram de cerca de $5,7 \text{ m}^3/\text{s}$ no período de 1 a 7 de Abril de 2013, na sequência de um mês de Março excepcionalmente chuvoso ($334,1 \text{ mm}$), embora os caudais instantâneos máximos tenham sido ainda superiores ($5,85 \text{ m}^3/\text{s}$ no dia 4 de Abril de 2013). No entanto, os valores máximos registados nesta exurgência (obtidos por medições pontuais com molinete entre 1999 e 2008) foram bastante superiores – $8,17 \text{ m}^3/\text{s}$ (16/01/2001); $7,94 \text{ m}^3/\text{s}$ (08/02/2001); $7,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (21/01/2003);

¹ Medições e cálculos efectuados por técnicos da ex-Direcção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território e gentilmente cedidos por esses técnicos.

A – Olhos d'Água do Anços



21/01/2013 14:19 Caudal instantâneo: 4,9 m³/s



19/10/2009 12:31 Caudal instantâneo: < 0,2 m³/s



26/04/2013 17:19 Caudal instantâneo: 3,1 m³/s



22/10/2009 12:53 Caudal instantâneo: 0,3 m³/s



15/06/2010 18:18 Caudal instantâneo: 1,0 m³/s

B – Ourão



16/12/2012 13:15 Caudal instantâneo: 2,10 m³/s



12/03/2010 15:25 Caudal instantâneo: 1,45 m³/s



10/10/2009 13:48 Caudal instantâneo: 0,20 m³/s

Figura II.IV.1.1 – As exsurgências dos Olhos d'Água do Anços (A) e do Ourão (B) em diferentes contextos hidrológicos sazonais. (De notar o represamento da água por intervenções antrópicas na exsurgência do Ourão)

6,90 m³/s (18/12/2000); 6,71 m³/s (14/03/2001)¹.

No Verão e início do Outono, pelo contrário, o caudal dos Olhos d'Água do Anços reduz-se extraordinariamente, com as saídas principais a secarem quase por completo, mantendo, contudo, o seu carácter permanente, mesmo em anos secos. Os valores mínimos registam-se no final de Setembro e até mesmo em Outubro, imediatamente antes da ocorrência de precipitação em quantidade suficiente para provocar a subida consistente e gradual do caudal. Os valores mínimos do período 2009/2010 – 2012/2013 rondam os 0,2 m³/s, valor que, devido à sua obtenção por forma indirecta (conforme explicado na Parte II, Capítulo I) não corresponderão exactamente ao valor mínimo absoluto deste período, dada a grande secura do ano de 2011/2012, que reduziu o caudal desta exsurgência a valores abaixo dos 0,2 m³/s, mas que não nos foi possível medir.

As medições com micro-molinete entre 1999 e 2008 revelaram que os quantitativos mínimos (particularmente em anos hidrológicos muito secos e períodos prolongados de grande secura) são ínfimos – 0,004 m³/s (em 07/09/2005 – ano extremamente seco); 0,035 m³/s (01/08/2005); 0,048 m³/s (15/07/2005); 0,055 m³/s (10/12/2007); 0,06 m³/s (17/10/2007).

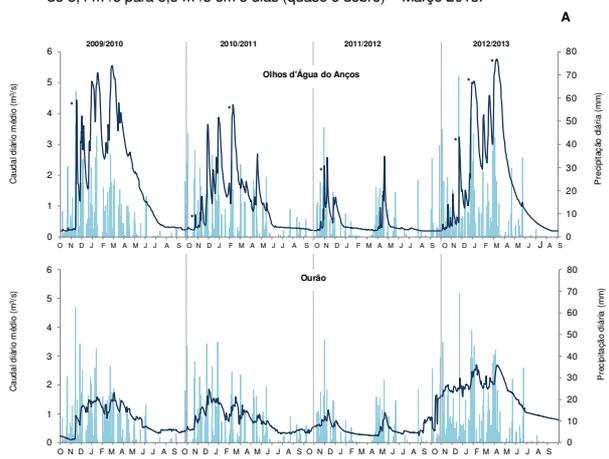
O hidrograma dos Olhos d'Água do Anços (Figura II.IV.1.2) é bastante contrastado e variável, com valores baixos de caudal a que se podem seguir picos consideráveis, revelando, assim, o aumento drástico e relativamente rápido² do caudal em resposta à ocorrência de elevados quantitativos de precipitação (e de recarga). Uma observação mais pormenorizada das variações diárias do caudal nos Olhos d'Água do Anços ao longo do período em estudo mostra importantes oscilações no caudal, em particular na curva de crescimento, e que podem ser ilustradas pelas seguintes subidas:

- de 0,3 m³/s para 4,4 m³/s em 2 dias (aumento de 14,7 vezes) – Novembro 2009;
- de 0,9 m³/s para 3,1 m³/s em 3 dias (aumento de 3,4 vezes) – Dezembro 2010;
- de 1 m³/s para 3,9 m³/s em 4 dias (aumento de 3,9 vezes) – Fevereiro de 2011;
- de 1,1 m³/s para 2,7 m³/s em 3 dias (aumento de duas vezes e meia) – Abril de 2011;

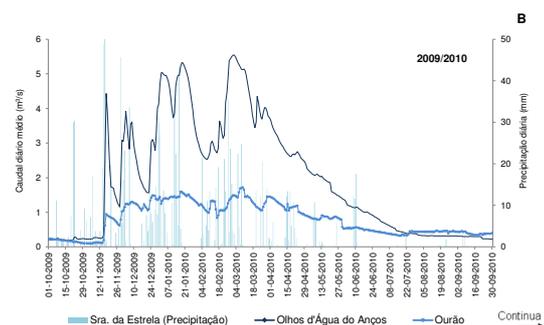
¹ Embora estes valores possam parecer demasiadamente elevados numa primeira apreciação, a sua veracidade pode ser fundamentada nos valores excepcionalmente elevados de precipitação que ocorreram em Dezembro de 2000 e Janeiro de 2001. A estação udiográfica de Degraças registou totais de precipitação de 434 mm em Dezembro e 573 mm em Janeiro, números confirmados pelas estações vizinhas de Ansião (468 mm e 440 mm em Dezembro e Janeiro, respectivamente) e de Alvaizere (485 mm em Dezembro e 416 mm em Janeiro). Estes valores constituíram inclusive máximos pluviométricos nas séries de 30 anos das três estações.

² De notar que a aplicação do termo 'rápido' a aspectos da hidrodinâmica do sistema cársico de Degraças-Sicó se refere a intervalos/atrasos diários (sempre igual ou superior a 1 dia) e deve ser entendida à luz das características do hidrossistema, em particular da sua área total (cerca de 120 Km²) e da sua espessura (cerca de 300 m entre a área de recarga e os principais exutórios, no bordo oeste). Como tal, esta designação não deve ser reportada a hidrodinâmicas verdadeiramente velozes (atrasos de algumas horas apenas), características de alguns dos mais conhecidos hidrossistemas europeus, como por exemplo Aliou e Badget, estudados por Mangin (1975, 1984).

- de 0,3 m³/s para 1,3 m³/s e de 1,1 m³/s para 2,6 m³/s em apenas 2 dias, o que significou subidas de 4,3 vezes e 2,4 vezes no valor do caudal – Maio de 2012;
- de 1,9 m³/s para 4,6 m³/s em 3 dias (aumento de 2,4 vezes) – Janeiro de 2013;
- de 3,4 m³/s para 5,3 m³/s em 3 dias (quase o dobro) – Março 2013.



Nota: os asteriscos presentes no hidrograma da primeira imagem (Olhos d'Água do Anços) sinalizam os episódios que, em seguida, serão analisados em pormenor



Continua →

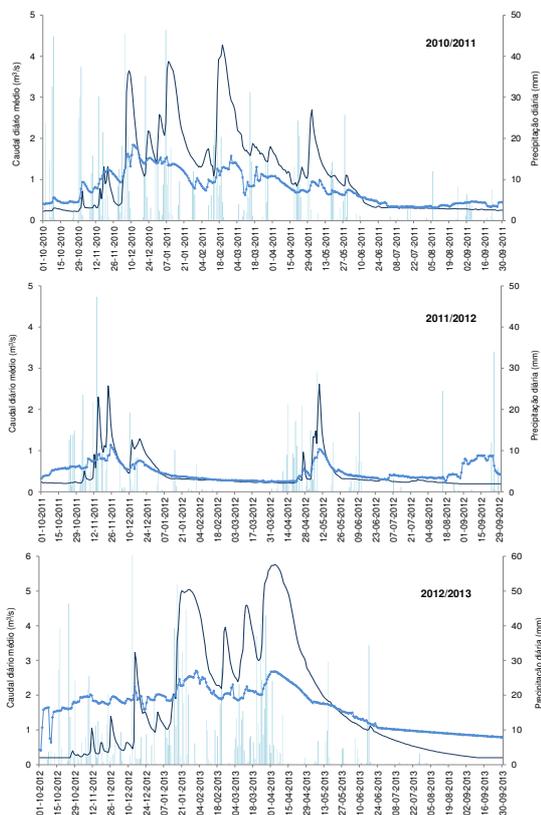


Figura II.IV.1.2 – Caudal diário médio (m^3/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e no Ourão e precipitação diária (mm) na área de recarga (estação da Sra. da Estrela) no período 2009/2010 – 2012/2013. Representação conjunta (A) e individual (B) dos quatro anos hidrológicos

241

De salientar que os exemplos supra referidos ocorreram desde Novembro a Maio, independentemente das características hidrometeorológicas do respectivo ano e da quantidade de precipitação acumulada até à data, ou seja, registaram-se tanto num ano muito seco (2011/2012) como num ano húmido (2012/2013).

A exsurgência do Ourão apresenta um comportamento muito próximo dos Olhos d'Água do Anços, embora não registre um contraste tão acentuado entre os valores mais elevados e o caudal mínimo (durante a estiagem ou em períodos e anos secos). Este amortecimento dos picos de caudal e o aumento dos caudais mínimos deve-se ao represamento da água na exsurgência e a demais intervenções antrópicas (Figura II.IV.1.1 B), que explicam algumas oscilações de pormenor, por vezes contrárias às dos Olhos d'Água do Anços, mas sem qualquer significado.

Não obstante esta menor amplitude dos valores de caudal, a exsurgência do Ourão tem um comportamento globalmente semelhante ao dos Olhos d'Água do Anços (Figura II.IV.1.2), em especial na resposta a episódios de abundante precipitação (e recarga) e na forma da curva de recessão. Por conseguinte, a série de caudais desta exsurgência não será utilizada em análises de pormenor *input-output* pelas razões expostas, mas será considerada para confirmar algumas das hidrodinâmicas e características do hidrossistema em estudo, inferidas a partir da série de caudais dos Olhos d'Água do Anços. Deste modo, será possível concluir que um determinado comportamento do caudal drenado pelos Olhos d'Água do Anços constitui, efectivamente, o reflexo das características físicas e hidrodinâmicas do hidrossistema.

Na análise *input-output*, que agora iniciamos, um dos aspectos com maior interesse para compreender o funcionamento hidrodinâmico deste maciço cársico é a diferença temporal entre o episódio de recarga (precipitação)³ e a resposta do caudal nos Olhos d'Água do Anços. Assim, no sentido de obtermos mais informação relativamente ao *atraso da resposta*⁴ (*lag time*) da descarga face a um episódio de recarga, em diferentes alturas do ano hidrológico, procedemos à análise de pormenor de alguns episódios recarga-descarga nos quatro anos analisados. Estes episódios permitiram uma primeira abordagem mais detalhada, a nível diário⁵, sobre a complexa relação entre a precipitação ocorrida na área de

³ De relembrar que nesta escala temporal (dia) a recarga é entendida como a precipitação total, pelas razões já apresentadas e fundamentadas (Parte II, Capítulo II).

⁴ O conceito de *atraso (da resposta)*, no âmbito da hidrologia cársica, significa o intervalo de tempo entre a ocorrência de precipitação (e infiltração) e a chegada dessa água à exsurgência, influenciando o seu caudal. Não deve ser confundido com o *tempo de resposta*, um conceito muito específico em Hidrologia e que designa o tempo que decorre entre o centro de gravidade de um episódio de precipitação e o pico de caudal.

⁵ A análise do atraso a nível horário não foi efectuada neste ponto do trabalho para evitarmos repetições, já que iremos utilizar essa escala temporal pormenorizada aquando do estudo da resposta desta exsurgência através da condutividade eléctrica e da temperatura (conjugadas com a variação do caudal), aspecto que será desenvolvido mais à frente neste estudo. Ademais, os valores horários serão utilizados também no último capítulo (Parte III), em comparação com os valores horários do rio Arunca.

recarga e o caudal drenado pela principal exsurgência do hidrossistema ao longo dos quatro anos em análise.

Numa observação mais pormenorizada da série de caudais desta exsurgência, constata-se que o intervalo temporal (atraso, em dias) entre o sinal de *input* e o sinal de *output* é, por norma, de 1 a 3 dias, embora o mais comum seja apenas de 1 dia. Como sinal de *input* considerámos, de acordo com a especificidade de cada situação hidrometeorológica: (i) o início da sequência pluviosa (quando esse valor diário é superior a 10 mm e a precipitação se prolonga por vários dias); (ii) o primeiro pico de precipitação dessa sequência (quantitativos diários superiores a 20 mm); (iii) um episódio pluvioso isolado (valores diários sempre superiores a 20 mm). O sinal de *output* corresponde ao início da subida acentuada e consistente do caudal nos Olhos d'Água do Anços⁶.

O atraso da resposta pode variar consoante a altura do ano hidrológico em que ocorra esse episódio de recarga, a quantidade de precipitação e a duração desse episódio/sequência e a quantidade de água já existente no hidrossistema. Por conseguinte, a análise que se segue será desenvolvida praticamente a nível mensal, percorrendo, em pormenor, o ano hidrológico de Outubro a Maio para, assim, se compreender a resposta desta exsurgência e, consequentemente, o comportamento hidrodinâmico do sistema cársico em diferentes contextos sazonais de precipitação (e recarga).

Deste modo, há que realçar os seguintes aspectos decorrentes da análise:

(i) o início do ano hidrológico (**mês de Outubro**) caracteriza-se por uma resposta muito ténue, praticamente imperceptível, do caudal à ocorrência de precipitação, mesmo que os totais diários excedam os 30 mm ou mesmo 40 mm – Figura II.IV.1.3. Esta realidade é característica deste mês e ocorre quer no seguimento de anos secos (Outubro de 2012, após 2011/2012) quer de anos normais (Outubro de 2010, após 2009/2010), sendo que a explicação reside nos quantitativos de evapotranspiração ainda altos neste mês e na retenção no solo/epicarso (de espessura considerável em alguns locais da área de recarga), muito seco após um longo estio.

(ii) No mês de **Novembro** e no **início de Dezembro**, quantitativos diários de precipitação acima dos 30 ou 40 mm reflectem-se, com um atraso de cerca de 1 dia, numa subida acentuada do caudal nos Olhos d'Água do Anços. A ponta do hidrograma pode atingir valores superiores a 2 m³/s ou mesmo 4 m³/s, o que pode ocorrer no dia seguinte ao pico de

⁶ Duas considerações metodológicas breves: (i) na análise do episódio de precipitação nesta fase inicial do trabalho não considerámos (como é regra em Hidrologia) o centro gravítico da chuva, uma vez que estamos a trabalhar à escala diária e porque as características geomorfológicas da área de recarga promovem a infiltração desde o início da chuva; (ii) o momento a partir do qual consideramos que o caudal aumenta pode aqui ser ainda um pouco discutível, dada a escala temporal de análise (dia) e a base de análise ser apenas gráfica. Contudo, permite obter uma primeira imagem da forma como os Olhos d'Água do Anços respondem a um evento de recarga, aspecto que será aprofundado já em seguida através da *análise de séries temporais* e do estudo da *variação da temperatura e da condutividade eléctrica da água* nesta exsurgência.

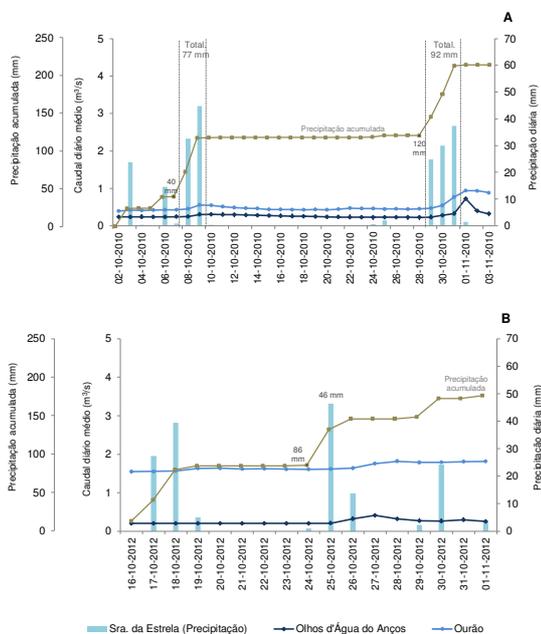


Figura II.IV.1.3 – Caudal diário médio (m³/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela no início do ano hidrológico – Outubro de 2010 (A) e Outubro de 2012 (B)

precipitação ou no dia seguinte ao fim de uma pequena sequência pluviosa, tal como ocorreu em 14-15 de Novembro de 2011 e 14-17 de Novembro de 2009, respectivamente. Mesmo no caso de valores diários de precipitação mais modestos (cerca de 20 mm), o atraso da resposta dos Olhos d'Água do Anços é de cerca de 1 dia – Figura II.IV.1.4.

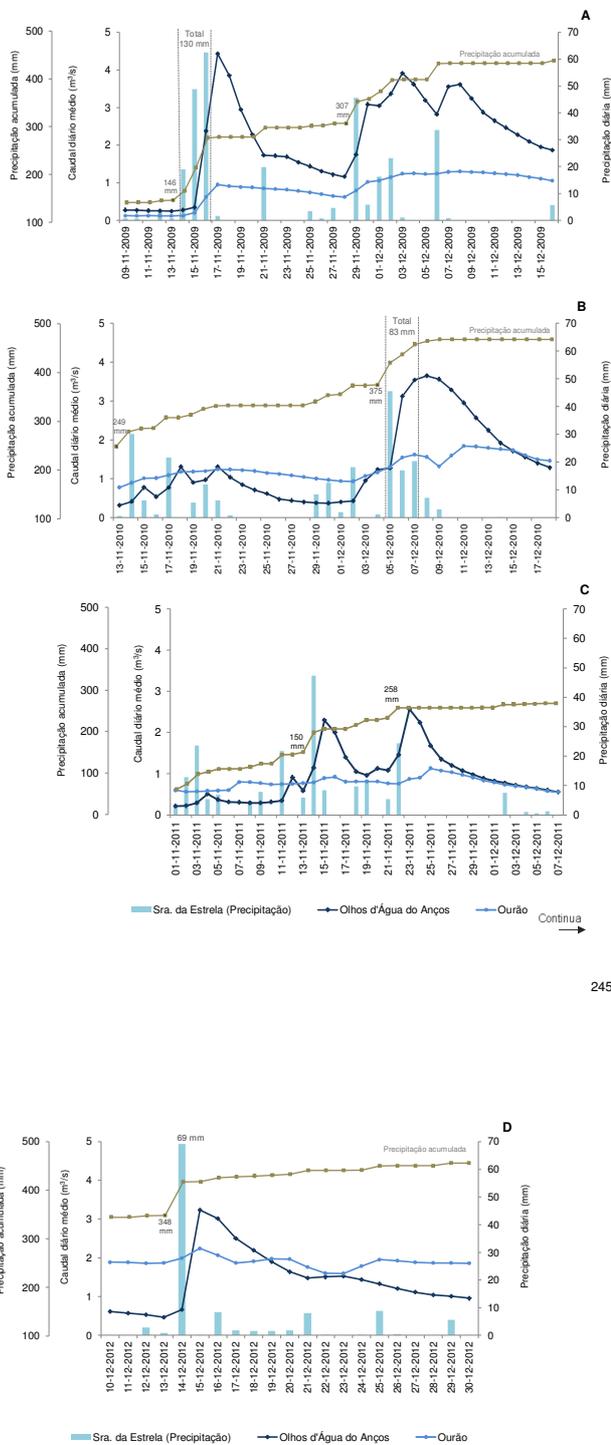


Figura II.IV.1.4 – Caudal diário médio (m^3/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anjos e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela no mês de Novembro e início de Dezembro – 2009 (A); 2010 (B); 2011 (C); 2012 (D)

A resposta dos Olhos d'Água do Anjos (subida pronunciada do caudal), embora seja, neste período, bastante semelhante em termos de atraso face à ocorrência de precipitação é diferente no modo como ocorre, variando consoante as características da precipitação, podendo individualizar-se duas situações, conforme a intensidade e duração da precipitação: (i) no seguimento de um episódio isolado (por exemplo, mais de 40 mm num dia) ou de uma curta sequência temporal (2 ou 3 dias) com precipitação muito abundante, a resposta é extremamente abrupta, verificando-se, por norma, no mesmo dia (atraso inferior a 1 dia) e o valor máximo de caudal no dia seguinte, atingindo valores várias vezes superiores ao caudal anterior à resposta (Figura II.IV.1.4) e revelando, por vezes, características de circulação em regime turbulento (Figura II.IV.1.5). Subida idêntica é visível quando ocorre um pico de precipitação no início ou durante uma sequência de dias com precipitação, embora, neste caso, o máximo de caudal apenas se registre alguns dias depois, já que a precipitação persistiu (Figura II.IV.1.4 B); (ii) perante uma sequência de bastantes dias chuvosos (precipitação menos concentrada e mais persistente, ao longo de mais de uma semana), a subida do caudal não é tão abrupta nem os picos de caudal tão elevados, embora o atraso recarga-descarga continue a ser inferior a 1 dia (Figura II.IV.1.4C). Neste caso, o máximo de caudal pode ocorrer alguns dias após o início da sequência pluviosa ou após o pico de precipitação dessa sequência.



Figura II.IV.1.5 – A resposta dos Olhos d'Água do Anços no início do ano hidrológico: neste caso resposta a uma sequência curta e de elevada precipitação (130 mm em 3 dias) em Novembro de 2009 (ver imagem A da Figura II.IV.1.4)

No que respeita à curva de decrescimento nestes meses, conseguem identificar-se dois comportamentos, que podem ser justificados pelas características da precipitação mas também pelas propriedades físicas do próprio hidrossistema que interferem, minoritariamente, nesse processo: (i) após um pico isolado e bastante elevado de precipitação ou um episódio curto e com quantitativos extremamente elevados, a curva de decrescimento é também bastante abrupta (embora menos que a curva de crescimento), sendo comum que depois desse evento hidrometeorológico, o caudal regresse a valores próximos dos apresentados antes do episódio de recarga. O trabalho de campo mostrou, inclusive, que algumas exurgências podem voltar a secar depois desse ímpeto de descarga (situação por nós observada mais do que uma vez na exurgência do Rio da Estrada, um pouco a montante dos Olhos d'Água do Anços e, portanto, de carácter temporário); (ii) no

247

seguimento de períodos mais prolongados de precipitação (vários dias), a forma da curva de decrescimento é bastante mais suave, mesmo que não chova nos dias seguintes. Essa descida será tanto mais lenta quanto mais elevada tiver sido a quantidade de água infiltrada durante o episódio e maior a quantidade de água já existente no hidrossistema desde o início do ano hidrológico (visível a partir da curva da precipitação acumulada). É também interessante constatar como o hidrossistema 'absorve' determinados eventos de precipitação, que ocorrem de modo isolado ou em pequenas sequências e que, no conjunto, totalizam cerca de 20 a 30 mm. Ao não se repercutir de imediato no caudal dos Olhos d'Água do Anços, essa água infiltrada (de forma lenta e difusa, dados os baixos quantitativos) pode seguir dois caminhos: atingir um pouco mais tarde a exurgência (escoamento diferido) ou ficar armazenada na densa rede de pequenas fracturas e fissuras que caracteriza este sistema cársico ou na zona saturada, constituindo o escoamento de base durante a estação seca.

(iii) Os meses de **Janeiro e Fevereiro** correspondem ao período de maior recarga, com precipitação de carácter menos torrencial e mais persistente (mas igualmente abundante), podendo-se estender ao longo de vários dias consecutivos. Embora o contexto meteorológico seja diferente do período outonal, o atraso da resposta do caudal dos Olhos d'Água do Anços continua a ser de apenas 1 dia, ou seja, verifica-se uma subida assinalável do caudal no dia seguinte à ocorrência de um evento considerável de precipitação (sempre acima de 20 mm), embora o máximo de caudal ocorra apenas 2 a 3 dias depois – Figura II.IV.1.6.

A resposta é, portanto, rápida e profusa, com o caudal diário médio a atingir valores duas e três vezes superiores no intervalo de apenas 2 a 3 dias. Este aumento de caudal pode ocorrer tanto de forma impetuosa (quando os valores de caudal são, nesse momento, inferiores a 2 m³/s e praticamente não choveu nas duas semanas anteriores) como de forma mais moderada (quando o caudal já se encontra acima dos 2 m³/s e se registou precipitação na semana anterior). Esta última situação encontra-se ilustrada na fotografia A da Figura II.IV.1.7, onde se observa a saída de um considerável volume de descarga (na sequência de mais de uma semana de precipitação abundante), mas sem a impetuosidade que caracteriza algumas respostas e que, pelo carácter menos turvo da água, não parece indicar circulação em regime turbulento.

No entanto, o que fundamentalmente caracteriza este período, e o distingue de outros, é a permanência de valores elevados de caudal (muito próximos do pico de caudal – valor superior a 4 ou 5 m³/s) durante vários dias seguidos, por vezes mais de uma semana, o que se explica por: (i) continuação da precipitação após um período de cheia, dado o carácter

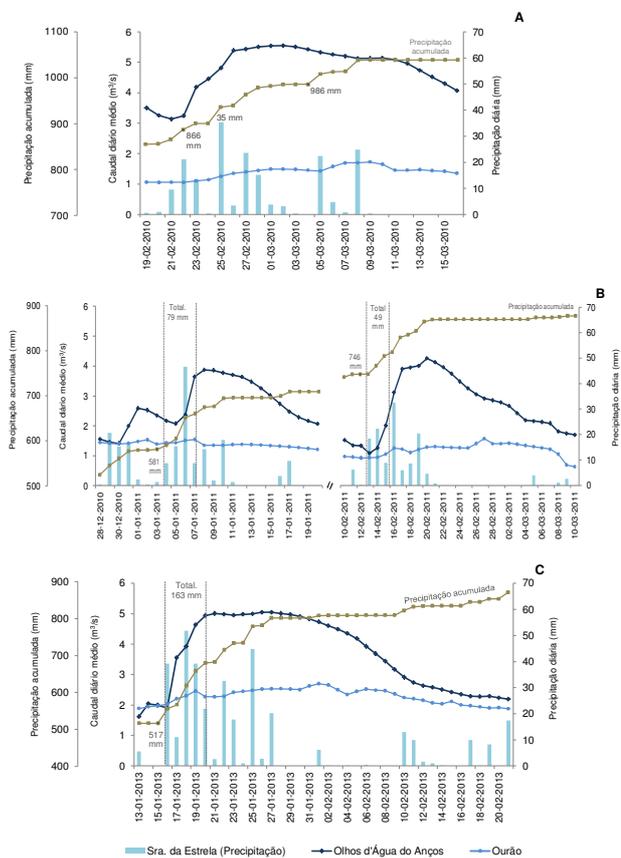


Figura II.IV.1.6 – Caudal diário médio (m^3/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela nos meses de Janeiro e Fevereiro – 2010 (A); 2011 (B) e 2013 (C)

249



Figura II.IV.1.7 – Olhos d'Água do Anços no Inverno (meses de Janeiro e Fevereiro)

persistente da precipitação nesta altura do ano hidrológico (Figura II.IV.1.6 A); (ii) entrada de uma enorme quantidade de água (recarga por vezes excepcionalmente alta), em resultado de uma sequência de vários dias de precipitação abundante (que pode durar mais de uma semana). Neste caso, mesmo após vários dias sem ocorrência de precipitação, o caudal nos Olhos d'Água do Anços permanece muito elevado. Esta situação aconteceu em Janeiro de 2013, onde em 5 dias se registaram 163 mm de precipitação, com o caudal a manter-se próximo do valor de ponta de cheia durante 8 dias e a demorar mais de 1 mês a regressar aos valores pré-evento tempestuoso (Figura II.IV.1.6 C). Consequentemente, a curva de decrescimento apresenta um declive muito suave, que traduz a diminuição lenta do caudal na exsurgência em estudo, demorando mais de uma semana (por vezes duas ou mais semanas) a voltar a valores próximos dos apresentados antes da subida. A imagem B da Figura II.IV.1.7 testemunha esta realidade, mostrando um caudal ainda abundante ($2,7 m^3/s$) mesmo após uma semana onde praticamente não ocorreu precipitação (apenas 16 mm). Os acontecimentos hidrometeorológicos aqui analisados mediante as representações gráficas da Figura II.IV.1.6 (em particular a forma da curva de decrescimento) e as imagens da Figura II.IV.1.7 mostram que, apesar de uma resposta rápida e quase sempre impetuosa dos Olhos d'Água do Anços, uma grande parte da água infiltrada num episódio de recarga é drenada de forma mais calma, correspondendo a água que demorou bastante mais tempo a atravessar o hidrossistema e a chegar ao exutório (escoamento diferido, como veremos mais adiante).

(iv) O mês de **Março** apresenta características muito específicas e que diferem um pouco do que vimos analisando até ao momento no que respeita ao modo como o sinal de *output* (caudal dos Olhos d'Água do Anços) responde ao sinal de *input* (precipitação na área

de recarga). O primeiro aspecto a salientar é a variabilidade do atraso da resposta da exsurgência, ou seja, o início da subida do caudal pode ocorrer com 1 dia de atraso, embora, por norma, tenha sido mais demorado – 2 dias após o pico de precipitação ou o início da sequência. Acresce ainda que as subidas do caudal não são tão acentuadas como nos meses anteriores, mesmo que os valores da precipitação sejam elevados, o que é válido para anos em que o caudal apresente, nesse momento, valores baixos (inferior a 2 m³/s) ou valores bem mais elevados (superior a 3 m³/s) – Figura II.IV.I.8.

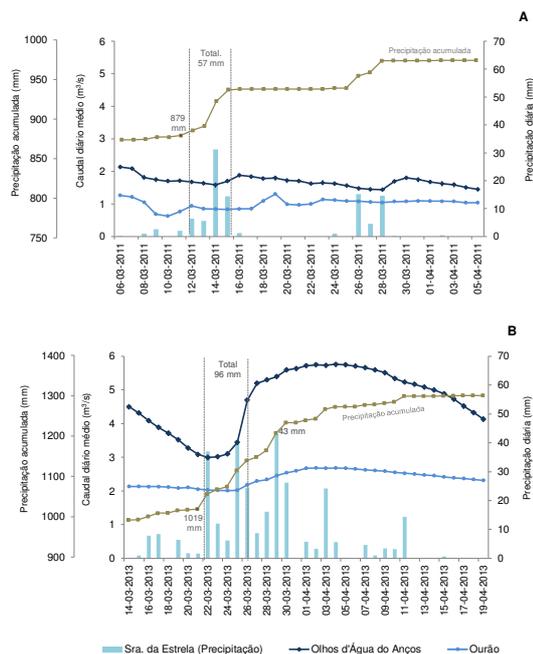


Figura II.IV.I.8 – Caudal diário médio (m³/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela no mês de Março – 2011 (A) e 2013 (B)

251

Outro aspecto importante a salientar é a inexistência de resposta ou uma resposta insignificante dos Olhos d'Água do Anços a episódios ou sequências de precipitação elevadas (superiores a 30 mm e mesmo a 40 mm), o que ocorreu, por exemplo, em Março de 2013. Este comportamento, atípico nesta exsurgência, explica-se pelos valores muito elevados de caudal nesse momento (≥ 5 m³/s, em resposta a recargas igualmente muito elevadas), pelo que o nível piezométrico se encontrava bastante acima do nível do exutório. Por conseguinte, qualquer entrada adicional de água, não se repercutiu de imediato no caudal, mas assegurou a permanência desses valores muito altos de caudal (a rondar os 5 m³/s) durante 2 a 3 semanas, tornando a curva de decréscimo muito suave. Esta forma da curva de decréscimo, reflectindo um lento esvaziamento da água acumulada no interior do hidrossistema em estudo, pode considerar-se como uma característica hidrodinâmica, já que ocorre também em anos em que a recarga foi bem mais baixa até este mês (caso dos cerca de 880 mm acumulados até Março de 2011 face aos 1020 mm de 2013).

O comportamento do caudal dos Olhos d'Água do Anços no mês de Março parece desmentir o carácter rápido da resposta desta exsurgência, bem como a magnitude dessa resposta, características que fomos identificando ao longo desta análise. No entanto, esta contradição é apenas aparente e justifica-se pela elevada quantidade de água já existente no interior do hidrossistema (mais de 70% da recarga ocorre até esta altura) e pela capacidade deste em filtrar pequenos eventos pluviosos.

A inexistência de resposta face a alguns episódios de precipitação em Março de 2013 (coincidentes com o período de caudais máximos), bem como a relativa uniformidade dos caudais diários médios nesse período, o valor máximo de caudal diário médio e a forma abaulada do hidrograma em ponta de cheia (e não pontiaguda, como habitualmente) em nada contrariam a análise empreendida até ao momento. Isto porque tais situações não se relacionam com as características físicas do hidrossistema em estudo, mas sim com a dimensão da galeria (sifão vertical) que desemboca na sala interior da exsurgência e através da qual a água chega até essa sala inundada e daí drena através de duas aberturas – Figura II.IV.I.9.

(v) A segunda quinzena de Abril e o mês de Maio inserem-se já no período de recessão, ou seja, no período de esvaziamento do hidrossistema, com a diminuição gradual, no caudal das exsurgências, do contributo do escoamento diferido e o aumento progressivo do escoamento de base. Em termos hidrometeorológicos, ao mesmo tempo que ocorre a descida do caudal, verifica-se a diminuição acentuada da precipitação (com Maio a marcar o final da época de recarga) e o aumento pronunciado da temperatura e, conseqüentemente, da evapotranspiração. Será, por isso, de supor que uma sequência de vários dias com ocorrência de precipitação resulte apenas numa ligeira subida do caudal.

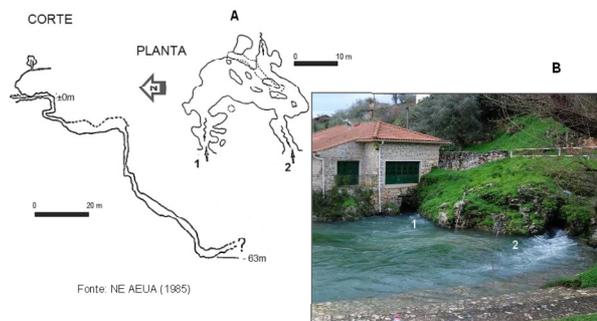


Figura II.IV.I.9 – A exurgência dos Olhos d'Água do Anços – sistema espeleológico em corte e em planta (A). Aspecto actual das saídas da água (B)

O que se constata, porém, é uma diversidade de respostas do caudal face à precipitação ocorrida, que apenas coincidem no atraso da resposta (que continua a ser de 1 dia apenas) e no carácter acentuado dessa subida. De notar, a propósito, que estas subidas podem ser consideradas como significativas, se atendermos ao facto de os valores de precipitação presentes na Figura II.IV.I.10 corresponderem a quantitativos de recarga bastante inferiores, devido às perdas por evapotranspiração, como já referimos.

A diversidade de respostas patente em ambos os gráficos da Figura II.IV.I.10 deve-se, em nosso entender, à quantidade de água acumulada no hidrossistema até essa data e que, no caso de 2011 é o dobro de 2012, este último registo ocorrido no seguimento de um longo período invernal extremamente seco. Assim, em Abril e Maio de 2012 (imagem B), há uma rápida resposta do caudal a pequenos quantitativos diários de precipitação, num claro decalque (embora com atraso de 1 dia) entre a ocorrência de precipitação e o aumento do caudal nos Olhos d'Água do Anços e, inversamente, entre a ausência de precipitação e a descida do caudal. Tratar-se-á, pois, neste caso, de uma circulação de carácter mais rápido no interior do hidrossistema, com o impulso de recarga a chegar rapidamente a esta exurgência, findo o qual, o caudal diminui praticamente de imediato (curva de decrescimento íngreme), voltando a aumentar quando chegar um novo impulso de recarga.

O comportamento do caudal em Abril e Maio de 2011 (imagem A) é, porém, substancialmente diferente do descrito anteriormente, verificando-se após um período outono-invernal chuvoso, em perfeita consonância com as características climáticas desta região.

253

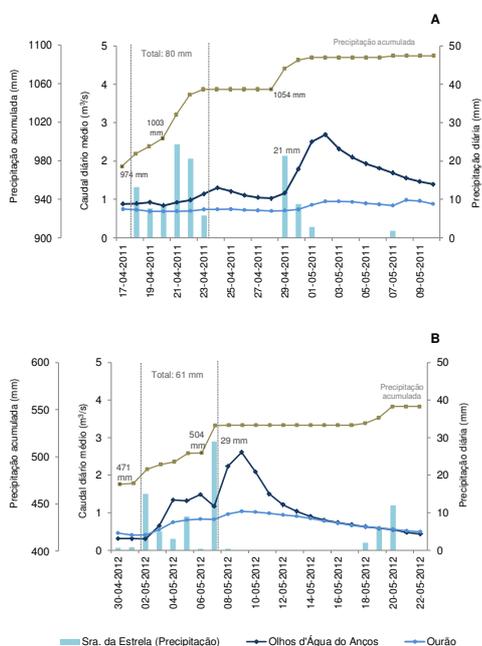


Figura II.IV.I.10 – Caudal diário médio (m³/s) nas exurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela no final de Abril e no mês de Maio – 2011 (A) e 2012 (B)

Assim, de notar que a resposta a uma sequência de dias com precipitação (6 dias, num total de 80 mm, com 2 dias a registarem mais de 20 mm) foi muito ténue, tendo o caudal aumentado apenas de 0,9 m³/s no dia 17/04 para 1,3 m³/s (valor diário máximo, no dia 24/04). Contudo, alguns dias depois (menos de 1 semana) um episódio de precipitação apenas (21 mm diários, concentrados em apenas 3 horas) foi o suficiente para provocar uma acentuada subida no caudal dos Olhos d'Água do Anços, que passou de 1,1 m³/s no

dia 29/04 para 1,8 m³/s no dia seguinte e 2,5 m³/s passados dois dias. Esta realidade, patente na Figura II.IV.1.10 A, reforça a teoria, já confirmada no terreno por vários autores (por exemplo Civita *et al.*, 1999 citado por Civita, 2008), de que o comportamento hidrodinâmico de um sistema cársico também é condicionado pelo estado de saturação das suas diferentes zonas, sendo comum um episódio tempestuoso, após um período particularmente chuvoso, conduzir a uma subida considerável do caudal.

(vi) **De Junho ao final de Setembro** (época de águas baixas e estiagem), o caudal das exsurgências é assegurado por água armazenada no interior do hidrossistema durante o período de recarga, ao mesmo tempo que a precipitação é muito escassa e, no caso da sua ocorrência, grande parte é perdida por evapotranspiração.

Nos anos analisados, a precipitação ocorrida neste período praticamente não teve repercussão no caudal dos Olhos d'Água do Anços, particularmente no caso de curtas sequências de dias com precipitação diária inferior a 20 mm. Constituem, no entanto, exceção alguns episódios isolados de precipitação intensa ocorridos ainda em Junho (Figura II.IV.1.11 A). Quantitativos semelhantes, ou até superiores, registados no mês de Setembro não exerceram influência no caudal (Figura II.IV.1.11 B). A forma linear do hidrograma dos Olhos d'Água do Anços em Setembro, mesmo após um dia de precipitação elevada (Figura II.IV.1.11 B), pode parecer fictícia (até pelo próprio processo de cálculo dos caudais mínimos nesta exsurgência) mas a observação no local, nos dois dias seguintes ao referido episódio pluvioso, confirmou a ausência de resposta do caudal a esse episódio.

Em síntese, os diferentes comportamentos do caudal dos Olhos d'Água do Anços e as suas múltiplas respostas à precipitação ao longo do ano hidrológico no período 2009/2010 – 2012/2013 podem resumir-se do seguinte modo:

(i) uma resposta rápida desta exsurgência (por norma 1 dia de diferença entre a ocorrência da precipitação e o início da subida pronunciada do caudal). Esta subida é tanto mais abrupta quanto mais intenso e abundante for o episódio pluvioso. Tal comportamento pode considerar-se como uma característica do hidrossistema de Degraçias-Sicó, uma vez que ocorreu em contextos hidrometeorológicos anuais e sazonais muito diferentes;

(ii) a primeira precipitação outonal, no mês de Outubro, ainda que abundante e por vezes intensa, quase não se repercute no caudal, o que se explica pela evapotranspiração, que ainda é considerável neste mês, e pela filtragem desses episódios pelo próprio hidrossistema;

(iii) em geral, episódios sucessivos de elevada precipitação (intercalados por um ou vários dias de escassa ou nula precipitação) originam subidas sucessivas no caudal. Este comportamento só não se verifica se tiverem ocorrido, previamente, entradas excepcionalmente elevadas de água, que mantêm o nível piezométrico bastante acima do exutório,

255

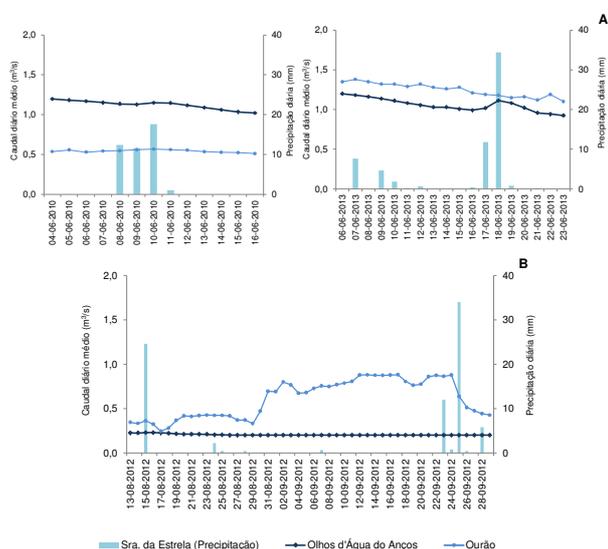


Figura II.IV.1.11 – Caudal diário médio (m³/s) nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão e precipitação diária na estação da Sra. da Estrela de Junho a final de Setembro – Junho de 2010 e 2013 (A); Agosto e Setembro de 2012 (B)

situação que é reforçada pela dimensão do próprio exutório, o que limitará a quantidade de água drenada, impedindo, por isso, que tais episódios de recarga se reflectam de imediato no caudal dos Olhos d'Água do Anços. Neste contexto, é comum a permanência de valores bastante elevados de caudal (muito próximos da ponta de cheia) durante mais de uma semana, mesmo que não ocorra precipitação;

(iv) descida quase sempre paulatina do caudal após um pico de caudal ou uma ponta de cheia (curva de decrescimento). No período de recessão (curva de decrescimento + curva de esgotamento), a diminuição é tanto mais demorada quanto menos intensa e mais persistente tiver sido a precipitação que originou esse máximo de caudal e maior tiver sido a quantidade de água que entrou e se acumulou no hidrossistema até ao início do período de

recessão. Constitui excepção ao carácter moroso da curva de decrescimento, descidas que se seguem a episódios pontuais de precipitação intensa muito abundante e subidas abruptas do caudal em situação de baixo caudal (inferior ou próximos de 1 m³/s).

Em conclusão, a partir das primeiras observações feitas sobre o hidrograma dos Olhos d'Água do Anços no período em estudo, percebe-se que o hidrossistema de Degracias-Sicó regista uma resposta rápida do caudal à precipitação (escoamento rápido) ao mesmo tempo que evidencia uma importante componente de escoamento diferido (suavidade da curva de decrescimento) e uma considerável capacidade de armazenamento (traduzido pelo carácter permanente desta exsurgência).

Se considerarmos a variação do caudal no exutório principal (Olhos d'Água do Anços) como o reflexo da hidrodinâmica interna do Maciço Cársico em resposta a um sinal de *input* (precipitação), constatamos que o hidrossistema em estudo apresenta um comportamento hidrodinâmico complexo e de carácter dual, com características praticamente opostas – resposta rápida (circulação rápida) e elevado efeito de filtro/capacidade de armazenamento. No conjunto do período em estudo, e perante cenários hidrometeorológicos contrastados, a forma do hidrograma reforçou esse comportamento duplo, ou seja: (i) respostas rápidas a episódios de recarga (sectores pontiagudos do hidrograma) indicando a existência de caminhos preferenciais na drenagem subterrânea na zona não-saturada, por onde a água circula com rapidez; (ii) uma grande capacidade de armazenamento, traduzida no carácter perene da exsurgência durante longos períodos sem recarga (mesmo em anos secos), o que indica a existência de uma zona saturada desenvolvida e com grande capacidade de armazenamento.

Estas constatações iniciais, extraídas da observação do hidrograma do caudal diário médio dos Olhos d'Água do Anços, constituem o ponto de partida para a análise que se segue (e que constitui o cerne do presente estudo), e na qual procuraremos, através de três abordagens metodológicas diferentes, aprofundar o conhecimento do funcionamento hidrodinâmico e de algumas características do próprio sistema cársico de Degracias-Sicó.

2. Análise de séries temporais (*time series analysis*)

2.1. Enquadramento teórico e questões metodológicas

A primeira abordagem no estudo dos hidrossistemas cársicos, principalmente daqueles em que a informação é muito escassa, deve residir em considerarmos estes hidrossistemas como uma caixa-negra (*black-box*), em que a circulação subterrânea é compreendida através da análise da água que entra no sistema ou *input* (precipitação, cursos de água que

257

se perdem nos sumidouros) e da água que sai ou *output* (caudal das surgências). O hidrossistema cársico é, deste modo, caracterizado pela sua resposta natural à entrada de água (Mangin, 1994).

A utilização de informação e de metodologias que permitam estimar a relação *input-output* a partir da análise do hidrograma das surgências constituem importantes ferramentas não só na compreensão do funcionamento hidrológico geral do sistema cársico, como também na identificação de características internas do sistema, que controlam esse mesmo funcionamento (por exemplo, grau de carsificação, dimensão das condutas subterrâneas, organização do sistema de drenagem interna do maciço). Este método (caixa-negra), inserido numa perspectiva funcional de estudo dos hidrossistemas cársicos, foi implementado por Mangin (1975) e aparece como sendo o método de utilização mais simples e o mais apropriado para essa finalidade (El-Hakim e Bakalowicz, 2007). Esta abordagem tem sido, aliás, largamente utilizada em vários estudos nas últimas décadas, dos quais se destacam (Mangin, 1975; Mangin, 1984; Pullido-Bosch *et al.*, 1995; Morales-Juberias *et al.*, 1996; Angelini, 1997; Marsaud, 1996; Larocque *et al.*, 1998; Labat *et al.*, 2000; Samani, 2001; Petric, 2002; Mathevet *et al.*, 2004; Rahmemaie *et al.*, 2005; Panagopoulos e Lambrakis, 2006; Jemcov e Petric, 2009; Kovacic, 2010).

A abordagem e a metodologia utilizadas neste estudo enquadram-se na perspectiva de análise dos hidrossistemas cársicos acima apresentada, o que se justifica pelo desconhecimento quer da estrutura interna, quer do comportamento hidrodinâmico do Maciço de Sicó, dada a inexistência de qualquer estudo aprofundado sobre o tema.

A opção pela aplicação da *análise de séries temporais* justifica-se, tal como explicámos anteriormente, pelo facto de existir pouca informação espeleológica disponível, o que faz com que o interior deste maciço cársico seja relativamente desconhecido. Os estudos que contemplem aspectos da hidrodinâmica deste maciço são muito escassos (Cunha, 1986; Carreira, 1986; Rebelo, 1987), tal como os dados relativos ao caudal e às características físico-químicas da água das exsurgências, o que constitui, por si só, uma excelente fonte de informação e um método bastante fidedigno no conhecimento da dinâmica hidrológica nos hidrossistemas cársicos (Crispim, 1995). Por outro lado, esta escolha apoia-se na vasta bibliografia internacional onde se prova, mediante o estudo de numerosas surgências, principalmente na Europa, que esta metodologia é particularmente útil no estudo dos hidrossistemas cársicos, dada a facilidade na recolha de dados e o facto de trazer importantes e fiáveis informações no estudo destes meios à escala regional (Larocque *et al.*, 1998; Labat *et al.*, 2000; Kovacic, 2010).

As análises correlatória e espectral (que compõem este método) inscrevem-se, pois, numa perspectiva de análise funcional dos hidrossistemas cársicos e baseiam-se numa aproximação que relaciona o *output* com o *input* do sistema através de um conjunto de

funções estatísticas. Neste método, o hidrossistema cársico é estudado a partir do hidrograma de uma ou várias surgências, o qual, ao mostrar a variação do caudal, reflecte o sinal de *input* e as alterações por ele sofridas ao atravessar o sistema cársico.

O hidrossistema é, assim, entendido como um filtro que transforma o sinal de entrada num sinal de saída, sendo que as características dessa transformação constituem uma preciosa fonte de informação acerca da circulação hipogea do maciço e, conseqüentemente, da sua própria estrutura interna. Apresentando-se como um método de grande simplicidade, que utiliza apenas os dados dos caudais e da precipitação, a *análise de séries temporais* fornece, no entanto, valiosas informações acerca da hidrodinâmica cársica, como sejam a diferença temporal (atraso) entre o *input* e o *output*, a variabilidade espacial e temporal da recarga e da descarga, os diferentes tipos de recarga, o modo e a velocidade de circulação da água e a existência, ou não, de retenção temporária e de armazenamento subterrâneos.

A aplicação deste método às duas principais exurgências do bordo oeste do Maciço de Sicó (Olhos d'Água do Anços e Ourão⁷) mais do que salienta as diferenças entre o regime de caudais e, conseqüentemente, inferir as características físicas da bacia de drenagem de cada uma delas, possibilitou um primeiro conhecimento sobre a hidrodinâmica do Maciço, amplamente desconhecida até agora. Apenas Cunha (1986) no seu trabalho sobre as serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere esboçou um esquema de circulação hipogea deste Maciço, que apelidou de "provisório", dada a inexistência de informação que lhe permitisse aprofundar a análise (ver Figura 1.11.1.2). Esse esquema constituiu a base do presente trabalho, designadamente na instalação dos aparelhos de registo de dados climatológicos (pluviómetros digitais) na área de recarga e de dados hidrométricos (sondas de nível) nos dois principais exutórios do bordo oeste.

Este ponto do trabalho foca-se na análise estatística (univariada e bivariada) das séries de dados diários do caudal de duas exurgências (Olhos d'Água do Anços e Ourão) e da precipitação diária registada na área de recarga do hidrossistema ao longo de 4 anos hidrológicos (2009/2010 – 2012/2013), num total de 1459 dias. Os valores de *input* utilizados referem-se ao total de precipitação acumulada num dia, sem se retirar o valor da evapotranspiração real, à semelhança do que foi feito por Pulido-Bosch *et al.* (1987) para as surgências de El Torcal e Simat (sudeste de Espanha) e por vários outros autores ao longo

⁷ A exurgência do Ourão, apesar de estar representada nos gráficos que mostram os resultados obtidos, apenas será considerada na análise univariada e na correlação cruzada, uma vez que as outras funções da análise espectral reflectem em demasia a forma lagunar da exurgência, comprometendo o estudo da relação *input-output*. Isto porque os resultados não reflectem a estrutura de drenagem interna do Maciço, mas antes da forma da exurgência, dado os caudais estarem 'regularizados' na medição à saída da exurgência, amortecendo os picos de caudal e aumentando os caudais mínimos. No entanto, decidimos manter a sua representação, já que permite confirmar os resultados e a tendência revelados pela análise da série de caudal dos Olhos d'Água do Anços no estudo da hidrodinâmica subterrânea do Maciço de Sicó.

das últimas décadas, tal como escreve Petric (2002). Esta autora tem, aliás, comparado as diferenças entre a utilização da precipitação total e da infiltração efectiva (Petric, 2002; Jemcov e Petric, 2009), e concluiu que podem existir algumas diferenças quantitativas, mas que, comparativamente a outros factores que influenciam a relação *input-output*, essa diferença é negligenciável nesta escala de análise (o hidrossistema no seu todo).

A análise univariada permite conhecer a estrutura individual de uma série de dados no domínio do 'tempo' (autocorrelação) e no domínio da 'frequência' (densidade espectral). A análise bivariada caracteriza a transformação de um sinal de *input* num sinal de *output* e configura o melhor método quando estamos perante uma forte relação entre duas séries, neste caso as séries da precipitação/recarga e do caudal. A análise da correlação cruzada (*cross-correlation*) é executada no domínio temporal e as funções *cross-amplitude*, *phase*, *coherence* e *gain*⁸ no domínio das frequências.

No que se refere ao processo de cálculo, utilizámos o programa de análise estatística IBM SPSS Statistics 21, pela rapidez nos cálculos e pela simplicidade do seu manuseamento. Em seguida, apresentar-se-á uma descrição muito breve dos fundamentos teóricos e das expressões matemáticas utilizadas na análise correlatória e espectral de forma a facilitar a compreensão dos resultados obtidos. Trata-se apenas de uma pequena síntese do processo de cálculo de cada uma das funções utilizadas, que entendemos ser suficiente dado o enquadramento disciplinar e científico do presente trabalho.

Por isso, mais do que apresentar as teorizações matemáticas de base interessou-nos a sua aplicação específica à hidrologia cársica, mediante a interpretação dos resultados no domínio da hidrodinâmica cársica e, por conseguinte, na procura de conhecimento sobre as características físicas dos próprios sistemas cársicos, à semelhança de inúmeros estudos empreendidos em hidrossistemas cársicos europeus (por exemplo, Mangin, 1984; Angelini, 1997; Laroque *et al.*, 1998; Mathevet *et al.*, 2004; Panagopoulos e Lambrakis, 2006; Jemcov e Petric, 2009; Fiorillo e Doglioni, 2010; Kovacic, 2010). Explicações mais detalhadas sobre os fundamentos teóricos e matemáticos podem encontrar-se em trabalhos como Mangin (1984), Box *et al.* (1994), Padilla e Pulido-Bosch (1995), Laroque *et al.* (1998).

2.1.1. Análise univariada

A **autocorrelação** (r_k) quantifica a dependência linear entre valores sucessivos durante um determinado período. Quanto mais um acontecimento, num dado instante, tiver uma

⁸ Decidimos manter em inglês uma grande parte da terminologia específica da análise estatística e da respectiva aplicação à hidrologia, facto que se justifica pela universalidade deste idioma, por facilitar ao leitor a comparação com os estudos referidos no texto e pela dificuldade de tradução de funções e conceitos nucleares da *análise de séries temporais* para português.

influência a longo prazo, mais lento será o decréscimo da autocorrelação, traduzindo um maior 'efeito de memória'⁹ do sistema.

O hidrograma é transformado numa série temporal com n termos (x_1, \dots, x_n) para os quais se calcula m coeficientes de autocorrelação (r_1, \dots, r_m). O valor de m (*truncation point*) a adoptar deve ser $m = n/3$ (Mangin, 1994) ou $m = n/2$ (Box e Jenkins, 1974), embora possam ser utilizados outros valores, como por exemplo, $m = 2n/3$ (Einenlohr *et al.*, 1997). Os coeficientes de autocorrelação são obtidos através da seguinte fórmula:

$$r_k = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

em que \bar{x} é a média aritmética dos valores de x_i ; k é o atraso temporal (em horas ou dias) e varia de 0 a m ; r é o valor do coeficiente. t_0 (início do cálculo) tem sido sistematicamente identificado com o início de ciclo hidrológico (ano hidrológico) ou de uma cheia e o final coincidente sempre com o final da recessão.

Os valores e a forma do correlograma (representação gráfica dos valores de r_k) fornecem, indirectamente, informação sobre a 'memória do sistema', o grau de carsificação¹⁰ do hidrossistema e sobre a sua capacidade de armazenamento (Mangin, 1994, Padilla e Pulido-Bosch, 1995). Essa informação é obtida a partir do número de dias (ou horas) que o correlograma leva a atingir um valor igual ou inferior ao nível de significância ($r_k = 0,2$).

O lento decréscimo da autocorrelação é sinónimo de uma resposta muito bem estruturada, que está associada a uma elevada memória do sistema, revelando, de acordo com numerosos autores, um sistema: (i) em que a drenagem subterrânea se processa lentamente; (ii) pouco carsificado, com grandes reservas subterrâneas ou então um sistema bastante carsificado mas com uma rede de drenagem subterrânea pouco funcional. Contrariamente, a rápida descida do correlograma (resposta quase aleatória) corresponde a um sistema com baixa memória, característica de um sistema com carsificação bem desenvolvida, com largas condutas e com poucas reservas subterrâneas, ou seja, um sistema bastante carsificado com uma estrutura interna bem drenante (Mangin, 1994).

A **densidade espectral** (*spectral density function, S(f)*), é uma função complementar à autocorrelação e corresponde à mudança do modo 'tempo' para o domínio da 'frequência' através da aplicação da transformada de Fourier aos valores de autocorrelação (Mangin,

⁹ 'Efeito de memória' é o tempo que decorre até que o caudal deixe de estar autocorrelacionado.

¹⁰ Ver nota de rodapé 3 (Parte I, Capítulo I) acerca do significado geomorfológico e hidrológico do grau de carsificação de um hidrossistema ('bastante/muito/extremamente carsificado' ou 'pouco carsificado').

1994; Larocque *et al.*, 1998; Gárfias-Soliz *et al.*, 2010). A identificação dos fenómenos em relação às frequências complementa a interpretação dos valores de autocorrelação para além de que, como sublinha Mangin (1984) a decomposição da variância é, por vezes, mais explícita que a avaliação da dependência dos valores de uma série entre si (autocorrelação).

A interpretação da densidade espectral, mediante a identificação de diferentes picos (representativos de fenómenos periódicos), conduz à caracterização do hidrossistema. Assim, elevados valores de densidade em baixas frequências são interpretados como indicadores de um sistema com grande inércia e um notável efeito de regulação. O modo de cálculo é o seguinte:

$$S(f) = 2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m D(k)r(k) \cos(2\pi f k) \right]$$

$$D(k) = \frac{\left(1 + \cos \pi \frac{k}{m} \right)}{2}$$

em que: $f = j/2m$ ($j = 1$ em m), sendo f a frequência e $D(k)$ uma janela que assegura que os valores de $S(f)$ não são distorcidos (filtragem através da janela espectral de Tukey). Após várias experiências em hidrologia cársica, Mangin (1984) concluiu que esta janela de filtragem era preferível por ser um bom compromisso entre a suavização do espectro e uma grande largura de banda utilizável, ou seja, filtrar muito menos, perdendo-se, por isso, menos informação.

Os resultados variam entre 0 e 1. Quando elevados valores de densidade se situam próximo da frequência zero é indicada nitidamente a existência de uma tendência e cada pico do periodograma (representação gráfica) encerra um fenómeno periódico, cuja interpretação conduz à caracterização do comportamento do hidrossistema. A intensidade do espectro pode ser negligenciável nas altas frequências, indicando a falta de informação utilizável nessas classes. A frequência onde esta condição surge é denominada de 'frequência de corte' (*cut-off frequency*) e quanto menor for esse valor (mais próximo de zero) mais inerte é o sistema.

A análise que pode ser elaborada com base na autocorrelação e na densidade espectral é uma análise simples, ou seja, parte-se do princípio que a série temporal é a resposta do sistema a uma função aleatória de entrada (*white noise*). Em razão desta simplificação, essa análise conduz somente à identificação e descrição de componentes da série temporal (tendência, periodicidade e aleatoriedade).

2.1.2. Análise bivariada

Na análise bivariada ou cruzada, a série temporal de *output*, y_t , é considerada como a resposta do sistema a uma série temporal de entrada, x_t , numa relação causal.

A **correlação cruzada** (*cross-correlation function*, $r_{xy}(k)$) estabelece a relação *input-output* num sistema. Se o *input* é considerado como aleatório (caso da precipitação), o correlograma cruzado (representação gráfica dos valores de correlação cruzada) corresponde ao *impulso de resposta* (*impulse response*) do sistema, o que permite, assim, a caracterização dos hidrossistemas cársicos (Mangin, 1994; Larocque *et al.*, 1998).

A correlação cruzada não é simétrica [$r_{xy}(k) \neq r_{yx}(k)$]. Se $r_{xy}(k) > 0$ para $k > 0$, o *input* influencia o *output* enquanto que se $r_{xy}(k) > 0$ para $k < 0$, o *output* influencia o *input*. Na aplicação da correlação cruzada à hidrologia cársica, esta última premissa teórica é interpretada como a transformação do sinal de *input* pelo sistema cársico. O atraso, considerado como o tempo que o sistema leva a responder, é o intervalo de tempo entre $k = 0$ e o valor máximo de $r_{xy}(k)$. Por norma, quanto menor for o atraso, mais rápida é a chegada da água de recarga ao exutório.

Assim, para $k > 0$:

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y}$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y})$$

sendo $C_{xy}(k)$ a correlação cruzada e σ_x e σ_y o desvio-padrão da série temporal.

Na aplicação à hidrogeologia cársica, considera-se que a correlação cruzada entre o sinal de *input* (recarga) e o sinal de *output* (caudal das surgências) fornece uma ideia muito clara acerca da resposta do hidrossistema cársico a um impulso. A transformação do sinal de *input* em sinal de *output* depende da estrutura interna do hidrossistema cársico, que funciona como um filtro, pelo que a correlação cruzada constitui, por isso, uma excelente ferramenta no estudo destes hidrossistemas, entendidos como uma 'caixa-negra'.

Em termos de interpretação, considera-se que o atraso (k) fornece uma estimativa do tempo que uma partícula leva a atravessar o hidrossistema, o que mostra a velocidade de circulação subterrânea, o que poderá indicar o grau de carsificação do hidrossistema (Panagopoulos e Lambrakis, 2006). Por conseguinte, os resultados obtidos nesta análise permitem a classificação dos hidrossistemas cársicos em dois grupos com características muito diferentes: (i) os que representam o estado inicial de um hidrossistema pouco carsificado, com circulação hipogea lenta e importante capacidade de armazenamento, que filtra

263

e modifica substancialmente o sinal de *input*. A descida do gráfico ($k > 0$) é lenta, revelando impulsos de resposta que se estendem por vários meses; (ii) os que representam o estado final de evolução de um hidrossistema – elevada carsificação, rede de drenagem hipogea bem organizada (que promove a circulação rápida da água infiltrada) e baixa capacidade de armazenamento. Este tipo de hidrossistemas cársicos caracteriza-se por atrasos de algumas horas a poucos dias, um ténue controlo sobre o *input* e curta duração do impulso de resposta.

A **densidade espectral cruzada** ou **amplitude cruzada** (*cross-spectral density function* / *cross-amplitude*, $S_{xy}(f)$), à semelhança do que ocorre na análise univariada, corresponde à mudança do modo 'tempo' para o domínio da 'frequência' através da aplicação da transformada de Fourier, neste caso, aos valores de correlação cruzada. Contrariamente à análise simples (univariada), a correlação cruzada não é simétrica e, por isso, a densidade espectral cruzada pode ser expressa como uma função do *cosppectrum* (função real, $h_{xy}(f)$) e da *quadrature spectrum* (função imaginária, $\lambda_{xy}(f)$), definidas respectivamente, da seguinte forma:

$$S_{xy}(f) = h_{xy}(f) - i\lambda_{xy}(f)$$

$$h_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_1^m (r_{xy}(k) + r_{yx}(k)) D(k) \cos(2\pi fk) \right]$$

$$\lambda_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_1^m (r_{xy}(k) + r_{yx}(k)) D(k) \sin(2\pi fk) \right]$$

No que se refere à sua aplicação no estudo de hidrossistemas cársicos, a densidade espectral cruzada pode ser associada à duração do impulso de resposta e indica a filtragem de componentes temporais do *input*. Assim, hidrossistemas cársicos pouco desenvolvidos podem ser considerados poderosos filtros que atenuam principalmente sinais de *input* de curta duração (elevadas frequências) em detrimento dos sinais de longa duração (por exemplo variações sazonais) que são claramente realçados (baixas frequências).

Deste modo, a existência de um grande pico em frequências muito baixas indica claramente a existência de um ciclo anual, dado que os *inputs* de curta duração são bem filtrados (ou seja, muito atenuados) pelo sistema cársico, não se notando a sua influência no caudal das surgências, no qual predomina claramente o escoamento de base.

Em contrapartida, os hidrossistemas cársicos com uma rede de drenagem endocársica bastante desenvolvida e bem organizada comportam-se como um filtro ténue, com um fraco efeito de regulação, já que os sinais de *input* (principalmente os de curta duração) são claramente detectados no caudal das surgências. Apresentam valores elevados nas baixas

frequências, mas que, ao contrário do anterior, decresce lentamente nas médias e altas frequências, nunca atingindo o zero, o que evidencia um sistema cársico hidrogeologicamente bem desenvolvido, com o predomínio do escoamento rápido e um efeito de regulação relativamente fraco (Jemcov e Petric, 2009).

O espectro cruzado, em coordenadas polares, pode também ser expresso como uma função da amplitude $|S_{xy}(f)|$ e da fase (*phase function*, $\Theta_{xy}(f)$):

$$S_{xy}(f) = |S_{xy}(f)|e^{-i\theta_{xy}(f)}$$

A função *amplitude* identifica o modo como o sinal de *input* é modificado pelo sistema. No domínio 'frequência' representa a covariância *input-output*. Esta função é muito importante, uma vez que todas as outras funções (descritas em seguida) são interpretadas em relação a esta. Esta função nunca pode ter o valor zero porque as propriedades da transferência *input-output* são analisadas unicamente quando se verifica transferência. É expressa do seguinte modo:

$$|S_{xy}(f)| = \sqrt{h_{xy}^2(f) + \lambda_{xy}^2(f)}$$

A *phase function*, indica o intervalo entre o *input* e o *output* e pode expressar-se também no domínio 'tempo', obtendo-se da seguinte forma:

$$\theta_{xy}(f) = \arctan \frac{\lambda_{xy}(f)}{h_{xy}(f)} \quad \tau = \frac{\theta_{xy}(f)}{2\pi f}$$

A *coherence function*, $CO_{xy}(f)$ mostra a linearidade da relação *input-output*, ou seja, se uma variação na função de *input* gera uma alteração proporcional na função de *output*. Se esta situação se verificar, estamos perante um sistema com grande linearidade, característica de hidrossistemas muito carsificados, nos quais uma intensa precipitação origina uma forte subida do caudal das surgências num curto período de tempo (Panagopoulos e Lambrakis, 2006). Depende das funções densidade espectral e densidade espectral cruzada e escreve-se da seguinte forma:

$$CO_{xy}(f) = \frac{S_{xy}(f)}{\sqrt{S_x(f)S_y(f)}}$$

A aplicação desta função em diferentes pontos do hidrossistema fornece informação valiosa, ainda que qualitativa, sobre a variabilidade espacial da carsificação e a extensão de determinados comportamentos hidrodinâmicos de um sistema cársico (Larocque *et al.*, 1998), tal como ficou provado no trabalho de Kovacic (2010) relativo a sectores bastante

265

diferenciados no mesmo hidrossistema. Esta função varia entre 0 (totalmente não-linear) e 1 (completamente linear).

2.2. A relação *input-output* através da análise das séries da precipitação e do caudal. Resultados e discussão

Num hidrossistema cársico assume-se que o hidrograma de uma surgência fornece uma representação integrada e estruturada dos locais de armazenamento e da rede de canais, que encaminha a água até ao ponto de saída, constituindo, por isso, uma poderosa ferramenta no conhecimento da dinâmica hidrogeológica e das propriedades internas destes meios extremamente heterogêneos.

Foi, partindo desta ideia-base, que procedemos ao cálculo das funções acima descritas utilizando os dados diários dos quatro anos hidrológicos em estudo (1459 dias), relativos à precipitação ocorrida na área de recarga (estação udográfica da Sra. da Estrela) e ao caudal das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão, embora, neste último caso, com as limitações já referidas.

No início do processo de cálculo na análise correlacional e espectral é fundamental definir-se o valor de *m* (*truncation point*) porque é este que determina a janela de observação (intervalo temporal para o qual a análise é executada). Segundo Mangin (1994) o valor de *m* tem de ser sempre inferior a $n/2$ (*n* é a dimensão total da série). No entanto, por uma questão de processamento e manuseamento dos dados, após vários ensaios, o autor afirma ser preferível que *m* seja inferior a $n/3$.

No presente estudo procedemos também a várias tentativas empíricas de definição de *m* (sempre inferior a $n/3$), sem que houvesse qualquer alteração de resultados, apenas em casos de *m* baixo (por exemplo de 100 dias na série total, valor muito utilizado na literatura da especialidade), r_k não atingia o valor zero. Situação que se explica pelo funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico em estudo, imposto pelas suas próprias características, como se verá em seguida. Por isso, adoptámos o valor de $m \leq n/3$ para a análise do total da série (1459 dias / 3 = 486 dias, pelo que utilizamos o valor final de 450 dias), para o ano hidrológico (364 dias / 3 = 120 dias) e para a estação chuvosa (Novembro a Março) de cada ano (151 dias / 3 = 50 dias).

2.2.1. Análise univariada

A *autocorrelação* dos valores diários de precipitação da estação da Senhora da Estrela apresenta um decréscimo muito rápido, atingindo o nível de confiança ($r_k = 0,2$) quase de imediato ($k = 2$ dias), tornando-se nula aos 9 dias, oscilando, a partir daí, em torno de

$r_k = 0,0$, podendo, por isso, considerar-se como uma função praticamente aleatória (*white noise*) – Figura II.IV.II.1 A.

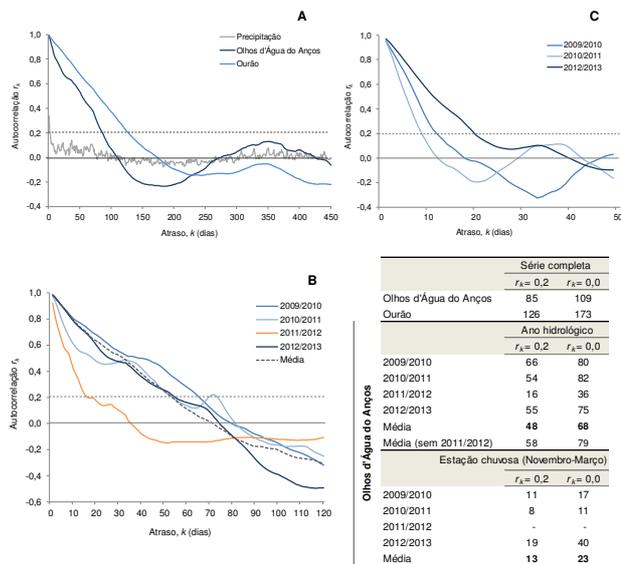


Figura II.IV.II.1 – Autocorrelação (r_k) das séries de caudal diário médio das exurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão para o total da série, $n = 1459$ dias (A); dos Olhos d'Água do Anços para cada ano hidrológico (B) e para a estação chuvosa – Novembro a Março (C) e tabela-resumo; $m = n/3$, $k = 1$

A análise do conjunto da série da precipitação revelou, porém, a presença de um ciclo anual (ainda que ténue), visível nos valores de r_k que voltam a ser positivos (embora muito baixos – r_k máximo de 0,08) quando k se situa entre 340 e 372 dias e que se explica pelo carácter anual de períodos com determinadas características pluviométricas (estação mais chuvosa e estação mais seca, por exemplo).

267

No que se refere ao caudal das exurgências, o decréscimo da autocorrelação é muito lento, atingindo o valor de $r_k = 0,2$ nos Olhos d'Água do Anços aos **85 dias** e de $r_k = 0,0$ aos 109 dias (Figura II.IV.II.1 A). No caso da exurgência do Ourão, esses valores são bastante superiores, confirmando a tendência apresentada pelo correlograma dos Olhos d'Água do Anços, mas reflectindo nitidamente o efeito do represamento da água na exurgência.

A observação mais pormenorizada do decréscimo da autocorrelação no período 2009/2010-2012/2013 na exurgência dos Olhos d'Água do Anços revela-nos a presença de várias fases no funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico em estudo, expressas pelos diferentes declives no correlograma, podendo distinguir-se duas fases principais ou, de modo ainda mais detalhado, até mesmo três fases (Figura II.IV.II.1 A e B). A parte inicial caracteriza-se por uma descida um pouco mais acentuada (até $k = 24$ dias), a segunda fase marca uma descida mais lenta e situa-se entre os 39 dias e os 68 dias e, finalmente, uma terceira e última fase a partir dos 68 dias até aos 109 dias, quando $r_k = 0,0$. É comum, na literatura da especialidade estas duas últimas fases aparecerem reunidas numa só fase.

A interpretação para a forma multifásica do correlograma desta exurgência é a de que o hidrossistema por ela drenado apresenta um funcionamento hidrodinâmico multimodal, com diferentes tipos de drenagem no seu interior, que podem ocorrer em simultâneo ou funcionar sequencialmente em diferentes momentos do ano hidrológico e que são variáveis consoante as características dos episódios de precipitação (duração e intensidade), numa relação *input-output* bastante complexa e muito pouco linear.

A primeira descida, mais acentuada, representa uma 'memória curta do hidrossistema' (autocorrelação mais forte, até um máximo de 24 dias), o que corresponderá a uma drenagem mais rápida ao longo da zona não-saturada, parecendo confirmar a existência de uma importante componente de escoamento rápido no caudal da exurgência, já globalmente identificada na observação inicial do hidrograma. A presença de escoamento rápido no caudal dos Olhos d'Água do Anços revela, necessariamente, a existência de uma rede estruturada de canais preferenciais de escoamento na zona não-saturada (condutas e fracturas alargadas por dissolução), nos quais a circulação se faz de modo célere.

A segunda descida, mais lenta, com uma maior duração (até 68 dias) traduz a existência de uma 'memória mais duradoura do hidrossistema', o que significa que um episódio de recarga tem um efeito prolongado no caudal da exurgência, o que revela uma considerável capacidade de retenção temporária do hidrossistema e uma circulação mais lenta. Esta fase de decréscimo do correlograma corresponderá a uma fase intermédia no processo de drenagem do hidrossistema, em que o caudal dos Olhos d'Água do Anços é uma mistura de escoamento diferido com escoamento de base, ou seja, em que ainda se detecta escoamento diferido, mas já começa a prevalecer o escoamento de base. O terceiro momento de

descida no correlograma, com um atraso superior a 68 dias até ao momento em que deixa de haver autocorrelação ($k = 109$ dias) representa o esvaziamento lento da água armazenada no hidrossistema e, conseqüentemente, o predomínio absoluto do escoamento de base no caudal dos Olhos d'Água do Anços.

Estas duas últimas fases identificadas no correlograma estarão relacionadas com:

(i) existência de importantes sectores, no interior do hidrossistema, com capacidade de armazenamento mas baixa condutividade hidráulica (matriz da rocha, fissuras e pequenas fracturas), que só depois de os canais de drenagem preferencial estarem vazios cedem a água, de forma gradual; (ii) existência de uma rede de drenagem na zona não-saturada pouco estruturada (e, portanto, pouco funcional) ou cujos canais são demasiadamente estreitos, impondo uma circulação bastante mais lenta; (iii) existência de grandes reservas na zona saturada.

O comportamento multimodal do correlograma (e em particular o comportamento bimodal, indicativo da dualidade do hidrossistema) aparece documentado em vários trabalhos sobre hidrossistemas cársicos na Europa (por exemplo Antigüedad Auzmendi, 1988 – País Basco; Sauter, 1992 – sul da Alemanha; Panagopoulos e Lambrakis, 2006 – Grécia; Jemcov e Petric, 2009 – Eslovénia e Sérvia).

. Parte inicial (ou primeira parte) do correlograma

No intuito de compreender um pouco melhor a primeira parte do correlograma (descida mais acentuada), procedemos a uma análise mais pormenorizada, através do cálculo da autocorrelação na série de caudal dos Olhos d'Água do Anços apenas na estação chuvosa (Novembro a Março) nos anos em análise, exceptuando 2011/2012, pela seca invernal que o caracterizou – Figura II.IV.II.1C. Tratando-se da época do ano com mais precipitação e maior volume de recarga, o modo como essa água atravessa o hidrossistema (visível através dos valores de k , em dias) poderá mostrar, mais nitidamente, algumas características hidrodinâmicas importantes do sistema cársico em estudo.

A Figura II.IV.II.1C mostra, claramente, a descida relativamente rápida da autocorrelação até $r_k = 0,2$ ($k = 11$ dias em 2009/2010; 8 dias em 2010/2011 e 19 dias em 2012/2013 – $k_{\text{médio}} = 13$ dias), confirmando a existência de uma considerável componente de escoamento rápido no caudal dos Olhos d'Água do Anços. Significa isto que parte da água infiltrada percorre o hidrossistema em estudo com relativa facilidade desde a área de recarga até às exurgências da bordadura oeste (desnível vertical de cerca de 300 metros). Esta 'curta memória' do hidrossistema sugere a existência, ao longo da zona não-saturada, de canais de drenagem com elevada condutividade hidráulica, por onde a circulação se faz de forma mais rápida, auxiliada pelo maior gradiente hidráulico nesta época do ano. O valor elevado de k em 2012/2013 estará relacionado com as situações ocorridas em Janeiro e

269

Março de 2013, onde a excepcional recarga e a limitação imposta pelas estruturas drenantes junto às saídas desta exurgência, foram responsáveis pela manutenção, por mais de uma semana, de caudais próximos dos valores de pico de cheia (situação documentada pelo hidrograma) não invalidando, por isso, a presunção da existência da referida rede de canais com maior transmissividade na zona não-saturada.

O desaparecimento completo da autocorrelação nesta época do ano ($r_k = 0,0$) ocorre, em média, apenas ao fim de 23 dias (17 dias em 2009/2010, 11 dias em 2010/2011 e 40 dias em 2012/2013), o que indica que a influência da água recém-infiltrada no caudal dos Olhos d'Água do Anços não se esgota em poucos dias (escoamento rápido), podendo permanecer por várias semanas, o que confirma a presença efectiva de uma componente de escoamento diferido, já detectada no hidrograma mediante a suavidade da curva de decrescimento. Trata-se de água proveniente de um episódio de recarga, que chega à exurgência com algum tempo de atraso relativamente ao escoamento rápido, e que vai contribuir, após a ponta de cheia, para a manutenção do caudal em valores elevados ainda por algum tempo.

Trata-se, pois, de um primeiro momento no processo de filtragem e atenuação operado pelo hidrossistema sobre a recarga (e que constataremos ao longo da análise espectral). A consequência dessa primeira fase de filtragem é uma circulação mais lenta do que aquela que alimenta o caudal dos Olhos d'Água do Anços no pós-evento pluvioso (escoamento rápido), mas bastante mais rápida do que aquela que vai assegurar grande parte do caudal, através do lento esvaziamento do hidrossistema (escoamento de base), visível pelo elevado 'efeito de memória' que o caracteriza.

O comportamento multimodal do correlograma, detectável no conjunto da série, é perfeitamente visível no correlograma de cada ano hidrológico estudado (Figura II.IV.II.1B), sendo particularmente vincado nos anos de 2010/2011 e 2011/2012. O aparecimento de alguns troços horizontais nos correlogramas (alteração brusca do declive com estagnação temporária dos valores de r_k à medida que aumenta o valor de k) é próprio de um sistema cársico particularmente complexo (Antigüedad Auzmendi, 1988).

A descida mais abrupta do primeiro sector do correlograma nestes dois anos, e em especial no ano seco de 2011/2012 estará relacionado com a intensidade dos episódios de precipitação e, principalmente, com o estado hídrico do hidrossistema que antecede o momento da ocorrência desses episódios. Esta última realidade é deveras importante, dado que a velocidade de circulação nos canais preferenciais de drenagem (elevada condutivi-

dade hidráulica) na zona não-saturada é muito superior em condições de estiagem/águas baixas do que em águas altas¹¹.

Assim, em 2011/2012, ano muito seco, a precipitação concentrou-se basicamente em dois momentos do ano – início do ano hidrológico e Abril/Maio (após vários meses inverniais praticamente sem precipitação) – o que significa que a rede de canais de circulação rápida na zona não-saturada estava vazia, permitindo uma maior velocidade de circulação da água. Em 2010/2011, a descida mais acentuada da parte inicial do correlograma pode ser explicada pela ocorrência, logo no início do ano hidrológico (mês de Outubro), de uma elevada quantidade de episódios de precipitação intensa (6 dias com precipitação superior a 20 mm, registados em apenas duas sequências). A ocorrência de episódios intensos foi frequente ao longo deste ano hidrológico, em particular a seguir a períodos praticamente sem precipitação, favorecendo, assim, a circulação rápida.

Nos anos de 2009/2010 e 2012/2013, essa diferença no declive do correlograma foi muito mais esbatida, com uma descida mais suave (em especial em 2012/2013), o que se justifica pela elevada precipitação ocorrida (de carácter predominantemente persistente) e pelo facto da generalidade dos episódios de maior intensidade ter ocorrido já durante os meses de Inverno, num contexto de muito maior quantidade de água no interior do hidrossistema.

A descida mais acentuada da parte inicial do correlograma, detectada no conjunto do período em análise e nítida em todos os anos hidrológicos, constitui, portanto, um comportamento característico do hidrossistema em estudo, uma vez que ocorre em anos com características hidrometeorológicas muito contrastadas. Conclui-se, assim, que a drenagem relativamente rápida de parte da água de recarga (máximo de 24 dias) é uma característica hidrodinâmica do sistema cársico de Degracias-Sicó e, consequentemente, que a presença de uma importante componente de escoamento rápido e de escoamento diferido no caudal da exurgência dos Olhos d'Água do Anços é inegável.

. Parte final (ou segunda parte) do correlograma

Outra característica hidrodinâmica deste sistema cársico, dedutível da segunda parte do correlograma, é a sua 'elevada memória' ($k = 85$ dias quando $r_k = 0,2$; $k = 109$ dias para $r_k = 0,0$) mostrando, por um lado, uma enorme capacidade de armazenamento, com a existência de importantes reservas para escoamento de base e, por outro lado, o carácter lento como

¹¹ Perrin (2003), por exemplo, refere, relativamente ao hidrossistema de Milandre (sul da Alemanha), que traçagens demonstraram que a velocidade de circulação nos canais preferenciais de escoamento na zona não-saturada era de 100 m/h numa situação de recarga abundante em período de estiagem e de 50 m/h em situação de recarga idêntica durante o período de águas altas. Do mesmo modo, o trabalho empreendido por Doerflinger *et al.* (2004), com base em dados horários, concluíram que é no início do ciclo hidrológico que a capacidade de transmissão do sistema cársico é máxima.

se processa o esvaziamento do hidrossistema. O valor de k para $r_k = 0,2$ não é muito diferente dos valores calculados para outros hidrossistemas cársicos com litologias e condições climáticas próximas das da área em estudo. Veja-se, por exemplo, Angelini (1997) que apresenta atrasos de 89 e 101 dias respectivamente para Scirca e Bagnara (Itália); Larocque *et al.* (1998) mostram atrasos de 76 e 73 dias para Leche e Folpougne (França), respectivamente; Mangin (1994) apresenta valores de 70 dias para El Torcal (Espanha) e Gárfias-Soliz *et al.* (2010) atrasos que oscilam entre os 70 e os 110 dias (vários hidrossistemas no País Basco) – Quadro II.IV.II.I.

Os autores são unânimes em afirmar que se trata de hidrossistemas com grande capacidade de armazenamento (cujo esvaziamento se processa durante longos períodos), elevado 'efeito de memória' e onde predomina claramente o escoamento de base. Tratar-se-á, ainda segundo os autores, de sistemas: (i) pouco carsificados¹²; (ii) carsificados, mas com uma rede de drenagem subterrânea pouco funcional; (iii) com uma rede de drenagem composta maioritariamente por pequenas fracturas e fissuras, onde a circulação se processa de modo lento.

A autocorrelação da série de caudais diários de ambas as exurgências (1459 dias) mostra a existência de um ciclo anual bem definido (os valores de r_k voltam a ser positivos – superiores a 0,1 – quando $k = 320$ a 370 dias), o que se entende dada a periodicidade anual dos vários contextos hidrológicos (águas altas, águas baixas e estiagem, por exemplo).

Este mesmo ciclo anual foi já detectado na precipitação, mas com pouco significado (valores de r_k muito baixos, bastante inferiores aos do correlograma dos Olhos d'Água do Anços), o que revela que não é só a precipitação que comanda a hidrodinâmica do sistema cársico em estudo. Como admite Mangin (1984), a partir das suas próprias experiências, quando os ciclos anuais visíveis na autocorrelação do caudal não podem ser directa e totalmente imputados à precipitação, têm de ser entendidos como uma função dos próprios hidrossistemas. A importância e magnitude desses ciclos, expressa nos valores novamente positivos de r_k , está relacionada com a quantidade das reservas, as quais exercem uma função reguladora anual.

A observação da parte final do correlograma em cada ano hidrológico analisado permitiu confirmar as conclusões já expressas relativamente à totalidade da série, com a forma

¹² Apenas para relembrar que a designação de um hidrossistema como 'bastante/muito/extremamente carsificado' ou 'pouco carsificado' prende-se com o grau/estágio de desenvolvimento das suas funções recarga/circulação/armazenamento. Ou seja, o maior ou menor desenvolvimento/maturidade das formas cársicas de superfície (recarga concentrada ou difusa) e, sobretudo, da rede subterrânea de canais/conduções que comanda o tipo de circulação (domínio de circulação rápida e concentrada ou de circulação lenta e difusa) e o armazenamento (nas condutas freáticas ou em fissuras/matriz da rocha). Ver nota de rodapé 3 - Parte I, Capítulo I.

Quadro II.IV.1.1 – Resultados obtidos através da análise das séries da precipitação e do caudal (análise correlacional e espectral) para vários hidrossistemas europeus. Interpretação e aplicação dos conhecimentos a os respectivos hidrossistemas

Sítios de Hidrossistemas	UNIVERSIDADE			BUNDESGESAMTANSTALT FÜR WASSERFORSCHUNG UND -SCHUTZ			Preparação dos autores				
	Alcornoque	Densidade específica (da)	Condição	Atividade	Primer function						
Area	$r_k = 0.2$	cat. (cl)	Temp	cat. (cl)	funcion	cat. (cl)					
Superfície	mm	mm	dia	mm	mm	mm					
Hidrossistemas	mm	mm	dia	mm	mm	mm					
Alou (França) ¹	12 1800 0,48	4	0,3	-	14	<1	não há - 0,5	Não há qualquer alteração da série de r. Este sistema com elevada transmissibilidade e alta capacidade de armazenamento. Há uma avaria de armazenamento, muito desenvolvida e funcional.			
Bergue (E. da Alemanha) ²	11,3 1025	7	> 0,2	-	11	1	> 0,2 0,05	1	Não há qualquer alteração da série de r. Este sistema com elevada transmissibilidade e alta capacidade de armazenamento.		
Vivier (E. da Alemanha) ²	149 1894 7,54	8	-	-	13,7	1	- forte irregularidade -	irregular	Há um sistema com capacidade e forte densidade, com elevado grau de capacidade de armazenamento. Há uma avaria de armazenamento, que apresenta efeito regular. Predomínio do escoamento rápido.		
Bage (França) ³	12,25	15	-	-	22,9	<1	não há - 0,5	-	Sistema extremamente esculpido em 20 ordens de secções, menos condutividade. Há uma avaria de armazenamento, que apresenta efeito regular. Predomínio do escoamento rápido.		
Alvorge (Dinamarca) ⁴	500 800 3,5- 50	55	> 0,1	333	-	4	> 0,2 0,02	-	Comparamento hidroclimático limitado. Grande capacidade de armazenamento, lento escoamento e alta capacidade de armazenamento. Há uma avaria de armazenamento, que apresenta efeito regular. Predomínio do escoamento rápido.		
Troost (Espanha) ⁵	28	0,411	70	0,05	-	70	15,35	0,05	-	Irregular na distribuição. Sistema pouco esculpido ou pouco funcional no desenvolvimento.	
Prusse (Suíça) ⁶	75 1025 1,53	73	0,15	357	59,5	1	0,017	0,08	-	Grande capacidade de armazenamento e elevada infiltração. Há uma avaria de armazenamento, que apresenta efeito regular. Predomínio do escoamento rápido.	
Fouppigne (França) ⁷	600	-	73	-	33,4-403	76,4	6	-	0,08	-	Resposta muito forte, elevada capacidade de armazenamento e elevada infiltração. Há uma avaria de armazenamento, que apresenta efeito regular. Predomínio do escoamento rápido.
Lechi (França) ⁸	-	0,73	76	-	-	72,9	8	-	0,48	-	Grande capacidade de armazenamento. Variado ciclo anual de armazenamento.
Tilla (Dinamarca) ⁴	40 610	-	83	0,02	anual	-	66	0,04	-	-	Elevada capacidade de transformação de armazenamento de r. Este sistema com elevada infiltração. Há uma avaria de armazenamento, que apresenta efeito regular. Predomínio do escoamento rápido.
Cher (França) Anços	100 1000	85	0,197	476	-	3	0,42	0,29	5	14	-

¹ Meinj (1972)

² Juncos e Pardo (2009)

³ Paragopoulos e Lambiris (2006)

⁴ Meinj et al. (1998)

⁵ Laroque et al. (1998)

bastante suave da descida a demonstrar a 'longa memória' do hidrossistema ($r_k = 0,0$ em $k \approx 80$ dias) traduzindo o carácter lento e gradual do seu esvaziamento.

Ainda na análise da autocorrelação, há que registar a presença de uma 'terceira fase' que, como já referimos anteriormente, se vislumbra na parte central do correlograma, mas que, numa observação mais rigorosa, se percebe o seu desdobramento em dois sectores: uma pequena interrupção na descida do correlograma com estabilização dos valores de autocorrelação entre $k = 25$ dias e $k = 38$ dias, seguindo-se-lhe uma nova descida regular no correlograma até $k = 68$ dias (correspondendo ao final desta fase).

Essa estagnação dos valores, perfeitamente nítida e muito acentuada no correlograma de cada um dos anos hidrológicos, mostra que se interrompeu a tendência natural de diminuição da autocorrelação. A justificação para esta forma do correlograma estará relacionada com a existência de contributos/fluxos provenientes do interior do próprio hidrossistema (componente lateral) com menor tempo de residência e, por isso, com características físico-químicas ligeiramente diferentes. A proveniência destes fluxos poderá ser:

(i) a cedência de água temporariamente retida em sectores de menor condutividade hidráulica do sistema cársico (matriz rochosa, fissuras e fracturas) por ocorrência de um fenómeno de transição nas imediações da rede de condutas (Király, 2003), ou seja, começa naturalmente a restabelecer-se o gradiente normal (cedência de água de sectores de menor condutividade hidráulica para as condutas) que se havia invertido aquando da entrada de água de recarga;

(ii) a existência de um fluxo proveniente de retenção temporária de água no epicarso (epizona cársica que se encontrará mais desenvolvida na parte centro-leste do Planalto de Degraças-Alvorge), fluxo esse que será reforçado por uma ampla 'bacia morfo-estrutural' na parte central do Planalto e que promove a infiltração máxima da água precipitada (infiltração difusa);

(iii) fluxo proveniente de sectores mais afastados do exutório, no sector leste, provavelmente menos carsificados e onde a circulação será mais difusa e, por isso, mais lenta.

Tratar-se-á, assim, de escoamento diferido, cuja chegada às exurgências ocorre imediatamente a seguir ao escoamento rápido e cujas características físico-químicas da água sofreram ainda poucas modificações no seu percurso subterrâneo. Este escoamento é o responsável pelo carácter menos abrupto da curva de decréscimo do hidrograma, como constatado na análise do hidrograma.

A densidade espectral, $S(f)$, calculada para as séries de caudal diário dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão (1459 dias) mostra, inequivocamente, a presença de duas situações: enorme filtragem nas altas frequências em detrimento das baixas frequências e a presença de um importante ciclo anual em todas as séries analisadas (Figura II.IV.1.2). Este

ciclo anual estende-se às séries diárias do caudal de ambas as exsurgências e da precipitação, reiterando no domínio 'frequência' as constatações já observada no modo 'tempo'.

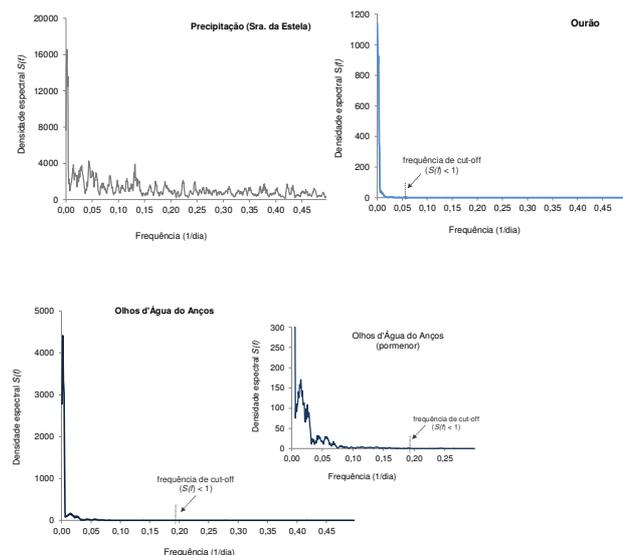


Figura II.IV.II.2 – Densidade espectral, $S(f)$, das séries da precipitação diária na Sra. da Estrela e do caudal diário médio das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão para o total da série ($n = 1459$ dias)

Um dos aspectos mais importantes que sobressai na densidade espectral é o valor máximo do espectro na série de caudais dos Olhos d'Água do Anços (e também no Ourão) na frequência 0,00201 (476 dias), ou seja, superior a 1 ano. Este resultado significa que o contributo da água infiltrada e armazenada num ano hidrológico não se esgota nesse ano, prolongando-se para o ano seguinte ou, dito de outra forma, o caudal num determinado ano

275

é assegurado ainda pelas reservas originadas no ano anterior. Esta realidade é particularmente sentida em anos secos, onde uma parte substancial do caudal é assegurada por reservas provenientes do ano anterior. Foi o que sucedeu em 2011/2012 (ano muito seco e com temperatura anual média acima da média), em que o caudal foi muito superior à recarga (caudal anual médio de 277,4 mm e recarga anual de apenas 179,1 mm).

A explicação para este valor máximo de densidade espectral numa frequência superior a 1 ano reside, em parte, no carácter anual da recarga, deduzido do periodograma da precipitação diária na Sra. da Estrela ($S(f)$ máximo em $f = 0,0028$, ou seja, 356 dias), mas principalmente nas características e no funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico em estudo. Daqui se depreende, portanto, a existência de reservas no interior do hidrossistema (zona saturada), o predomínio de um funcionamento hidrodinâmico que alimenta e mantém essas reservas e o domínio absoluto do escoamento de base no caudal destas duas exsurgências da bordadura oeste.

Para além do valor máximo do espectro, os gráficos da Figura II.IV.II.2 exibem também alguns picos, ainda que de muito menor importância, em frequências baixas, sendo de destacar $S(f) = 0,025$ (38 dias) e $S(f) = 0,041$ (24 dias), também detectados no correlograma (domínio 'tempo'). Estes espectros, de importância secundária, mostram que no hidrossistema em estudo a par com o ciclo anual (ligado ao carácter anual da recarga) e com o grande predomínio do escoamento de base, existem ciclos bem mais curtos que significarão a duração do contributo dos episódios de recarga (e de retenção temporária) no caudal dos Olhos d'Água do Anços, correspondendo às várias fases do escoamento diferido.

A interpretação para estes valores de frequência residirá, no caso dos 24 dias, no final da influência do impulso de resposta, cessando por completo o contributo do escoamento directo e passando o caudal da exsurgência a ser predominantemente escoamento diferido, cuja proveniência identificámos na análise da autocorrelação. Este valor é muito próximo dos 23 dias que surgem na autocorrelação da estação chuvosa, identificando $r_k = 0,0$. Os 38 dias (identificados por um espectro mais significativo que o caso anterior) significarão igualmente a duração da influência do escoamento diferido, mas proveniente de locais mais distantes do exutório ou de estruturas ainda de menor condutividade hidráulica que as acima referidas. Este valor (38 dias) poderá significar, por isso, a quase cessação do escoamento diferido no caudal dos Olhos d'Água do Anços, o qual passará a ser, a partir daí, maioritariamente assegurado por escoamento de base.

A exsurgência dos Olhos d'Água do Anços apresenta uma banda espectral relativamente larga, já que é necessário atingir frequências superiores a 0,1 para se conseguir um bom efeito de filtragem. A frequência de *cut-off* ($S(f) < 1$) é de 5 dias ($f = 0,197$) o que significa que os eventos pluviosos de duração inferior a 5 dias serão filtrados, ou seja, que este tipo de sinal de *input* sofrerá consideráveis modificações no atravessamento do

hidrossistema (Mathevet *et al.* 2004; Marsaud, 1996), o que confirma a sua grande capacidade de filtragem e a sua inércia. Esta larga banda espectral é também explicada, de acordo com vários autores (por exemplo Panagopoulos e Lambrakis, 2006), pelo facto de, juntamente com o escoamento de base, que predomina, existir uma importante componente de escoamento rápido, que se lhe sobrepõe. Também Padilla e Pulido-Bosch (1995) afirmam que a ocorrência destes picos secundários em frequências mais elevadas significa que componentes temporais da precipitação são detectadas no caudal da exsurgência, o que só pode ser explicado por um modesto controlo do sinal de *input* pelo hidrossistema. Esta última interpretação, que surge em aparente contradição com a análise anterior (enorme capacidade filtrante do hidrossistema), reitera a existência de dinâmicas hidrológicas muito diferenciadas no interior do próprio hidrossistema.

Em termos de caracterização do funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico em estudo e das ilações que daí se podem retirar relativamente às características do próprio hidrossistema, a análise univariada revelou, assim, a grande complexidade desse funcionamento hidrodinâmico, por vezes com situações quase contraditórias que decorrem do funcionamento em simultâneo de diferentes sectores no interior do hidrossistema com características físicas e dinâmicas substancialmente diferentes. Esta parece ser, pois, a primeira conclusão a retirar da análise correlatória e espectral simples: o estar-se perante um hidrossistema com um funcionamento, no mínimo, dual. Esta ilação decorre de:

(i) constatação da presença de circulação rápida comprovando a existência de uma rede funcional de canais preferenciais de circulação na zona não-saturada que, segundo os autores de estudos semelhantes, correspondem a sectores bastante carsificados, em que uma rede organizada de largas condutas assegura uma rápida drenagem do hidrossistema;

(ii) comprovação do domínio do escoamento de base no caudal dos Olhos d'Água do Anços, reflectindo uma elevada memória e inércia do hidrossistema, a existência de reservas e o seu esvaziamento lento, características próprias de hidrossistemas pouco carsificados ou com uma rede de drenagem subterrânea desestruturada e pouco funcional, que privilegia a circulação lenta.

No entanto, considerando o carácter ainda inicial destas ilações e a necessidade de as confirmar, aplicaremos, em seguida, a análise correlatória e espectral bivariada.

2.2.2. Análise bivariada¹³

A análise bivariada relaciona o caudal das exsurgências com a precipitação, permitindo identificar o atraso entre o *input* e o *output* e, assim, determinar a capacidade de filtragem e

¹³ Devido ao carácter por vezes complexo da análise e interpretação, com coincidência e/ou proximidade dos valores aqui obtidos em relação à análise univariada, a leitura do texto poderá ser acompanhada da visualização do esquema-síntese presente no final da *análise de séries temporais* (Figura II.IV.II.8).

277

atenuação do sinal de *input* pelo hidrossistema, compreendendo-se, desta forma, o seu funcionamento hidrodinâmico e algumas das suas características físicas. Como sublinham Fiorillo e Doglioni (2010), a correlação cruzada, por exemplo, consegue fornecer um sólido suporte científico na identificação do contributo da precipitação no caudal e o tempo que a água leva a percorrer os principais canais subterrâneos de drenagem.

A **correlação cruzada** representa a interação de duas séries finitas, considerando uma (precipitação) como causa da outra (caudal). O cálculo da correlação cruzada entre a precipitação diária na área de recarga (estação da Sra. da Estrela) e o caudal diário médio nas exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão baseou-se no pressuposto de que a série da precipitação é aleatória, pelo que se pode considerar que o correlograma cruzado representa o impulso de resposta do hidrossistema de Degraças-Sicó e oferece, por isso, uma boa imagem do hidrograma unitário (Antequidad Auzmendi, 1988).

Os resultados obtidos para os Olhos d'Água do Anços, no conjunto do período em estudo, reforçam a complexidade do funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico em estudo. Em primeiro lugar, o comportamento assimétrico do correlograma cruzado, com tendência para valores positivos de $r_{xy}(k)$ em k positivo (ou seja, $r_{xy}(k) > 0$ para $k > 0$) indica, desde logo, que o *output* é substancialmente influenciado pelo *input*, enquanto que a presença de valores positivos de $r_{xy}(k)$ para $k < 0$ revela que o sinal de *input* é significativamente influenciado/alterado pelo hidrossistema. A esta leitura do correlograma cruzado deve ainda acrescentar-se a alteração da tendência de descida registada após o valor máximo de $r_{xy}(k)$, com uma ligeira subida e estabilização dos valores da correlação cruzada, onde se observa um conjunto de pequenos picos secundários de $k = 38$ a $k = 85$ dias, o que mostra que o *output* não é apenas influenciado pelo *input*, mas também por um significativo contributo proveniente do interior do próprio hidrossistema (fluxos normalmente designados de componente lateral).

Numa análise mais pormenorizada, de salientar na Figura II.IV.II.3:

(i) a forma pontiaguda do gráfico exhibe um impulso de resposta bem definido, com um atraso médio de cerca de 3 dias¹⁴ – valor máximo de $r_{xy}(k)$ – o que pode ser interpretado

¹⁴ Este atraso *input-output* de 3 dias toma imperioso proceder a um importante esclarecimento, de modo a evitar qualquer tipo de incoerência na análise. A questão prende-se com o desfazamento encontrado entre o atraso calculado pela correlação cruzada ($k = 3$ dias para valor máximo de $r_{xy}(k)$) e o identificado na análise individual de alguns episódios na caracterização geral das exsurgências (predominantemente de 1 dia – ponto anterior do presente trabalho). A explicação reside, antes de mais, numa questão de dimensão temporal da análise, ou seja, na correlação cruzada calcula-se um valor médio que abrange todos os episódios de precipitação ocorridos nos quatro anos, enquanto na análise precedente, considerámos apenas aqueles episódios que representavam as situações mais comuns em cada época do ano hidrológico. Por outro lado, pode justificar-se com a metodologia por nós utilizada, ao considerarmos, por exemplo, numa sequência pluviosa, não o primeiro dia com precipitação (quando era inferior a 5-10 mm) mas o primeiro pico de precipitação ocorrido nessa sequência, por ser aquele que verdadeiramente contribuiu para a recarga e que representava uma subida considerável do caudal.

como uma resposta quase imediata do hidrossistema ao episódio de precipitação (escoamento rápido);

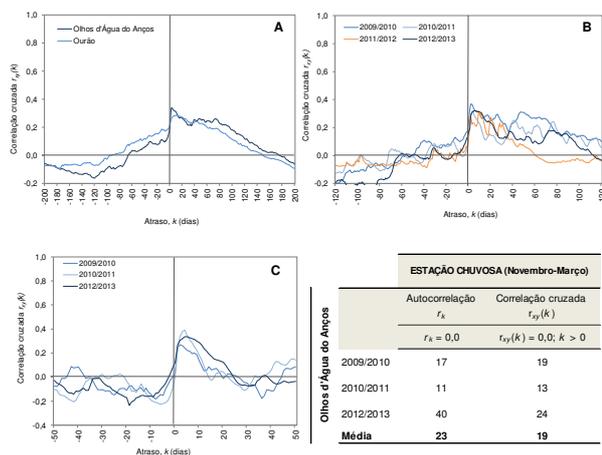


Figura II.IV.11.3 – Representação da correlação cruzada entre as séries de precipitação diária na Sra. da Estrela e de caudal diário médio das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão (A) e dos Olhos d'Água do Anços para cada ano hidrológico (B) e para a estação chuvosa – Novembro a Março (C) e tabela-resumo

(ii) os valores relativamente baixos de $r_{xy}(k)$ – máximo de 0,34 – indicam que o sinal de *input* proveniente da precipitação sofreu redução (transformação) ao longo da sua passagem através do hidrossistema¹⁵;

(iii) a descida gradual após o máximo de $r_{xy}(k)$ até $k = 38$ dias reflecte o contributo do escoamento rápido e de grande parte do escoamento diferido;

(iv) a alteração do sentido descendente do correlograma cruzado com ligeira subida e posterior estabilização dos valores de $r_{xy}(k)$, observando-se alguns pequenos picos, que

¹⁵ A propósito, Panagopoulos e Lambrakis (2006) escrevem, relativamente ao hidrossistema Trifília (Grécia), que os baixos valores de $r_{xy}(k) - 0,25$ – indicam que o sinal de *input* é significativamente reduzido ao atravessar a zona não-saturada até atingir o nível piezométrico. Larocque *et al.* (1998) apresentam a mesma explicação para valores máximos de $r_{xy}(k)$ entre 0,2 e 0,15 em hidrossistemas cársicos no sudoeste de França.

poderão ser explicados por fluxos provenientes de sectores dentro do próprio hidrossistema. Esta possibilidade apoia-se no facto de esses picos secundários serem o reflexo de subidas consideráveis e picos secundários bastante salientes que se verificam nos correlogramas cruzados de todos os anos hidrológicos em estudo (Figura II.IV.11.3 B), pelo que se poderá considerar uma característica do hidrossistema. Estes picos secundários sucessivos foram já identificados na análise univariada e correspondem, como vimos, a fluxos provenientes do interior do próprio hidrossistema, de sectores com capacidade de retenção temporária, que cedem a água com alguma facilidade (assim que os canais principais de drenagem estiverem sem água). Os valores baixos de $r_{xy}(k)$ – oscilando em torno de 0,22 – confirmam que a relação do *output* com o sinal de *input* já é profundamente ténue, uma vez que esse sinal de *input* foi bastante reduzido e distorcido no interior do sistema cársico. Estas subidas secundárias são, nos anos hidrológicos em estudo, numerosas e bastante expressivas, com picos de $r_{xy}(k)$ por vezes quase tão elevados como o pico principal. Estas circunstâncias parecem confirmar tratar-se de *inputs* no caudal dos Olhos d'Água do Anços que corresponderão a fluxos abundantes provenientes do esvaziamento, relativamente célere (em poucas semanas) de sectores no interior do próprio hidrossistema.

Um dos principais aspectos a salientar nos resultados da correlação cruzada é, portanto, o pequeno atraso da resposta dos Olhos d'Água do Anços, o que mostra que parte da circulação ao longo da zona não-saturada se processa, de facto, de modo rápido e, por vezes, turbulento. Este tipo de circulação é comprovado pelas características da água nas exsurgências do bordo oeste, tais como a temperatura e a condutividade eléctrica (que analisaremos mais adiante) e pela turbidez da água na sequência de elevados quantitativos de recarga – Figura II.IV.11.4. As imagens provam, portanto, a existência desse tipo de circulação na zona não-saturada, característica que se estenderá a uma parte considerável do hidrossistema (pelo menos a todo o seu sector ocidental), já que a turvação da água foi detectada em todas as exsurgências do bordo oeste (vale do rio Anços).

A resposta do caudal nos Olhos d'Água do Anços à recarga foi rápida em todos os anos da série analisada: 2011/2012 (1 a 4 dias); 2009/2010 e 2010/2011 (3 dias), 2012/2013 (3 a 5 dias) – Figura II.IV.11.3 B, o que confirma que a drenagem rápida de parte da água infiltrada durante um episódio pluvioso (detectada pela rápida resposta do caudal dos Olhos d'Água do Anços) é, de facto, uma característica hidrodinâmica do sistema cársico em estudo. Estas pequenas diferenças interanuais nos atrasos médios (valor de k para $r_{xy}(k)$ máximo) estarão relacionadas com as características da precipitação (intensidade e duração de alguns episódios) e com as condições hidráulicas do hidrossistema quando ocorrem esses episódios, tal como provam os trabalhos de Doerfliger *et al.* (2004) e de Labat *et al.* (2000), este último com base em simulações com séries de dados diários, horários e semi-horários.



08/01/2011 12h – 13h

Período precedente: 79 mm em 4 dias; 46 mm nos dois dias anteriores



11/01/2011 12:26

Período precedente: 96 mm em 7 dias;
18 mm no dia anterior



17/11/2009 11:00

Período precedente: 131 mm nos três dias anteriores



17/11/2009 12:00

Período precedente: 131 mm nos três dias anteriores

Figura II.IV.II.4 – Turbidez da água nas exsurgências do bordo ocidental do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó na sequência de episódios de precipitação elevada em diferentes momentos do ano hidrológico: alguns exemplos

281

A duração do impulso de resposta varia entre 15 e 18 dias (primeiro valor referente à média dos anos hidrológicos e o segundo à média da estação chuvosa). Neste último caso (período de Novembro a Março) se pormenorizarmos a análise, percebemos a semelhança entre os valores do atraso *input-output* obtidos na correlação cruzada ($r_{xy}(k) = 0$ para $k > 0$) e os valores de atraso caudal-caudal na autocorrelação ($r_k = 0$), o que comprova, de forma irrefutável, a existência de uma importante componente de escoamento rápido no caudal da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços. Os resultados, apresentados na tabela da Figura II.IV.II.3 mostram que, nos anos em estudo, o impulso de resposta desta exsurgência fez-se sentir durante 17-19 dias em 2009/2010; 11-13 dias em 2010/2011 e 24-40 dias em 2012/2013. A discrepância dos valores neste último ano e o valor particularmente elevado da autocorrelação (40 dias) justificam-se pela recarga excepcionalmente elevada e pelo condicionamento à saída de água imposto pela estrutura de drenagem interna da própria exsurgência, o que aumentou a duração de alguns impulsos de resposta. Contudo, no caso dos 40 dias já não poderemos considerar apenas como escoamento rápido (dada a longa duração), mas antes como escoamento misto, onde se misturam escoamento rápido e escoamento diferido.

A resposta rápida da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços a um episódio pluvioso, com a presença de uma notável componente de escoamento rápido, testemunha, uma vez mais, a circulação rápida ao longo da zona não-saturada. Esta hidrodinâmica é, segundo os autores que vêm trabalhando em hidrologia cársica, característica de um sistema cársico bem drenado, onde existe uma rede de drenagem subterrânea bem estruturada, funcional, de canais com elevada condutividade hidráulica, ou seja, um hidrossistema com um elevado grau de carsificação (endocarso e exocarso), onde prevalece a circulação concentrada ao longo da zona não-saturada. Estas conclusões, na análise de séries temporais decorrem da obtenção de valores de atraso *input-output* (em hidrossistemas considerados fortemente carsificados) semelhantes aos encontrados neste estudo. Refira-se, por exemplo, os hidrossistemas drenados pela exsurgência de Aldabide com 1 a 2 dias (Gárfias-Soliz *et al.*, 2009); de Vipava com 3 dias (Jemcov e Petric, 2009), de Archiane com 2,5 dias (Marsaud, 1996) e de Almyros com 4 dias (Panagopoulos e Lambrakis, 2006) – ver Quadro II.IV.II.1.

Assim sendo, será legítimo inferir que pelo menos alguns sectores do hidrossistema em estudo apresentam características hidrogeológicas muito semelhantes às supra-referidas. Apesar de poder parecer abusiva a inferência do grau de carsificação de um hidrossistema a partir deste tipo de comparações é uma prática comum em estudos de hidrologia cársica, utilizada principalmente quando o conhecimento espeleológico e hidrogeológico desse sistema cársico é muito escasso. A legitimidade para esta comparação advém ainda do facto de se ter percebido que hidrossistemas com áreas bastante diferentes têm comportamentos hidrodinâmicos semelhantes (por exemplo Aldabide – 5,2 Km²; Vipava – 149 km²;

Almyros – 500 Km²), tendo-se concluído, por isso, que a rápida resposta do *output* ao sinal de *input* parece estar muito mais relacionada com a estrutura interna do hidrossistema do que com a sua área. Os resultados obtidos, por exemplo, por Jemcov e Petric (2009) para hidrossistemas com áreas muito díspares permitiram-lhes concluir que o impulso de resposta dessas exsurgências (resposta rápida) praticamente não é influenciado pela dimensão do hidrossistema, sendo o grau de desenvolvimento e organização do sistema hidrogeológico cársico que tem a principal influência. No entanto, não podemos ignorar que a resposta das exsurgências à precipitação será, teoricamente, mais rápida e de maior magnitude (embora de menor duração) em hidrossistemas pequenos e bem drenados (Mathevet *et al.* 2004). Ademais, há que haver algum cuidado na comparação dos valores de correlação cruzada para inferência das propriedades físicas de um hidrossistema porque, à excepção de hidrossistemas muito estudados e conhecidos, tal procedimento, apenas com base na análise estatística, pode ter imprecisões, dado a resposta de um hidrossistema a um evento pluvioso ser influenciada por inúmeros factores.

Para além da rápida resposta do caudal à precipitação, patente nos curtos atrasos entre o sinal de *input* e de *output*, de salientar o decrescimento lento da correlação cruzada, que reitera a 'memória longa' do hidrossistema, já expressa pela autocorrelação. Este comportamento da correlação cruzada ($r_{xy}(k)$ para $k > 0$ apenas toma valores inferiores a 0,1 aos 126 dias de atraso e valores negativos próximo dos 180 dias de atraso), reitera a enorme capacidade de armazenamento do hidrossistema, a existência de uma extensa zona saturada com reservas (que filtra e regula o sinal de *input*), o lento esvaziamento do hidrossistema e o predomínio do escoamento de base.

De acordo com a maioria da literatura da especialidade, estas características são típicas de um hidrossistema pouco carsificado, muito próximo de um meio poroso, embora possam ser também representativas de um sistema significativamente carsificado, mas com uma rede de drenagem subterrânea pouco funcional como referem Mangin (1994) e Marsaud (1996) e o trabalho de Kovacic (2010) comprova.

Contudo, o conhecimento da evolução e das características geomorfológicas do Maciço Cársico de Sicó e o constante acompanhamento *in loco* do comportamento das exsurgências da bordadura oeste do Maciço, durante o trabalho de campo, levam-nos a rejeitar a hipótese mais disseminada nos trabalhos da especialidade de que se estará perante um hidrossistema levemente carsificado, com um comportamento similar ao de um aquífero poroso. Esse conhecimento científico teórico e de campo sustenta, pelo contrário, a nossa firme convicção de uma substancial carsificação do hidrossistema em profundidade (pelo menos na sua frente ocidental), mas em que a rede subterrânea de drenagem será pouco funcional. Esta situação explicar-se-á por grande parte dessa rede de drenagem endocársica se encontrar desestruturada devido aos movimentos tectónicos recentes na

283

região, que soergueram o Maciço de Sicó (em particular a sua bordadura ocidental) e terão desorganizado essa rede hipogea de canais, a qual estará em processo de reorganização. Contudo, alguns desses canais preferenciais de escoamento subterrâneo estarão já estruturados, sendo responsáveis pela rápida resposta do caudal dos Olhos d'Água do Anços, como vimos anteriormente, e por se detectar a componente aleatória da precipitação na série de caudais (traduzida pelos picos sucessivos no correlograma cruzado após o valor máximo de $r_{xy}(k)$), o que revelará uma filtragem ligeira de parte do sinal de *input* pelo hidrossistema (Padilla e Pulido-Bosch, 1995).

A representação da correlação cruzada para cada ano hidrológico analisado (à excepção de 2011/2012) e para o período chuvoso (Novembro a Março), reitera o comportamento hidrodinâmico anteriormente descrito para o total da série (1459 dias) e confirma as ilações da análise desenvolvida até ao momento acerca das características hidrodinâmicas e propriedades físicas do hidrossistema de Degraçias-Sicó.

Do mesmo modo, a forma da curva da correlação cruzada entre a precipitação diária da Sra. da Estrela e o caudal diário médio da exsurgência do Ourão é muito próxima da dos Olhos d'Água do Anços. Esta similitude do comportamento da correlação cruzada entre a precipitação e o caudal destas duas exsurgências confere ainda mais suporte à análise e às conclusões retiradas a partir dos Olhos d'Água do Anços.

No seguimento da análise mais pormenorizada que vimos efectuando, a **amplitude cruzada** – $S_{xy}(f)$ – permite, agora, precisar no domínio 'frequência' a duração da resposta do sistema cársico em estudo. Em primeiro lugar, confirma-se que o hidrossistema filtra e atenua o sinal de *input* nas médias e altas frequências em detrimento das baixas frequências, onde se encontra o valor máximo ($f = 0,0020$ – 476 dias). Este valor expressa o vincado ciclo anual (e pluri-anual) da relação recarga/caudal, ou seja, a recarga que ocorre num ano não se esgota no caudal desse ano, indo, assim, reforçar as reservas e contribuir para o caudal no ano hidrológico seguinte. Esta função vem reforçar o carácter de inércia do hidrossistema de Degraçias-Sicó e a sua importante capacidade de armazenamento. Deste modo, o caudal drenado pelas exsurgências em estudo é constituído principalmente por água armazenada no interior do hidrossistema, confirmando o predomínio do escoamento de base. Adicionalmente, a existência de vários picos em frequências ainda baixas (inferiores a 0,1) mostra a duração específica de algumas respostas, já anteriormente assinaladas e explicadas (atrasos de 24 dias, 38 dias, 54 dias e 68 dias - Figura II.IV.II.5).

Por outro lado, verifica-se, novamente, a existência de escoamento rápido pela larga banda espectral, isto é, apenas para frequências acima de 0,42 (2 dias) os valores da $S_{xy}(f)$ tendem, definitivamente, para o valor zero. O facto dos resultados da $S_{xy}(f)$ nunca serem

nulos comprova a efectiva presença de escoamento rápido no caudal dos Olhos d'Água do Anços.

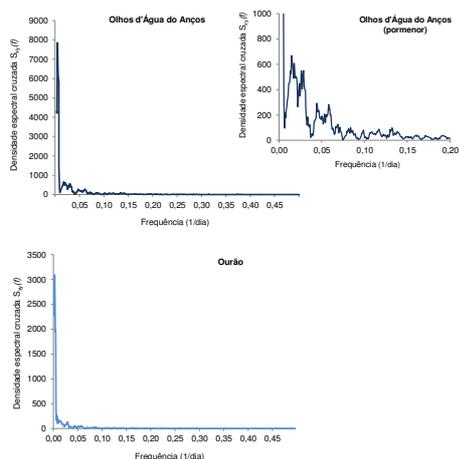


Figura II.IV.II.5 – Representação da amplitude cruzada entre as séries de precipitação diária e de caudal diário médio das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão no período em estudo (2009/2010 – 2012/2013)

A exsurgência do Ourão apresenta um comportamento da amplitude cruzada semelhante ao dos Olhos d'Água do Anços, ajudando a fundamentar as conclusões até aqui retiradas e a concluir que se trata de características intrínsecas do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó no seu conjunto.

A *coherence function* – $CO_{xy}(f)$ – expressa a linearidade da relação *input-output* e constitui uma das ferramentas que mais importante informação fornece na análise de séries temporais. Os resultados obtidos mostram, para o conjunto do período em estudo, uma relação fortemente não-linear, com um valor médio de **0,39** (muito longe da linearidade), ou seja, o sinal de *output* não é proporcional ao sinal de *input*, o que revela uma forte

285

transformação do sinal de *input* no interior do hidrossistema, à semelhança do que vimos assinalando - Figura II.IV.II.6.

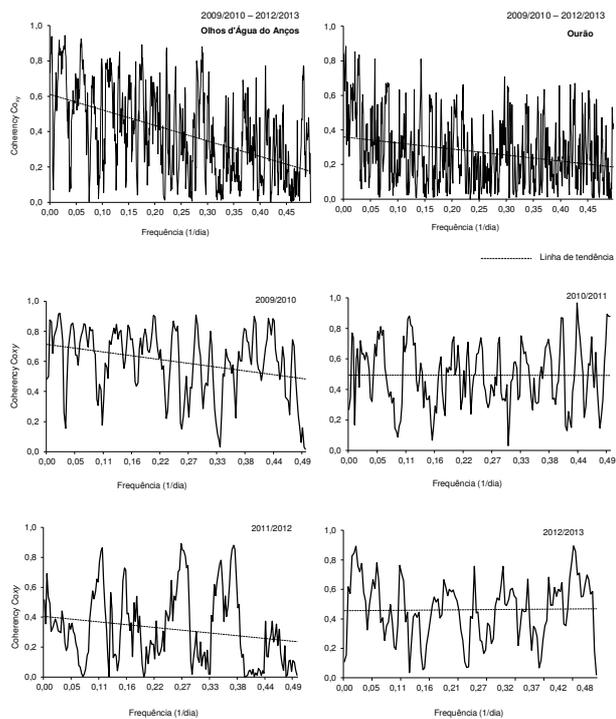


Figura II.IV.II.6 – Representação da *coherence function* entre as séries de precipitação diária (Sra. da Estrela) e de caudal diário médio das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão no período em estudo (2009/2010 – 2012/2013) e dos Olhos d'Água do Anços por ano hidrológico

A observação mais pormenorizada revela a descida pronunciada da $CO_{xy}(f)$ à medida que aumenta o valor da frequência (visível na linha de tendência), sendo possível dividir os resultados em duas partes, com a cisão a ser operada em $f = 0,17$ (a mesma do valor de *cut-off* na densidade espectral – 6 dias). O valor médio da $CO_{xy}(f)$ nas baixas frequências (inferior a $f = 0,17$) é 0,55 enquanto nas altas frequências é de 0,30 (Figura II.IV.11.6). A informação que emana desta situação é muito clara:

(i) uma fortíssima não-linearidade para episódios de precipitação inferiores a 6 dias, ou seja, episódios de curta duração são fortemente alterados no interior do hidrossistema em estudo, não tendo uma repercussão imediata e proporcional no caudal das exurgências, nem tão pouco o hidrossistema reage sempre da mesma forma face a um episódio com estas características;

(ii) a existência de uma ligeiríssima linearidade a longo prazo (baixas frequências), o que significa que o sinal de *input* (precipitação) é transformado pelo hidrossistema num ciclo anual (ou superior a 1 ano), ou seja, a precipitação ocorrida na estação chuvosa repercute-se no caudal sob a forma de escoamento de base (que predomina).

Outra importante informação fornecida por esta função é a complexidade da relação *input-output* no hidrossistema cársico de Degraças-Sicó e o carácter bimodal da sua hidrodinâmica, aspectos visíveis em todos os gráficos da Figura II.IV.11.6. Assim, tendo em consideração o domínio das baixas frequências, observa-se a ocorrência de valores muito elevados de $CO_{xy}(f)$ – acima de 0,8 e mesmo 0,9 – revelando uma importante componente de escoamento rápido (Padilla e Pulido-Bosch, 1995) ao mesmo tempo que valores muito baixos de $CO_{xy}(f)$ – muito próximos de zero – mostram um sistema muito bem regulado, longe da linearidade (Panagopoulos e Lambrakis, 2006).

Esta realidade, aparente contraditória, confirma, uma vez mais, a dualidade do funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico em estudo. Deste modo, ao mesmo tempo que apresenta uma grande capacidade de filtragem do sinal de *input* e de armazenamento com predomínio do escoamento de base (mostrando ser um hidrossistema bem regulado) revela ter uma componente de escoamento rápido que, em determinadas situações de precipitação e recarga, coexiste e se sobrepõe ao escoamento de base.

Para aprofundar um pouco mais o conhecimento desse funcionamento, particularmente em anos hidrológicos contrastados, calculámos a $CO_{xy}(f)$ para cada um dos anos em análise. Os valores médios para cada ano (excepto 2011/2012) são bastante mais elevados do que o valor calculado para a totalidade da série, embora continuem longe da linearidade, confirmando a enorme capacidade do hidrossistema em estudo de distorção do sinal de *input*, a existência de reservas e o domínio do escoamento de base. Assim, em 2009/2010, $CO_{xy}(f) = 0,59$; em 2010/2011, $CO_{xy}(f) = 0,49$; em 2012/2013, $CO_{xy}(f) = 0,46$ e, bastante desfasado dos restantes, no ano seco de 2011/2012, $CO_{xy}(f) = 0,32$, valor que se justifica

287

por grande parte do caudal dos Olhos d'Água do Anços ter sido, nesse ano, constituído por água armazenada no interior do sistema cársico.

Nos anos em análise, um dos aspectos que mais se destaca (exceptuando o ano seco de 2011/2012) é o elevado valor de $CO_{xy}(f)$ para elevadas frequências (até 3 dias), o que confirma o atraso do *output* relativamente ao *input* (já identificado na correlação cruzada), mostrando que o hidrossistema em estudo possui um certo grau de linearidade. Esta realidade, inscrita nos gráficos dos três anos, decorre do facto de alguns sectores do hidrossistema não conseguirem filtrar e atenuar parte do sinal de *input*, provando a existência de circulação subterrânea rápida. Em contrapartida, os valores baixos em baixas frequências confirmam que uma parte significativa do caudal dos Olhos d'Água do Anços provém de água armazenada no hidrossistema, ou seja, o *output* repercute a precipitação/recarga bastante tempo após ela ter ocorrido.

Os resultados da *coherence function*, simultaneamente complementares e contraditórios, não são mais do que o reflexo da heterogeneidade e da complexidade do hidrossistema em estudo, o qual se afasta nitidamente da linearidade *input-output*, mas não consegue filtrar e atenuar por completo o sinal de *input*, levando a que, embora predomine o escoamento de base, se observe uma importante componente de escoamento rápido no caudal dos Olhos d'Água do Anços.

Para finalizar, apenas de assinalar que o cálculo desta função para a exurgência do Ourão confirma as ilações retiradas com base no caudal dos Olhos d'Água do Anços para o conjunto do período em estudo. No entanto, mais uma vez se encontra espelhado na representação gráfica o represamento antrópico da drenagem, o que acentua, artificialmente, o carácter predominantemente não-linear do hidrossistema.

A *phase function* representa o tempo de atravessamento da informação contida no sinal de *input* até ao exutório do hidrossistema e foi outra das ferramentas matemáticas utilizadas para determinar o atraso *input-output*.

De um modo geral, verifica-se consistência dos resultados nas baixas frequências e enorme distorção nas altas frequências, o que reflecte o elevado tempo de atravessamento do hidrossistema e, por seguinte, o predomínio do escoamento de base. A presença de uma elevada componente de escoamento diferido é também percebida, através da consistência dos resultados ainda nas médias frequências (Figura II.IV.11.7).

O alinhamento plenamente consistente verifica-se em frequências inferiores a 0,07 (cerca de 14 dias), o que mostra a duração da influência do escoamento rápido no caudal dos Olhos d'Água do Anços, momento a partir do qual praticamente desaparece, passando o caudal a ser constituído principalmente por escoamento diferido e algum escoamento de base.

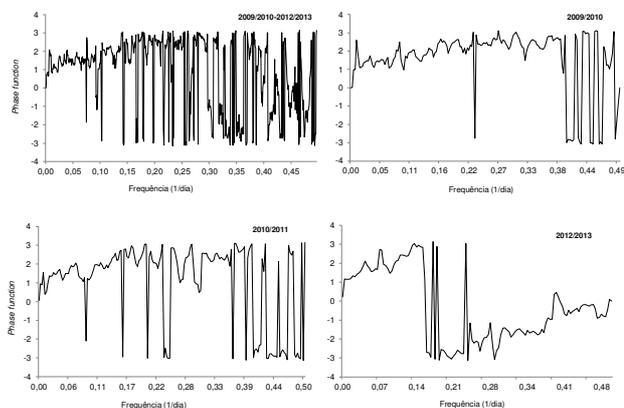


Figura II.IV.11.7 – Representação da *phase function* entre as séries de precipitação diária (estação da Sra. da Estrela) e de caudal diário médio da exsurgências dos Olhos d'Água do Anços no período em estudo (2009/2010 – 2012/2013) e por ano hidrológico

À medida que vai aumentando o valor da frequência, a consistência vai progressivamente diminuindo até $f = 0,14$ (7 dias), valor a partir da qual ocorre total distorção. Este resultado parece, assim, indicar que o período de predomínio absoluto do escoamento rápido ocorre, em média, durante 7 dias, momento em que começa a diminuir a sua influência, que se estende ainda até 14 dias ou, em alguns anos, ainda para além desta data, mas sob a forma de escoamento diferido.

Nas frequências elevadas é impossível calcular qualquer atraso, já que o sinal de *input* se torna extremamente distorcido e incoerente, o que se deve à enorme atenuação e filtragem por parte do sistema cársico dos *inputs* de curta duração, como já referido (Padilla e Pulido-Bosch, 1995; Panagopoulos e Lambrakis, 2006).

Em síntese, a *análise das séries temporais* diárias da precipitação e do caudal da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços (por vezes, acompanhada do Ourão) permitiu retirar as seguintes informações relativamente ao funcionamento hidrodinâmico e a algumas características físicas gerais do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó:

289

(i) possui um elevado 'efeito de memória' (85 dias), revelando uma grande capacidade de armazenamento e a existência de reservas consideráveis bem como um lento e progressivo esvaziamento, com um predomínio absoluto do escoamento de base no caudal das exsurgências, apresentando, assim, uma significativa inércia;

(ii) exerce uma função altamente reguladora, com ciclos anuais (ou até superiores) bem definidos, ou seja o caudal dos Olhos d'Água do Anços reflecte principalmente a precipitação de carácter sazonal (que ocorre durante o período de recarga), pelo que se constata o grande predomínio do escoamento de base. Significa, portanto, que o caudal drenado pelas exsurgências provém, principalmente, de precipitação registada com bastante antecedência, por vezes ainda no ano hidrológico anterior e, entretanto, acumulada no interior do hidrossistema;

(iii) actua como um poderoso filtro, em especial para sinais de *input* de curta duração (episódios de precipitação inferiores a 5 dias), que são fortemente distorcidos e alterados no interior do hidrossistema, não se reflectindo proporcionalmente no caudal na altura em que ocorrem;

(iv) possui uma fortíssima não-linearidade não só pela filtragem de curtos episódios de precipitação, mas também porque a informação neles contida é transformada pelo hidrossistema num ciclo anual. A não-linearidade percebe-se também no facto de o caudal não reagir da mesma forma perante episódios de recarga com características idênticas;

(v) revela uma grande capacidade de retenção temporária de água, que ocorrerá em: (i) determinados sectores de menor condutividade hidráulica (matriz da rocha, fissuras e fracturas), que libertam a água apenas após o esvaziamento dos canais principais de drenagem; (ii) no epicarso; (iii) em sectores menos carsificados do hidrossistema, que impõem uma circulação mais lenta; (iv) na zona epissaturada, de considerável espessura, onde a descida do nível piezométrico (por diminuição ou cessação da recarga) permite a saída de água aí retida temporariamente em cavidades cársicas. O escoamento diferido poderá ainda provir de sectores mais afastados das principais exsurgências, com percurso mais longo, a que se poderá juntar o maior tempo de atravessamento necessário nas áreas com depósitos na parte centro-leste do hidrossistema;

(vi) por outro lado, comporta-se como um hidrossistema bem drenado, apresentando um impulso de resposta bem definido e um desfasamento *input-output* de, aproximadamente, 3 dias (embora possa ser inferior em determinadas circunstâncias pluviométricas e estado hidráulico do sistema cársico). Este valor revela, de facto, que a chegada de água recém-infiltrada à exsurgência resulta de circulação rápida na zona não-saturada, situação que se pode manter por vários dias, pelo que se constata a presença de uma considerável componente de escoamento rápido no caudal das exsurgências.

Os comportamentos identificados através da *análise de séries temporais* surgem como aparentemente contraditórios já que algumas dinâmicas são características de hidrossistemas cársicos com grande inércia e não-lineares enquanto outras são típicas de hidrossistemas cársicos bem drenados, com uma rede de drenagem subterrânea bem desenvolvida e funcional. Assim sendo, o funcionamento do hidrossistema em estudo pode, por isso, ser considerado como bimodal, facto que se explica com base nas características físicas do próprio hidrossistema, como vimos anteriormente, em particular pela sua heterogeneidade interna (grau de carsificação; estruturação e funcionalidade da rede de drenagem). Essa diferenciação endocársica traduz-se na existência de hidrodinâmicas específicas, constatadas na presente análise: (i) circulação rápida numa rede funcional de canais preferenciais de drenagem subterrânea; (ii) importante componente escoamento diferido; (iii) predomínio do escoamento de base e importante capacidade de armazenamento.

De um modo mais pormenorizado:

(i) a **ocorrência de circulação rápida** estará relacionada com o significativo grau de carsificação, em particular do sector ocidental, deduzido da evolução geomorfológica da região e da existência de uma grande quantidade e formas cársicas, já inventariadas. As formas cársicas na superfície facilitam a infiltração e, em alguns pontos, infiltração concentrada, enquanto as de profundidade encaminham a água para a zona saturada. Tratar-se-á, portanto, de uma rede de drenagem subterrânea com alguma organização e funcionalidade, responsável pela chegada rápida da água pluvial até às exurgências do bordo oeste, com um tempo de atravessamento relativamente curto. No entanto, apesar desta componente de escoamento rápido, deve ressaltar-se que não se trata de um hidrossistema bem drenado (no sentido conferido pela literatura da especialidade). Isto porque se tratará de uma rede de drenagem com um grau de organização ainda modesto, tal como referido anteriormente, em razão da movimentação tectónica recente (já no Plistocénico – 1,2 Milhões de anos), que provocou o soerguimento do Maciço de Sicó e, conseqüentemente, a desorganização da rede de galerias em profundidade existente na altura, que encaminhava a água até à bordadura do Maciço. Esse soerguimento terá sido responsável pela progressiva inactivação hidrológica dessas galerias, formando uma paleodrenagem onde existirá um conjunto de galerias horizontais suspensas, o que, segundo Salomon (2006) é muito frequente na zona não-saturada¹⁶. O carácter recente destes movimentos será responsável por essa ainda modesta reorganização da rede de drenagem, embora a presença de circulação rápida ao longo da zona não-saturada (provada na análise das séries de caudal e precipitação) revele a existência de conexão entre antigas galerias e novas estruturas de drenagem que

¹⁶ A existência dessa paleodrenagem é comprovada pelo *trap plein* do Malhadoiro, actualmente situado a 140 m de altitude (as exurgências localizam-se actualmente nos 40 – 70 m, ao longo do vale do rio Anços) e que constituiria o exulório desse paleo-hidrossistema cársico.

constituem um caminho preferencial da água desde a área de recarga até ao bordo ocidental. Os paleocanais que deixaram de pertencer à rede de drenagem actualmente activa constituirão locais de retenção temporária da água, limitando, assim, o escoamento rápido e favorecendo o escoamento diferido que, como mostram os resultados da presente análise, é muito significativo. Isto porque ao susterem provisoriamente a água recém-infiltrada, essas paleo-estruturas, por inversão de gradiente hidráulico, vão promover o armazenamento temporário nos 'blocos capacitivos' que as circundam;

(ii) a **considerável componente de escoamento diferido** encontra justificação não só no grau de carsificação, mas também noutras características físicas do próprio hidrossistema. Como vimos anteriormente, no sector ocidental do hidrossistema a existência de uma rede de drenagem subterrânea em parte pouco funcional favorece o escoamento diferido pela cedência, após as condutas estarem vazias, da água que havia sido temporariamente armazenada por inversão do gradiente hidráulico em situações de abundante e prolongada recarga. A forte tectonização deste maciço calcário foi responsável pela existência de uma densa malha de fracturas e fissuras associadas aos principais acidentes tectónicos que levantaram a frente ocidental do Maciço. Essas discontinuidades, que se verificam com maior expressão no sector ocidental, afectam todo o Maciço, constituindo locais privilegiados de retenção temporária de água, particularmente aquelas que se encontram mais alargadas por dissolução.

O escoamento diferido parece também provir de infiltração atrasada, possivelmente ligada à cedência de água temporariamente acumulada no epicarso ou que levou mais tempo a atravessar as áreas com depósitos. Esta hipótese, apenas possível de confirmar por análises hidroquímicas do caudal das exurgências, fundamenta-se na ampla 'bacia morfo-estrutural' existente no Planalto de Degraças-Alvorque visível nas representações gráficas da morfologia e nos cortes geológicos (Figuras I.II.1.1 e I.II.1.5). Esta larga bacia, relativamente aplanada, favorece a infiltração máxima, o que aliado a uma epizona (solo e epicarso) relativamente desenvolvida e a depósitos gresosos que cobrem algumas áreas mais baixas fornecem condições para uma infiltração difusa, lenta e, possivelmente, com retenção temporária na base do epicarso¹⁷. Para além destas duas situações, devemos também englobar no escoamento diferido o contributo de água que sofreu um processo de circulação mais lenta ao longo da zona não-saturada e, que, mesmo não tendo ocorrido retenção temporária e posterior cedência, atinge a exurgência dos Olhos d'Água do Anços com relativo atraso face ao escoamento rápido. Parte deste escoamento diferido poderá provir também da zona epissaturada, de considerável espessura, dada a grande oscilação

¹⁷ Numerosos estudos têm confirmado que em hidrossistemas com epicarso considerável, a recarga difusa é maior do que em áreas de epicarso incipiente (Jones *et al.*, 2004).

sazonal da recarga e do nível piezométrico no hidrossistema em estudo. A zona epissaturada poderá atingir (acima do nível da saída das principais exurgências da bordadura oeste) os 70 m a 100 m, valor depreendido da diferença altitudinal entre os principais exutórios do hidrossistema (Olhos d'Água do Anços – 70 m; Ourão – 40 m) e o trop plein do Malhadoiro (140 m). Embora só atinja tais valores em anos extremamente húmidos, a oscilação intermensal e interanual do tecto da zona saturada é significativa, o que, aliado ao tempo de residência da água nessa área temporariamente submersa, poderá acentuar a sua carsificação, aumentando os vazios, onde a água se acumula temporariamente, sendo drenada à medida que a recarga vai cessando e o nível do tecto da zona saturada vai baixando. As diversas proveniências e os diferentes percursos do escoamento diferido serão, assim, a explicação para os diferentes atrasos *input-output* revelados tanto pela análise correlatória como pela análise espectral. Os resultados obtidos na presente análise apontam para um contributo preponderante deste escoamento no caudal dos Olhos d'Água do Anços até 38 dias após o episódio de recarga, embora ainda se faça sentir até aos 54 dias, sinalizando o fim da resposta da exurgência a esse episódio. Este último valor, levemente detectado na *análise de séries temporais*, será confirmado na análise da curva de recessão (que apresentaremos no próximo capítulo);

(iii) o **predomínio do escoamento de base** reflecte a inércia, a não-linearidade, o poder regulador e o lento esvaziamento das reservas, características hidrodinâmicas que se justificarão pela existência de sectores do hidrossistema menos carsificados e pelas características da zona saturada. Relativamente a esses sectores, localizar-se-ão particularmente na parte leste do Maciço de Sicó, provavelmente menos afectada pela tectónica (já que se encontra mais afastada dos principais alinhamentos tectónicos da região), onde a água se acumula em locais de baixa condutividade hidráulica (matriz da rocha, fissuras e pequenas fracturas). A cedência dessa água vai ocorrer de forma bastante gradual apenas quando os canais principais de drenagem estiverem vazios, predominando nestas áreas a circulação lenta. A outra justificação para o predomínio do escoamento de base residirá na configuração vauclosiana da zona saturada onde existirão reservas consideráveis devido à sua elevada capacidade de armazenamento. Os resultados aqui obtidos revelaram duas fases no que se refere ao escoamento de base: a primeira, que se estende, em média, até aos 110 – 120 dias e que ainda apresenta uma ligação muito ténue ao período de recarga, provirá do esvaziamento gradual dos sectores menos carsificados do hidrossistema e da fase final do esvaziamento da zona epissaturada. A segunda fase (após os 120 dias) será assegurada apenas por água acumulada na zona saturada e que corresponde ao armazenamento durante a época de recarga ou, no caso de anos secos, a água armazenada no ano hidrológico anterior.

293

A finalizar, apresentamos dois exercícios-síntese que resumem os resultados do trabalho empreendido na presente análise: (i) representação esquemática onde se procura agregar e estruturar, com uma sequência temporal, o comportamento hidrodinâmico do sistema cársico de Degracias-Sicó a partir dos resultados obtidos na análise correlatória e espectral das séries diárias da precipitação e do caudal (Figura II.IV.II.8); (ii) tabela onde classificamos o hidrossistema em estudo por comparação com os tipos de sistemas cársicos propostos por Mangin (1975) – Figura II.IV.II.9.

Na Figura II.IV.II.8¹⁸, de notar que, no respeitante à (provável) proveniência dos vários tipos de escoamento e modos de circulação e em virtude dos diferentes entendimentos conceptuais de um hidrossistema cársico (perspectiva estrutural de Drogue e perspectiva funcional de Mangin), decidimos utilizar ambas as perspectivas para esquematizar de forma mais completa a sequência temporal da resposta dos Olhos d'Água do Anços a um episódio de recarga e, assim, compreender um pouco mais da complexa e heterogénea hidrodinâmica deste sistema cársico.

A *análise de séries temporais*, enquanto método inicial no conhecimento do funcionamento hidrológico cársico, permitiu conhecer as características gerais dessa hidrodinâmica e inferir algumas propriedades físicas do próprio hidrossistema. Porém, se alguns aspectos resultaram evidentes e de justificação consensual, outros há que emergiram desta análise e que carecem de um estudo mais aprofundado.

Assim, tendo já os conhecimentos extraídos da *análise de séries temporais*, procederemos à aplicação de mais dois métodos de análise (*análise da curva de recessão e variação da temperatura e condutividade eléctrica* da água dos Olhos d'Água do Anços), de modo a esclarecer e compreender melhor alguns desses comportamentos, que se revestem de considerável complexidade.

¹⁸ Esquema puramente teórico, não considera o momento do ano hidrológico em que ocorre o episódio de recarga nem a intensidade do mesmo. Refere-se ao comportamento-padrão do hidrossistema.

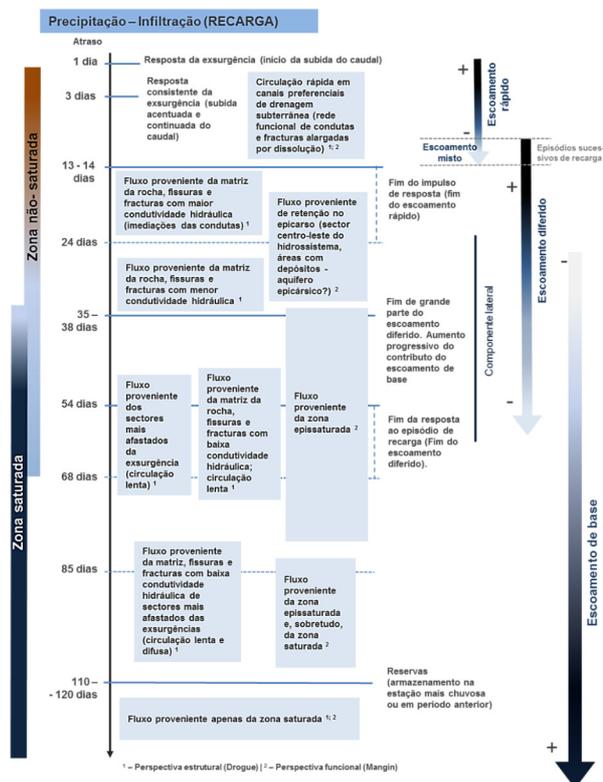


Figura II.IV.II.8 – Sequência temporal (provisória) do funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico de Degracias-Sic (na resposta a um episódio de precipitação) elaborada a partir dos resultados obtidos na análise correlacional e espectral das séries diárias da precipitação e do caudal

295

TIPO	EFEITO MEMÓRIA $r_t = 0.2$	CLASSE ESPECTRAL (frequência de corte)	TEMPO DE REGULAÇÃO	HIDROGRAMA
ALIOU	REDUZIDO (5 dias)	MUITO LARGA (0.30)	10 - 15 dias	
BAGET	PEQUENO (10 - 15 dias)	LARGA (0.20)	20 - 30 dias	
FONTESTORBES	GRANDE (50 - 60 dias)	ESTREITA (0.10)	50 dias	
TORCAL	ENORME (70 dias)	MUITO ESTREITA (0.05)	70 dias	
DEGRACIAS-SICÓ	ENORME (85 dias)	LARGA (0.197)	38 - 54 dias	

Figura II.IV.II.9 – O hidrossistema cársico de Degracias-Sicó segundo a classificação proposta por Mangin (1975) a partir das análises correlatória e espectral das séries temporais do caudal e da precipitação (Nota: a tracejado, a classe onde se insere o hidrossistema em estudo)

3. Análise da curva de recessão

3.1. Enquadramento teórico e questões metodológicas

O estudo da recessão das surgências (diminuição gradual do caudal ao longo do tempo até ao ponto em que ocorre uma inflexão da curva por aumento considerável da descarga) é uma das metodologias mais comuns e proficuas na caracterização dos hidrossistemas cársicos. Na ausência de poços ou de outros pontos de observação directa, a curva de recessão fornece informação sobre a estrutura e o funcionamento do hidrossistema e, muito particularmente, sobre as suas características hidrodinâmicas, tais como condutividade hidráulica, gradiente hidráulico, coeficientes de permeabilidade e de armazenamento, entre outros (Padilla *et al.*, 1994; Dewandel *et al.*, 2003; Kovács *et al.*, 2005) ou, ainda, sobre a heterogeneidade da circulação ao longo da zona não-saturada (Király, 2003). Uma das suas principais vantagens está em permitir a obtenção de parâmetros quantitativos ao contrário de outros métodos de ampla utilização que apenas fornecem informação qualitativa. Como

sublinhamos na parte teórica deste trabalho, este método está entre os mais utilizados na análise e caracterização dos hidrossistemas cársicos pela simplicidade da sua aplicação e aquisição de dados para a sua implementação bem como pelos resultados que permite obter, sendo, por isso, ainda hoje, extremamente utilizado.

Como primeiro apontamento teórico, há que sublinhar, que a análise da curva de recessão incide sobre um aspecto da hidrodinâmica cársica (função de armazenamento/ esvaziamento da água no interior do hidrossistema) que é entendido de modo completamente diferente por duas perspectivas conceptuais e metodológicas do hidrossistema cársico: a *perspectiva estrutural* de Drogue (armazenamento nos 'blocos capacitivos' e drenagem através do sistema de condutas que separa esses blocos) e a *perspectiva funcional* de Mangin (armazenamento na zona saturada, em grandes cavidades – *Sistemas Anexos à Drenagem* – ligadas a um eixo de drenagem principal, que conduz a água até ao exutório).

Esta situação faz com que a análise e interpretação da recessão sejam, igualmente, diferentes: num caso, a recessão constitui o esvaziamento de água armazenada na matriz da rocha e em descontinuidades (fissuras, fracturas e juntas de estratificação) dos 'blocos capacitivos' – perspectiva estrutural; por outro lado, constitui o esvaziamento da água armazenada nos *Sistemas Anexos à Drenagem* na zona saturada – perspectiva funcional. Embora conscientes destas diferenças conceptuais, reflectidas nas fórmulas e na interpretação da recessão, decidimos pela aplicação deste método ao presente estudo, entendendo o hidrossistema cársico de Degraças-Sicó segundo a concepção de Doerfliger e Zwahlen (1995), na qual se encontram integradas as perspectivas acima referidas¹⁹.

Relativamente à utilidade e fiabilidade deste método, Padilla *et al.* (1994) escrevem que os resultados obtidos a partir da adaptação de funções matemáticas simples à curva de recessão e do ajustamento de parâmetros não são suficientes para explicar todos os processos de transferência que ocorrem entre diferentes partes do hidrossistema, mas permitem que se compreenda melhor o armazenamento de água e o funcionamento hidrológico geral no hidrossistema. Os mesmos autores salientam, ainda, que, apesar da forma da curva de recessão ser influenciada pelo tamanho do hidrossistema, ela é também uma função das suas características hidrodinâmicas.

A análise quantitativa da curva de recessão (*flood recession curve*) compreende toda a parte descendente do hidrograma (a seguir ao pico de cheia), incluindo uma primeira parte muito inclinada – *curva de decrescimento* (*falling curve, infiltration curve, quickflow curve*) altamente influenciada pela rede de canais de drenagem e uma segunda parte, menos inclinada – *curva de esgotamento* (*depletion curve, exhaustion curve, base flow curve*)

¹⁹ Este assunto encontra-se desenvolvido na parte teórica deste estudo (Parte I, Capítulo I).

fortemente influenciada pela matriz da rocha, por descontinuidades várias e, principalmente, pela zona saturada.

A primeira parte da curva representa o *escoamento rápido* no interior do hidrossistema cársico, ou seja, a contribuição da zona não-saturada na descarga da exurgência e reflecte, por isso, a infiltração rápida (mais concentrada) e a circulação subterrânea em canais preferenciais de drenagem. A segunda parte da curva (*escoamento de base*) representa o contributo dos sectores de baixa permeabilidade e, sobretudo, da zona saturada, quando finda a influência da água de infiltração recente. A curva de esgotamento é a mais representativa característica da resposta global de um aquífero, dado ser a menos influenciada por variações espaço-temporais da infiltração (Kovács *et al.*, 2005). A importância do último sector da curva de recessão prende-se, também, com o facto de esta definir e prever o comportamento das reservas aquíferas durante períodos de seca.

Em termos metodológicos, existem duas técnicas de análise matemática da curva de recessão do caudal de uma nascente cársica:

(i) aquela que considera a existência de uma única recessão e, portanto, de apenas um coeficiente de recessão, que corresponde ao esgotamento (Boussinesq, 1904; Maillet, 1905; Coutagne, 1948, citados e analisados em Dewandel *et al.*, 2003; Kovács, 2003). Estes métodos baseiam-se em princípios físicos que governam o esvaziamento de um único reservatório e, por isso, assumem que a curva de esgotamento reflecte apenas a drenagem de blocos de baixa permeabilidade;

(ii) aquela que considera a curva de recessão na totalidade (decrecimento e esgotamento) obtendo vários coeficientes de recessão, resultado da sobreposição de várias curvas exponenciais – *exponential curve fitting* (Forkasiewicz e Paloc, 1967, Atkinson, 1977, Milanovic, 1981, White, 1988, Shevenell, 1996, Braedke e Kroethe, 2001 citados em Kovács e Perrochet, 2008; Sauter, 1992; Padilla *et al.*, 1994). Ainda neste domínio, há autores que dividem a curva de recessão em duas partes, assumindo o esgotamento como uma função exponencial (do tipo da de Maillet) e caracterizam o decrescimento através de uma outra função – função homográfica (Mangin, 1975).

A forte heterogeneidade dos hidrossistemas cársicos é responsável pelas técnicas mais utilizadas serem as que se baseiam na sobreposição de curvas exponenciais (com os respectivos coeficientes de recessão). Esta técnica considera a curva de recessão como o somatório de múltiplas exponenciais, que têm sido interpretadas como representativas do contributo de diferentes reservatórios individuais (Kovács, 2003; Kovács e Perrochet, 2008), ou seja:

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

sendo N o número de exponenciais, t o tempo, Q_0 o caudal no início da recessão ($t = 0$) e α_i os coeficientes de recessão para cada exponencial (valor do declive de um segmento da curva de recessão numa escala logarítmica, que toma o valor negativo por a variável em questão, o caudal, estar em progressiva diminuição).

Os trabalhos de Forkasiewicz e Paloc (1967) e Milanovic (1981, explicado em Ford e Williams, 2007) assumiram que o hidrossistema cársico consistia em três reservatórios paralelos, cada qual com características hidráulicas próprias, todos eles contribuindo para o caudal da surgência, alterando ligeiramente a fórmula anterior para:

$$Q_t = Q_{01} e^{-\alpha_1 t} + Q_{02} e^{-\alpha_2 t} + Q_{03} e^{-\alpha_3 t}$$

Deste modo, cada exponencial representa: (i) o comportamento hidráulico da rede de condutas – α_1 ; (ii) do sistema intermédio de fracturas e fissuras carsificadas – α_2 ; (iii) da matriz da rocha ou de fissuras estreitas, de baixa permeabilidade – α_3 (Amit *et al.*, 2002). Mais recentemente, os estudos de Tallaksen (1995); Kovács (2003) e Kovács *et al.* (2005) reforçaram esta ideia demonstrando que, apesar da curva de recessão se poder decompor num número infinito de exponenciais, só três contribuem, de modo substancial, para identificar o comportamento do caudal das surgências.

Apesar da sua vasta utilização, há autores que colocam algumas reservas na interpretação dos resultados, as quais não podemos deixar aqui de referir. De acordo com Jeannin e Sauter (1992) e Ford e Williams (2007), não é realístico conceber os diferentes reservatórios (sistema de condutas, intermédio e fissurado/poros da rocha) como estando hidráulicamente isolados uns dos outros, já que é de aceitação científica geral que existe interconexão entre os diferentes meios. Por exemplo, em situação invernal de elevada recarga, a água das condutas entra, sob pressão, para as fissuras e para os poros da rocha e, inversamente, em períodos mais secos, os meios de menor condutividade cedem água para a rede de condutas (modelo conceptual de Drogue – Figura 1.1.2 B).

Os mesmos autores referem também que os valores de α não podem ser relacionados exclusivamente com a condutividade hidráulica dos vários domínios no interior do hidrossistema cársico, porque dependem também da estrutura da rede de drenagem subterrânea (geometria, densidade, organização). Király (2003), com base em trabalhos experimentais anteriores, escreve que a interpretação do primeiro e último coeficientes de

299

recessão (α_1 e α_3) são razoáveis, o que não sucede com o α intermédio. Como provaram esses estudos (por exemplo Király e Morel 1976b citado em Király, 2003), pode acontecer que um modelo tenha apenas duas classes de condutividade hidráulica e na decomposição da curva de recessão surjam três exponenciais. O que o autor coloca em questão é a interpretação dada ao α_2 que ele diz poder resultar apenas de um fenómeno de transição nas imediações da rede de condutas de elevada condutividade.

O mesmo autor salienta, ainda, que se deve ter bastante atenção na interpretação do α_3 , cujo valor não deve ser interpretado como o esvaziamento apenas de meios internos de baixa permeabilidade, já que o modo como ocorre esse esvaziamento depende fortemente da geometria, da condutividade hidráulica e da densidade da rede de condutas de elevada permeabilidade. Esta ilação decorre da análise de curvas de recessão resultantes de dois modelos em que a geometria e a condutividade hidráulica dos elementos era a mesma, apenas se alterando a densidade da rede de condutas, o que resultou num aumento do coeficiente de recessão no modelo com uma rede de condutas mais densa. Apesar desta técnica constituir a abordagem quantitativa mais simples ao estudo da curva de recessão das surgências, outro método tem sido igualmente utilizado para o retirar de conclusões sobre o funcionamento hidrodinâmico e a estrutura interna dos hidrossistemas cársicos - o método proposto por Mangin (1975)²⁰.

Este último método pretende caracterizar, ao mesmo tempo, as condições de recarga (infiltração profunda ao longo da zona não-saturada) e armazenamento e também o esvaziamento da zona saturada. Para isso, a curva de recessão é dividida em duas partes, distinguindo e caracterizando, separadamente, duas dinâmicas hidrológicas no interior do hidrossistema cársico:

(i) a fase de decrescimento, que traduz o efeito da recarga no comportamento do caudal da surgência, ou seja, reflecte as condições de circulação na zona não-saturada (*escoamento rápido*), representadas pela função Ψ_r ;

(ii) a fase de esgotamento, relacionada com o esvaziamento da zona saturada sem qualquer tipo de influência da recarga (*escoamento de base*), é expressa através da função Φ_r .

O autor (Mangin, 1975) partiu, assim, da hipótese inicial que considera a função Φ_r como indicadora, essencialmente, do esvaziamento da zona saturada e a função Ψ_r como representando a infiltração ao longo da zona não-saturada, moderada pela sua passagem pelo curso molhado (zona saturada) – Padilla *et al.* (1994). Por conseguinte, o caudal escoado num determinado momento (Q_t caudal no tempo t) considera-se:

²⁰ Os hidrossistemas cársicos de referência considerados nesse trabalho, e que constituiram a base deste método, foram: três nos Pirinéus franceses (Baget, Aliou e Fontestorbes) e dois nos Alpes franceses (Fontaine de Vaucluse e Fontaine l'Éveque). Vários outros hidrossistemas cársicos de França, Suíça, Espanha e Marrocos foram posteriormente introduzidos, provando a validade do método.

$$Q_t = \Phi_t + \Psi_t$$

A função Φ_t é descrita pela fórmula de Maillet: $Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$, sendo Q_0 o caudal no início da curva de esgotamento, quando a água de infiltração recente se torna negligenciável (ou seja, $t > t_i$) e α o coeficiente de esvaziamento (em dias). 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, mais íngreme e extremamente influenciado pela infiltração. A função Ψ_t é definida entre $t = t_0$ e $t = t_i$ através da seguinte fórmula:

$$\psi_t = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \epsilon t}$$

em que q_0 é a diferença entre o pico de caudal (Q'_0 num tempo t_0) 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, permitindo estimar a capacidade moderadora da zona não-saturada sobre essa infiltração. Em termos de interpretação, quanto mais baixo for o valor de η , mais lenta é a infiltração profunda (próximo de 0 significa que a infiltração é lenta enquanto que resultados mais próximos de 1 indicam que a infiltração rápida é dominante). No caso do parâmetro ϵ quanto mais elevado o valor, maior o predomínio da circulação rápida, sendo que valores entre 1 e 10 indicam esse predomínio claro. Pelo contrário, quando a circulação é muito lenta, os valores de ϵ são inferiores a 0,01 (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).

Decorrente da aplicação deste método, Mangin (1975) observou que valores de $\frac{\epsilon}{\eta}$ e $\frac{Q_{R0}}{Q_0}$ 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 cobertura nival sazonal, factores responsáveis por uma infiltração lenta ou diferida (El-Hakim e Bakalowicz, 2007).

Para completar esta metodologia e, conseqüentemente, ser possível classificar os hidrossistemas, Mangin (1975) introduziu ainda duas expressões matemáticas referentes ao volume de água drenado na fase de esgotamento como escoamento de base (*volume*

301

dinâmico – Vd) e, na fase de decrescimento, como escoamento rápido (*volume de infiltração – V_i*) – Figura II.IV.III.1.

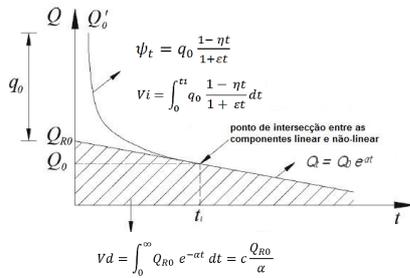


Figura II.IV.III.1 – Esquema gráfico e expressões matemáticas da análise da curva de recessão de uma surgência de acordo com o método de Mangin (1975)

O *volume dinâmico* (V_d) corresponde ao volume de água armazenado na zona saturada, ou seja, ao volume das 'reservas escoáveis' acima do nível do exutório. Dito de outra forma, corresponde ao volume de água armazenada no início da recessão ($t = 0$) disponível para drenagem como escoamento de base. Calcula-se através da fórmula:

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

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. Como explica Mangin (1994), para que tal coincidência existisse, seria necessário que a curva de esgotamento decrescesse continuamente e com o mesmo ritmo até ao infinito, como supõe a fórmula, o que é muitíssimo raro (apenas em situação de seca extremamente prolongada). De facto, apenas o volume situado acima do nível do exutório pode ser naturalmente drenado, embora na curva de esgotamento (e na fórmula) já esteja incluída água que circula abaixo do nível do exutório.

O volume de água drenado durante a fase de decrescimento (entre t_0 e t_i) denomina-se de *volume de infiltração* (V_i) e é dado por:

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

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_{t_0}) disponível para escoamento ao longo de toda a recessão é, assim, obtido da seguinte forma:

$$V_{t_0} = V_d + V_i$$

em que V_d , V_d e V_i são todos em m^3 .

De acordo com o modelo físico usado, o escoamento de base seria superior a zero apenas quando a água de infiltração atingisse o zero (escoamento rápido = 0, no tempo t_i). Contudo, o escoamento de base é extrapolado até t_0 e os valores encontrados entre t_0 e t_i , juntamente com o caudal de esgotamento (após t_i) constituem o total de escoamento de base drenado. Por outro lado, a totalidade de caudal drenado entre t_0 e t_i resulta da soma do escoamento rápido com o escoamento de base extrapolado. No entanto, este período de decréscimo é caracterizado quase na totalidade por escoamento rápido²¹, sendo o escoamento de base no início da recessão muito pouco expressivo, aumentando, contudo, a sua importância à medida que o tempo passa até representar a totalidade do caudal escoado ($t > t_i$) – Figura II.IV.III.2.

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) evidencia o poder regulador da zona saturada do hidrossistema e obtém-se da seguinte forma:

²¹ No método de Mangin de análise da curva de recessão, o *escoamento rápido* deve ser entendido como a junção do escoamento rápido (sentido restrito) e do escoamento diferido, o que se justifica pela divisão, operada por este método, da curva de recessão apenas em duas partes.

303

$$k = V_{dinamico} / V_{total}$$

em que V_{total} é 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 porosos²².

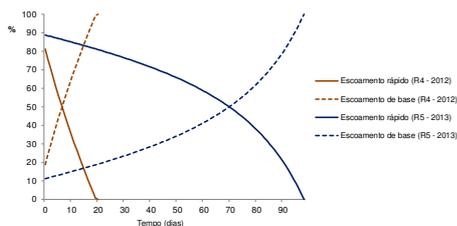


Figura II.IV.III.2 – Evolução, em percentagem, do escoamento rápido e do escoamento de base entre t_0 e t_i em dois anos de características hidrológicas muito diferentes nos Olhos d'Água do Anços (recessão de 2011/2012 – ano muito seco; recessão de 2012/2013 – ano húmido)

A *função i* descreve a forma da curva de decréscimo através da seguinte fórmula:

$$(1 - \eta_i) / (1 + \epsilon_i)$$

para $t = 2$ dias (posteriores ao pico de cheia), pelo que a fórmula é reescrita da seguinte forma:

$$(1 - 2\eta) / (1 + 2\epsilon)$$

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

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

²² Este assunto encontra-se desenvolvido de modo mais aprofundado no capítulo teórico deste trabalho (Parte I, Capítulo I).

segmentos. Esta opção justifica-se porque constatámos, através de vários ensaios, ser muito difícil um bom ajustamento de uma só curva à recessão da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços. A mesma constatação é referida por Bonacci (1993) na sequência dos seus estudos em hidrossistemas cársicos no *Dinaric Karst* (faixa ocidental dos Balcãs) e por Crispim (1995) para a exsurgência dos Olhos d'Água do Alviela (Maciço Calcário Estremenho). No mesmo sentido, Fiorillo (2011) sublinha que, se estivermos perante um hidrossistema de grandes dimensões e se as suas características internas forem heterogêneas, um coeficiente de recessão apenas não é suficiente para descrever o processo de recessão completo.

Ainda em termos metodológicos, o início da análise da recessão dos Olhos d'Água do Anços foi marcado por uma importante questão, relacionada com a definição exacta da data do início da recessão (t_0), o que nos suscitou algumas dúvidas, as quais ilustramos com o caso da recessão do ano hidrológico de 2010/2011.

Neste caso, o último pico de cheia (acontecimento hidrológico a partir do qual se considera que o hidrossistema entra no período de recessão) ocorreu no dia 2 de Maio de 2011, tendo-se iniciado, a partir daí, o habitual período de recessão desta exsurgência. No entanto, a ocorrência de precipitação diária elevada (26 mm no dia 28 de Maio) levou a uma pequena subida do caudal (0,26 m³/s entre 29 e 30 de Maio), não tendo tido grande expressividade no contexto geral do hidrograma, mas que foi suficiente para se colocar a questão sobre o dia do início da recessão (t_0), se dia 3 ou dia 31 de Maio (Figura II.IV.III.3).

Na tentativa de resolução desta incerteza, procedemos ao estudo comparativo dos dois cenários, tendo concluído que o início da recessão não deveria ser a 31 de Maio, uma vez que estava já a decorrer um gradual, mas significativo, processo de esvaziamento da zona não-saturada, iniciado logo após a última grande ponta de cheia (3 de Maio). Estaríamos a desvirtuar a análise da hidrodinâmica hipogea, em particular da zona não-saturada, interferindo, por isso, no inferir das características internas do hidrossistema, sob risco de comprometer o estudo e os objectivos propostos para este trabalho. Para além disso, tratava-se apenas de uma pequena subida e de um pico de caudal praticamente insignificantes no hidrograma daquele ano hidrológico.

Assim sendo, decidimos iniciar a recessão a 3 de Maio e eliminar os dois dias correspondentes a essa pequena subida de caudal. A decisão fundamentou-se em Mangin (1975) que afirma que estas pequenas subidas de caudal devem ser eliminadas, devendo utilizar-se o processo de regressão simples. No entanto, como se tratava apenas de uma subida temporalmente muito curta (de carácter pontual) e onde o mais importante era o ritmo da recessão e não os quantitativos de caudal, preferimos suprimir estes dois dias a inserir dados aproximados e fictícios no interior da série.

305

Ainda em termos metodológicos, de salientar que a exsurgência do Ourão não foi aqui considerada para análise, pelas razões já anteriormente expostas.

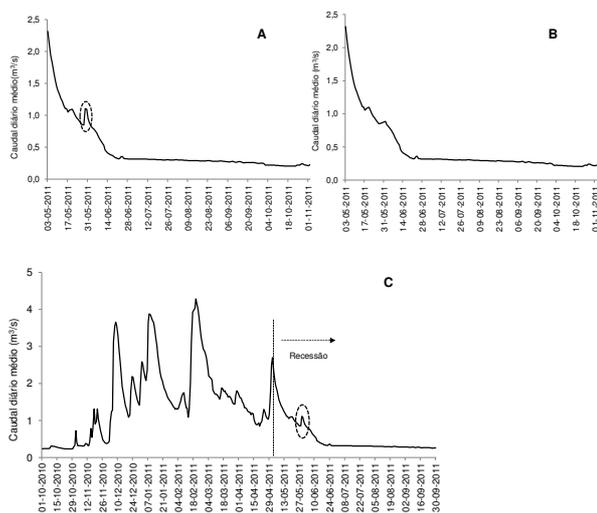


Figura II.IV.III.3 – Recessão de 2010/2011 nos Olhos d'Água do Anços com pequeno pico de caudal (A) e após a eliminação desse pico (B). Hidrograma do ano hidrológico 2010/2011 (C)

3.2. Estudo de caso: curvas de recessão da exsurgência Olhos d'Água do Anços

Neste trabalho estudámos cinco recessões, quatro correspondentes ao período de esvaziamento do hidrossistema, finda a recarga da estação húmida, constituindo excepção a esta premissa, a recessão atípica do Inverno de 2011/2012. As características gerais das recessões analisadas encontram-se no Quadro II.IV.III.1.

O facto de este estudo ter abrangido várias recessões em anos com quantitativos pluviométricos, valores e ritmos de recarga muito diferentes constituiu uma vantagem, já que

permitted observing the hydrological functioning of the cárstico system of Degraças-Sicó in hydrometeorological contrasted contexts and, from there, to extract information about the physical characteristics of the system, one of the objectives of this work. By showing a common tendency, despite the diverse pluviometric and recharge situations, the values obtained can be understood as a constant, which expresses hydrodynamic characteristics and physical properties of the system.

Quadro II.IV.III.1 – As recessões analisada na exsurgência dos Olhos d'Água do Anços (2009/2010 – 2012/2013)

Designação	Período de recessão	Nº de dias	Volume drenado recessão - V_R	Volume drenado ciclo hidro. - V_T	V_R / V_T	Recarga acumulada até início da recessão	Recarga nos dois meses anteriores ao início da recessão	
			Mm ³	Mm ³	%	mm	mm	
R ₁ (2010)	24 Abril 2010 - 29 Out. 2010	189	12,7	61,1	20,8	844,5	113,7	
R ₂ (2011)	3 Maio 2011 - 2 Nov. 2011	181	7,1	35,8	19,7	719,0	107,0	
R ₃ (2011/2012)	18 Dez. 2011 - 20 Abril 2012	125	3,8	13,3	28,2	128,7	125,4	
R ₄ (2012)	10 Maio 2012 - 25 Out. 2012	170	4,5	13,3	33,8	167,6	21,5	
R ₅ (2013)	11 Abril 2013 - 30 Set. 2013	173	17,7	53,4	33,1	977,4	324,5	
Valores médios			167,6	9,1	40,9	27,1	567,4	138,4

*Ciclo hidrológico é o intervalo temporal que medeia entre a primeira grande subida do caudal (fim da recessão do ano anterior) e o final da recessão desse ano e, por norma, estende-se para lá do final do ano hidrológico português. Excepção apenas para a recessão do Inverno de 2011/2012 (R₃) e para a recessão de 2013 (R₅), neste último caso por razões ligadas ao prazo de execução e entrega do presente estudo.

In general, in the area under study, the recession is long (it extends for 5 or 6 months – about 167 days, on average), starting in April or beginning of May (when the recharge decreases drastically and the outflow of the exsurgences passes, progressively, to be assured in large part by the subterranean reserves) and prolonging itself until the end of the hydrological year, normally until the end of October. During the four years analyzed, only an exception to this reality was the recession that occurred between December 2011 and April 2012, about 4 months – 125 days) and that resulted in an anomalous situation (dry meteorological winter), with very low precipitation values from mid-November.

The volume of water drained during the recession (decrease + exhaustion) represents less than a third of the total volume drained by the exsurgences during a hydrological cycle²³ (27.2%). Although in absolute terms the volume drained during a recession is related to the quantities of precipitation and recharge accumulated up to the start of the

²³ A não coincidência do final da recessão com o final do ano hidrológico fez com que optássemos, apenas durante a análise da curva de recessão, pelo termo *ciclo hidrológico* de acordo com a definição apresentada junto do Quadro II.IV.III.1, pelo que, mesmo podendo ter uma duração semelhante à do ano hidrológico, o início e o final de cada ciclo hidrológico se encontram desfasados dos do ano hidrológico.

recession (and primarily with the recharge of the previous month), in relative terms (volume drained during the recession/volume drained in the hydrological cycle) it seems that there is no dependence in relation to the annual pluviometric characteristics. It is the case of the recessions of 2012 and 2013 – R₄ and R₅, with identical percentages, despite, in the latter case, a precipitation accumulated up to the start of the recession being three times higher than in the previous one – Quadro II.IV.III.1. This fact allows, from now on, to expect that precipitation and recharge exert a smaller influence (for the recession process) than the physical characteristics of the system, which command the storage of water, the way in which the progressive emptying of the system, primarily in the period of exhaustion and in relation to the rapid outflow/rapid outflow of base. For this purpose, Bonacci (1993) makes an excellent graphic synthesis of the relationship between the form of the hydrograph (and of the recession), the quantity of rapid outflow / base outflow and the characteristics of the systems (in particular with the degree of karstification, existence and characteristics of deposits of cover) and type of circulation subterranean – Figura II.IV.III.4.

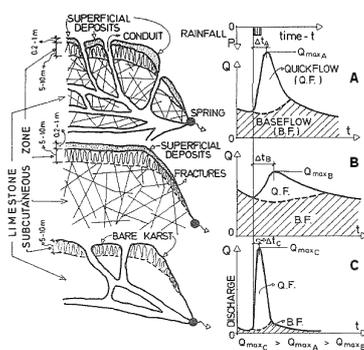


Figura II.IV.III.4 – Esquema teórico da relação entre a forma do hidrograma, a quantidade de escoamento rápido / escoamento de base e o tipo de hidrossistema e circulação associada (combinada – A; difusa – B; em condutas – C) perante precipitação idêntica. Fonte: Bonacci (1994)

In a general perspective, the recession curves of the Olhos d'Água do Anços show different behaviors, visible from the slope of the different segments of each curve, configuring two situations: (i) initial slope very pronounced up to 20 days, visible especially in the semi-logarithmic representation of the daily average discharge (Figura II.IV.III.5

A) e que caracterizou as curvas de 2011, do Inverno de 2011/2012 e de 2012; (ii) declive inicial muito menos abrupto, com o decréscimo praticamente constante ao longo de grande parte da curva de recessão, o que se verificou em 2010 e 2013. O primeiro caso revela uma drenagem relativamente rápida²⁴ da água ao longo da zona não-saturada (escoamento rápido e diferido) enquanto o segundo caso mostra que esse escoamento rápido se faz sentir durante bastante mais tempo no caudal da exsurgência na recessão. Esta diferença de duração é facilmente constatada através da forma das curvas, representadas no gráfico A da Figura II.IV.III.5, onde se observa que o contributo do escoamento rápido pode variar

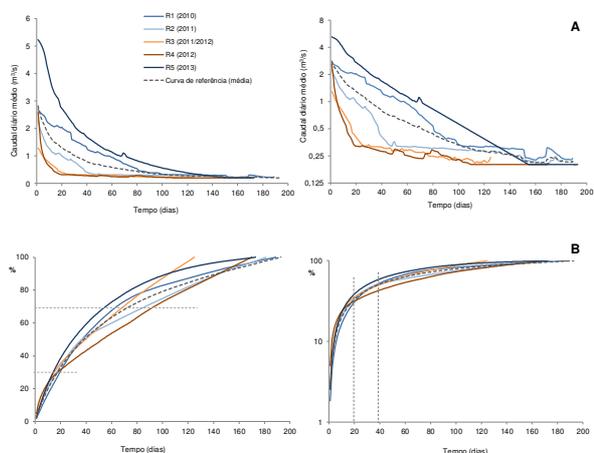


Figura II.IV.III.5 – Representação das cinco recessões em estudo: a diminuição do caudal diário médio no tempo (dias, desde o início da recessão) – imagem A; esvaziamento percentual do hidrossistema (*idem*) – imagem B. Representação gráfica linear (lado esquerdo) e semi-logarítmica (lado direito)

²⁴ De salientar que a noção de *rapidez* deve ser entendida apenas no contexto das características do hidrossistema em estudo e não no contexto geral da hidrologia cársica, já que na maioria dos casos documentados na bibliografia, em particular em maciços calcários muito carsificados, este conceito refere-se a algumas horas ou, no máximo, a alguns dias apenas.

309

entre os 20 dias na recessão invernal de 2011/2012 e em 2012 e os 90 dias²⁵ em 2010.

A imagem B da Figura II.IV.III.5 permite aprofundar a análise geral iniciada com os gráficos anteriores, sendo possível, agora, ver o ritmo a que ocorre a recessão em cada ano, identificando diferenças e semelhanças, no intuito de compreender a interferência das características internas do hidrossistema na drenagem subterrânea e, a partir daí, retirar mais informação sobre essas mesmas características.

O primeiro aspecto a salientar é a rápida drenagem (um terço da água drenada ao longo da recessão escoou-se em apenas 14 dias), aspecto que é comum a todas as recessões e que parece ser independente dos quantitativos de água entrados no hidrossistema até ao início da recessão. Esta última afirmação é comprovada pelo facto de serem necessários os mesmos 14 dias para drenar cerca de 30% da água, tanto na recessão invernal de 2011/2012 (precipitação de 200 mm no mês anterior ao início da recessão, que se seguiu a um longo estio) como na recessão de 2013 (cerca de 330 mm no mês anterior, Março de 2013, depois de um Inverno muito chuvoso). Isto significa que uma das características hidrodinâmicas do sistema cársico em estudo, identificável em todas as recessões, é a relativa rapidez com que se verifica a circulação e o esvaziamento ao longo da zona não-saturada e que será o resultado de uma rede funcional de condutas e de fracturas, alargadas por dissolução, por onde circula a água recentemente infiltrada.

O ritmo de esvaziamento da zona saturada é, por seu lado, bastante mais lento, o que se constata através de: (i) declive suave da curva de recessão após a curvatura pronunciada que marca o fim do contributo do escoamento rápido, sendo o caudal das exsurgências, a partir daqui, totalmente assegurado pelo escoamento de base. Esta curvatura, comum a todas as recessões, é perfeitamente visível na representação semi-logarítmica, a qual mostra que, no geral, a partir dos 40 dias (após o início da recessão), o declive da curva é muito suave; (ii) elevado número de dias que leva a drenar o último terço do volume total escoado durante a recessão, ou seja, os últimos 30% desse volume (correspondente, na sua totalidade, a água proveniente da zona saturada) pode demorar mais de 100 dias (Figura II.IV.III.5 A). Situação que ocorreu na recessão de 2010 (70% da água foi drenada em 64 dias, tendo sido os restantes 30% escoados ao longo de 125 dias) e na recessão de 2013 em que os mesmos 70% foram drenados em apenas 56 dias, tendo o caudal das exsurgências perenes sido assegurado nos restantes 117 dias da recessão por água da zona saturada.

²⁵ Este valor tão elevado não configura apenas escoamento directo, mas sim já escoamento diferido. No entanto, a divisão dicotómica da curva de recessão entre *decréscimo* e *esgotamento* e a respectiva associação ao escoamento rápido e ao escoamento de base, respectivamente, levanta o problema do escoamento diferido, abundante no hidrossistema em estudo. Devido à sua importância no caudal das exsurgências, e embora devendo considerar-se como integrante do 'escoamento directo' (dado tratar-se do contributo da zona não-saturada), o escoamento diferido será, na maioria dos casos, referido e destacado como uma entidade com características próprias.

Por conseguinte, a interpretação inicial (e geral) da forma das curvas de recessão é a de que estamos perante duas situações de circulação subterrânea perfeitamente individualizadas. Por um lado, a circulação na zona não-saturada, que ocorre de modo relativamente rápido, em resultado, muito provavelmente, de uma rede funcional de condutas e fracturas, ao passo que o esvaziamento de sectores de menor condutividade hidráulica e da zona saturada é muito mais lento, o que se compreende, neste último caso, pela diminuição do gradiente hidráulico e pela inércia que caracteriza o carso molhado (Marsaud, 1996). Esta constatação preliminar sobre um dos aspectos da dinâmica hidrológica do hidrossistema de Degraças-Sicó revela, uma vez mais, a sua heterogeneidade interna, ou seja, a existência de vários sectores e estruturas com características e hidrodinâmicas muito próprias e distintas, constatação em total acordo com as conclusões retiradas *na análise de séries temporais* (método de análise anterior).

3.2.1. A decomposição da curva de recessão em várias funções exponenciais

No intuito de obtermos informação sobre a estrutura interna do hidrossistema de Degraças-Sicó, e dos seus diferentes subsistemas, procedemos à decomposição de cada uma das cinco curvas de recessão em várias funções exponenciais de acordo com a técnica proposta por Forkasiewicz e Paloc (1967).

Em primeiro lugar, procedemos à divisão da curva de recessão em três segmentos, correspondentes, cada um, teoricamente, ao esvaziamento de um sector interno do hidrossistema em estudo. O início e o final de cada um dos segmentos (correspondentes a um tipo de escoamento) não foram encontrados de forma aleatória, tendo sido considerado o intervalo de dias em que se verificava o melhor ajustamento da curva exponencial e o valor mais elevado de coeficiente de determinação (r^2). De referir ainda que, devido à configuração aparentemente bastante linear de vários segmentos em algumas recessões, e para não existirem dúvidas sobre a validade da aplicação deste método, testámos qual a função (linear ou exponencial) que melhor se ajustava aos valores representados nesses segmentos. Os resultados provaram ser o ajustamento exponencial o que melhor se adequava, validando a aplicabilidade deste método.

O primeiro coeficiente de recessão (α_1), correspondente à fase de decrescimento, é o que mais varia, seguindo-se o coeficiente α_2 representando um regime intermédio (misto) e, finalmente, como o mais estável, o α_3 indicador da fase de esgotamento. Grasso (1999) identificou cada uma destas fases mediante variação hidroquímica em várias nascentes cársicas, tendo-as denominado, genericamente, de fase de *decrecimento*, de *transição* e de *esgotamento*. Para além da Figura II.IV.III.6, a mesma conclusão é retirada quando

311

procedemos ao cálculo de algumas medidas de dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação) – Quadro II.IV.III.II.

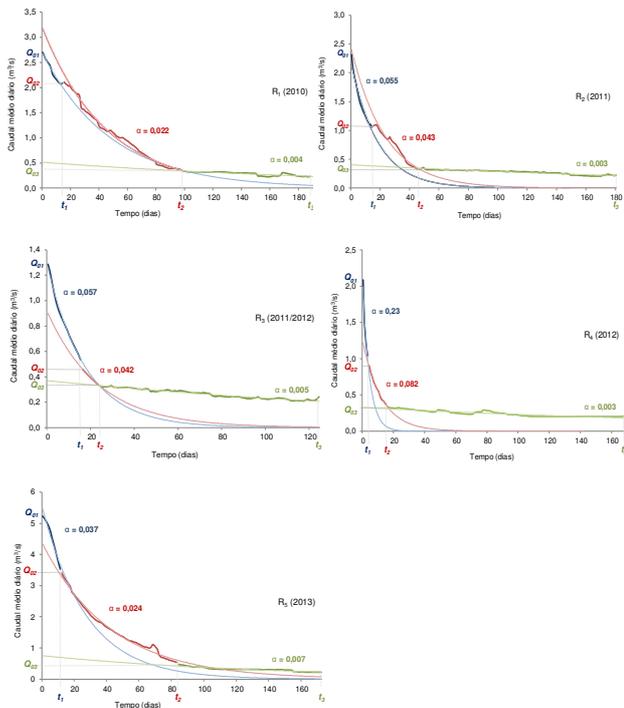


Figura II.IV.III.6 – Decomposição das curvas de recessão dos Olhos d'Água do Anços em três funções exponenciais, de acordo com a técnica de Forkasiewicz e Paloc (1967)

Quadro II.IV.III.II – Coeficientes de recessão (α) de cada segmento da curva de recessão, de acordo com a técnica de decomposição em curvas de recessão múltiplas proposta por Forkasiewicz e Paloc (1967)

Período de recessão	α - coeficientes de recessão								
	Q - caudal diário médio no início de cada segmento (m^3/s)								
	t - dia em que termina cada segmento (t_3 = último dia da recessão)								
	α_1	Q_{01}	t_1	α_2	Q_{02}	t_2	α_3	Q_{03}	t_3
R ₁ 24 Abril 2010 - 29 Out. 2010	0,021	2,69	15	0,022	2,11	99	0,004	0,335	189
R ₂ 3 Maio 2011 - 2 Nov. 2011	0,055	2,32	14	0,043	1,08	45	0,003	0,324	180
R ₃ 18 Dez. 2011 - 20 Abril 2012	0,057	1,28	16	0,042	0,45	24	0,005	0,328	125
R ₄ 10 Maio 2012 - 25 Out. 2012	0,230	2,08	4	0,082	0,90	16	0,003	0,337	170
R ₅ 11 Abril 2013 - 30 Set. 2013	0,037	5,23	12	0,024	3,40	84	0,007	0,473	173
Média	0,080	2,72	12	0,043	1,59	54	0,004	0,359	167
Desvio Padrão	0,076	1,3	4,3	0,02	1,1	32,7	0,001	0,057	22,2
Coefficiente de Variação (%)	98,5	60,3	35,3	53,9	78,9	70,5	34,0	15,7	13,3

A maior variabilidade de α_1 e α_2 explica-se pelo facto de estes coeficientes dependerem das condições de infiltração (heterogeneidade espaço-temporal e diferentes formas de infiltração) e do modo de circulação na zona não-saturada após os eventos pluviosos (tipo de circulação e respectiva duração). Contrariamente, o terceiro coeficiente, α_3 , ligado ao esvaziamento de zonas menos transmissivas do hidrossistema (fissuras e matriz da rocha) e da zona saturada, por estar ao abrigo daquelas interferências, apresenta uma enorme estabilidade.

Apesar do coeficiente de decrescimento (α_1) ser o mais variável, a comparação dos valores obtidos para os Olhos d'Água do Anços com resultados de estudos semelhantes (Crispim, 1995, para os Olhos d'Água do Alviela e Sauter, 1992, para Gallusquelle), mostram que os valores de α_1 variam relativamente pouco no nosso caso, já que, no primeiro estudo citado, existem variações entre 0,086 e 0,374 (média de 0,24) e, no segundo, a oscilação vai de 0,017 a 0,25. No presente estudo, os valores situam-se entre 0,021 e 0,230 (média de 0,078), embora se concentrem entre 0,021 e 0,057, apenas com um valor fora deste intervalo (0,23), em 2012. A explicação para esta pequena variação de α_1 na presente investigação reside no facto da infiltração na área em estudo ser quase totalmente difusa, não existindo qualquer sumidouro responsável pela entrada abundante e concentrada de água no hidrossistema. A recarga concentrada que ocorrerá na área em estudo (através da abertura superficial dos algares) tem um carácter meramente pontual, sendo, por isso, de pouca importância.

O facto de os valores de α_1 variarem pouco no caso em estudo (à excepção de R₄) evidencia que são as características físicas internas do hidrossistema, em particular da zona

313

não-saturada, que mais comandam o seu funcionamento hidrodinâmico e, portanto, o ritmo de decrescimento do caudal. Esta ilação é fundamentada nos valores muito semelhantes de α_1 na recessão de 2011 (no seguimento de um ano hidrológico normal a húmido) e na recessão invernal de 2011/2012 (após um longo período de escassa ou nula precipitação apenas interrompido em Novembro de 2011).

Para além disso, o facto de os valores de α_1 serem muito próximos indica que este é um parâmetro característico, que reflecte as propriedades físicas do próprio hidrossistema e da rede de drenagem subterrânea. Assim, o valor médio de α_1 (0,078) revela que o escoamento na zona não-saturada pode ser considerado misto (Taylor e Greene, 2008; Kovács, 2008), uma vez que, embora predomine a circulação de carácter lento, regista-se a ocorrência, em simultâneo, de circulação bastante mais rápida. Assim sendo, podemos inferir, uma vez mais, o carácter duplo do funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico em estudo, em particular da zona não-saturada (reflectida em α_1), o que revela a heterogeneidade interna desta zona, onde coexistirão sectores que actuam como um poderoso filtro e sectores onde existirá uma rede de drenagem estruturada e funcional.

No que se refere ao coeficiente α_2 , normalmente o mais difícil de interpretar, a sua variação é muito menor do que α_1 , o que revela a cada vez menor influência das condições de infiltração inicial e a maior influência da estrutura interna do Maciço Cársico. No seguimento dos valores obtidos, parece existir uma situação intermédia no processo de recessão do hidrossistema em estudo, em que a drenagem não é tão rápida como no caso de α_1 (ligado a estruturas de drenagem hipogea com maior condutividade hidráulica) nem tão lenta como no caso de α_3 (ligado ao esvaziamento paulatino da zona saturada).

O coeficiente α_2 representa, portanto, o escoamento diferido, visível no hidrograma dos Olhos d'Água do Anços (declive pouco acentuado da curva de decrescimento) e identificado na análise de séries temporais. Este escoamento corresponde, como já vimos, à parte final da resposta do hidrossistema a um evento de recarga e atinge as exsurgências depois de ter ocorrido a drenagem, mais rápida, da maioria do impulso de recarga (escoamento rápido - α_1).

Este escoamento diferido estende-se até aos 54 dias após o início da recessão, embora, no pormenor, seja muito díspar, oscilando entre os 8 dias na recessão invernal de 2011/2012 (ano muito seco) e os 72 dias na recessão de 2013 (ano chuvoso), estando, por isso, esta fase intermédia, muito relacionada com os quantitativos de recarga acumulados até ao início da recessão (Quadro II.IV.III.I). No primeiro caso, esta fase foi muito curta, dado que até Dezembro de 2011 (início da recessão) havia ocorrido muito pouca recarga e o interior do hidrossistema continha, por isso, muito pouca água. Terminada a drenagem, mais rápida, da água infiltrada em Novembro de 2011 (traduzida em α_1), o caudal dos Olhos d'Água do Anços passou a ser assegurado quase totalmente por escoamento de base

(traduzido em α_3). Contrariamente, na recessão de 2013, esta fase verificou-se durante mais de 2 meses, o que se justifica pela excepcional quantidade de recarga, com retenção temporária em alguns sectores da zona não-saturada, e cedida, posteriormente e de forma gradual, depois de escoada a água de circulação mais rápida (escoamento rápido). O maior atraso deste escoamento na chegada à exsurgência contribui para que a passagem do regime de decréscimo ao regime de esgotamento não seja tão abrupta e, portanto, a diminuição do caudal não seja tão acentuada.

Esta situação intermédia na recessão dos Olhos d'Água do Anços, traduzida nos valores de α_3 , não está relacionada, portanto, com qualquer reservatório específico no interior do hidrossistema (como propunha inicialmente o modelo), mas com contributos de diferentes sectores do hidrossistema, como, aliás, ficou demonstrado na *análise de séries temporais*.

Os valores de α_3 pelo facto de não estarem sujeitos à influência dos processos de infiltração e circulação subterrânea, são os que melhor reflectem as condições de esvaziamento de um hidrossistema cársico ao mesmo tempo que fornecem informação sobre as suas características internas, em particular sobre a sua capacidade de armazenamento e de cedência de água. O coeficiente de esgotamento (α_3) é, aliás, considerado como um dos parâmetros que melhor reflecte as características hidrológicas de um hidrossistema cársico, como mostram, por exemplo, os trabalhos de Amit *et al.* (2002). A sua baixíssima variação no caso em estudo (desvio padrão de 0,001) mostra que é um parâmetro praticamente constante, independente das condições e quantitativos de recarga, que pode ser usado como indicador das características físicas internas do hidrossistema.

Relativamente à sua interpretação, e de acordo com os resultados obtidos nos trabalhos experimentais de Király & Morel (1976); Eisenlohr (1996); Marsaud (1996), Cornaton (1999) e Kovács (2003) os valores de α_3 podem depender de vários factores inerentes à estrutura e organização internas do hidrossistema cársico, o que dificulta o inferir de características físicas a partir destes coeficientes de recessão. Deste modo: (i) elevados valores de α_3 podem significar quer uma grande densidade da rede de condutas (Kovács, 2003; Cornaton, 1999) quer elevada condutividade hidráulica (Eisenlohr, 1996), o que se traduz no esgotamento mais rápido das reservas da zona saturada; quer na drenagem de poços repletos de água acima do nível piezométrico quer ainda no escoamento de hidrossistemas de pequenas dimensões (Florillo, 2011); (ii) valores baixos de α_3 podem dever-se a um elevado armazenamento, simultaneamente em sectores de menor permeabilidade do hidrossistema (de acordo com o modelo conceptual de Drogue) e na zona saturada (segundo o modelo conceptual de Mangin), o que se traduz num forte poder regulador do hidrossistema.

No hidrossistema em estudo, os valores de α_3 são bastante baixos (valor médio de 0,004), o que mostra o esvaziamento gradual e demorado da água armazenada no interior

315

do hidrossistema (ao longo de vários meses). Resultados semelhantes a estes têm sido entendidos como sinónimo de um hidrossistema com enorme capacidade de armazenamento e onde a libertação dessa água armazenada é paulatina e bastante prolongada. Esta enorme capacidade de armazenamento é a explicação para o predomínio absoluto do escoamento de base em detrimento do escoamento rápido (conclusão semelhante à decorrente da *análise de séries temporais*).

Por conseguinte, os valores do coeficiente de esgotamento obtidos para o hidrossistema de Degracias-Sicó poderão ser interpretados como o resultado de: (i) a grande dimensão deste hidrossistema²⁶, que favorece um decréscimo lento da pressão na zona saturada durante o período de esgotamento; (ii) a existência de uma zona saturada bastante espessa e desenvolvida (tipo vauclosiana), com grande capacidade de armazenamento e com forte poder regulador; (iii) existência, no interior do hidrossistema, de sectores de baixa condutividade hidráulica (matriz da rocha e fissuras) onde a libertação da água armazenada durante o período de recarga ocorre de forma bastante lenta.

3.2.2. A decomposição da curva de recessão numa função exponencial e numa função homográfica – o método de Mangin²⁷

A análise da curva de recessão como meio de aprofundar o conhecimento da dinâmica hidrológica do hidrossistema Degracias-Sicó e das suas características físicas conduziu à aplicação de mais um método de análise às cinco recessões dos Olhos d'Água do Anços. Trata-se do método desenvolvido por Mangin (1975), que divide a curva de recessão em duas partes – a curva de decréscimo e a curva de esgotamento, representando, respectivamente, o contributo da zona de infiltração e circulação (zona não-saturada) e o do carso molhado (zona saturada), tal como explicámos no início deste capítulo.

Para o cálculo dos parâmetros essenciais à utilização deste método servimo-nos da ferramenta *Curve Fitting* do programa MATLAB. Os parâmetros obtidos, e que permitem a análise das curvas de recessão segundo o método proposto por Mangin (1975), encontram-se no Quadro II.IV.III.III.

²⁶ O considerar 'grande' o hidrossistema de Degracias-Sicó (cerca de 120 km²) prende-se com as dimensões habitualmente bem menores dos principais hidrossistemas cársicos estudados. Por exemplo, alguns dos mais analisados e conhecidos hidrossistemas cársicos na Europa possuem uma área inferior a 20 Km², tal como Allou e Badget (França – 12 e 13 Km², respectivamente); Fuente Mayor (Espanha – 20 Km²); Milandre (Suíça – 13 Km²).

²⁷ A divisão da curva de recessão em dois segmentos – curva de decréscimo e curva de esgotamento – imposta por este método leva a que, durante esta análise, apenas falemos em *escoamento rápido* e *escoamento de base*, não sendo possível identificar com clareza o *escoamento diferido*. No entanto, trata-se apenas de uma questão terminológica porque este último está inserido no *escoamento rápido*, o qual engloba a influência do episódio de recarga na totalidade.

Quadro II.IV.III.III – Parâmetros hidrodinâmicos das funções de infiltração ao longo da zona não-saturada (Ψ_i) e de esgotamento (Φ_i) para todas as recessões dos Olhos d'Água do Anços

Parâmetros	Unid.	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	Valores médios	
		2010	2011	2011/2012	2012	2013		
Parâmetros da função $\Psi_i(t)$	Q_{i0}	2,70	2,32	1,29	2,09	5,23	2,72	
	η	dias ⁻¹	0,011	0,025	0,045	0,051	0,010	0,028
	ϵ	dias ⁻¹	0,010	0,162	0,043	0,365	0,033	0,122
	t_f	dias ⁻¹	92	40	22	20	98	54
	i		0,96	0,72	0,84	0,52	0,92	0,79
	α	dias ⁻¹	0,004	0,010	0,005	0,004	0,005	0,006
Parâmetros da função $\Phi_i(t)$	Q_{i0}	m ³ /s	0,54	0,84	0,37	0,34	0,58	0,53
	q_0	m ³ /s	2,16	1,48	0,91	1,75	4,65	2,19
	Q_{i0}	m ³ /s	0,36	0,38	0,34	0,31	0,35	0,35
	k	anos	0,17	0,20	0,50	0,54	0,19	0,32
	Caudal médio anual	m ³ /s	1,95	1,11	0,42	1,69	1,29	
	Caudal máximo	m ³ /s	5,55	4,28	2,61	5,76	5,76	
Caudal mínimo*	m ³ /s	0,20	0,20	< 0,20	0,20	0,20		
Precipitação	mm	1278,3	1230,4	688,7	1464,6	1165,5		

Q_{i0} – caudal no início da recessão ($t = 0$); η – parâmetro que traduz a duração da recessão rápida (curva de crescimento). Representa a velocidade da circulação; ϵ – parâmetro que traduz a concavidade da curva de decréscimo, decorrente da heterogeneidade da circulação; t_f – duração da influência da infiltração no caudal da nascente cársica; Q_{i0} – caudal no início da descarga da zona saturada, quando o escoamento rápido se torna negligenciável, próximo de zero; Q_0 – caudal no início do esgotamento (apenas escoamento de base); $\Phi_0 = Q_0 - Q_{i0}$

* Pelas razões já apresentadas sobre a forma de obtenção dos caudais das exsurgências (Parte II, Capítulo I), o caudal mínimo considerado nos Olhos d'Água do Anços foi de 0,2 m³/s. No ano de 2011/2012, devido a grande seca invernal ocorrida, o caudal mínimo foi inferior, mas não foi possível fazer medições, daí o surgir como tendo sido inferior a 0,2 m³/s.

O primeiro aspecto que se salienta do Quadro II.IV.III.III é a correspondência, com o método anterior, no que se refere aos valores de α e α_3 e, mais significativo ainda, dos valores de t_i e de t_2 médios (Quadro II.IV.III.II). No que se refere ao coeficiente de esgotamento (α) os valores baixos revelam, inequivocamente, um esvaziamento lento da zona saturada. De acordo com Mangin (1975), valores de α entre 0,1 e 0,01 indicam que a zona saturada se esvazia de modo relativamente rápido, o que significa que o hidrossistema cársico apresenta uma rede de condutas bastante desenvolvido (sinónimo de uma elevada carsificação subterrânea). Por seu lado, os valores de t_i (e t_2 , no método anterior), que representam a duração total da resposta do hidrossistema a um episódio de recarga (atravessamento da zona não-saturada) são bastante elevados – 54 dias. Estes resultados mostram que se trata de um hidrossistema no qual a água proveniente da recarga pode influenciar durante bastante tempo o caudal da exsurgência principal.

O funcionamento hidrogeológico acima descrito é reiterado pelos valores muito baixos dos parâmetros ϵ e η . Assim, os resultados obtidos para o parâmetro ϵ (0,12 – próximo de zero) indicam o nítido predomínio de processos de infiltração difusa e de circulação lenta na zona não-saturada. Para além do conhecimento das características estruturais da região, esta ilação é suportada por vários estudos que concluem que quanto mais elevado o valor

317

de ϵ , mais rápida é a circulação, em virtude de uma rede densa e funcional de fracturas e condutas da zona não-saturada (Padilla *et al.*, 1994). Pelo contrário, quanto mais baixo o valor de ϵ , maior a interferência da zona não-saturada no processo de infiltração profunda, reduzindo a velocidade de circulação da água, a qual se fará ao longo de uma rede de fissuras extensa e bem desenvolvida que retarda, por isso, a descarga (Liu *et al.*, 2010).

Os resultados obtidos para o parâmetro η (condições de infiltração) são também bastante baixos (0,028 – muito próximos de zero), confirmando as anteriores considerações sobre o tipo de infiltração e de circulação na zona não-saturada e a considerável interferência desta zona do hidrossistema na relação *input-output*.

O facto de apenas se analisar uma exsurgência neste estudo e de não existir, por isso, possibilidade de enquadramento comparativo das características do hidrossistema de Degracias-Sicó, levou a que reuníssemos numa só tabela (Quadro II.IV.III.IV) alguns resultados em hidrossistemas cársicos já amplamente estudados. Este exercício permitiu enquadrar (por comparação) o hidrossistema em estudo e, a partir das interpretações apresentadas pelos autores (salvaguardando sempre as características e especificidades de cada hidrossistema) fundamentar as ilações por nós retiradas neste ponto do trabalho.

Essa comparação relativa permitiu uma primeira associação, fundamentada cientificamente, dos parâmetros obtidos por este método com o grau de carsificação do hidrossistema em estudo (principalmente a existência, ou não, de uma rede estruturada de condutas bem como algumas das suas características e funcionalidade), trabalho que vem já sendo realizado em numerosos estudos na Europa e na região circum-mediterrânica.

As condições de infiltração e circulação hipogea e, conseqüentemente, as características da zona não-saturada são também inferidas através da função i (assumida como representando o atraso da descarga em relação à infiltração)²⁸, cujas variações se explicam sobretudo pelos valores do parâmetro ϵ .

O valor médio da função i (0,79) mostra o predomínio da circulação de carácter lento e diferido, em particular nos anos mais chuvosos, como revelam os valores superiores a 0,9 nas recessões de 2010 e 2013 (os anos mais chuvosos do período em estudo) – Figura II.IV.III.7 e Quadro II.IV.III.III. Verifica-se, por isso, um importante atraso entre o momento em que a água se infiltra e o momento em que é drenada pelos Olhos d'Água do Anços, o que confirma o predomínio de infiltração difusa e de circulação subterrânea lenta e ainda a existência de retenção temporária confirmando, assim, as ilações anteriormente retiradas. Conclusões semelhantes são apresentadas, por exemplo, por Padilla *et al.* (1994); El-Hakim e Bakalowicz (2007); Ebrahimi *et al.* (2007); Liu *et al.* (2010).

²⁸ Apenas sublinhar que a função i varia bastante com a dimensão do hidrossistema, pelo que se deve ter bastante cuidado aquando da comparação entre hidrossistemas muito desiguais.

Quadro II.IV.III.IV – Parâmetros das funções de infiltração (Ψ_i) e de esgotamento (Φ_i) com aplicação ao conhecimento das características hidrodinâmicas e físicas dos respectivos hidrossistemas cársicos

Surgência / Hidrossistema	Área Precip. Km ²	Precip. mm	Caudal diário m ³ /h	Caudal médio m ³ /h	Caudal máx. m ³ /h	Parâmetros de função infiltração Ψ_i			Parâmetros de função Φ_i			k	f	Interpretação dos autores	
						α_1 m ³ /h	α_2 m ³ /h	α_3 m ³ /h	Q_{01} m ³ /dia	Q_{02} m ³ /dia	Q_{03} m ³ /dia				
Alcoy (Francia) ¹	12	1690	0,46	0,01	20,0	3,6	0,072	0,190	16	0,008	0,005	0,1	0,01	0,00	Circulação rápida na zona não-saturada (menor de todo de condutividade elevada transmissividade). Zona rito saturado pouco desenvolvida. Sistema com elevado grau de circulação.
Munshing (China) ²	81	1195	-	-	-	2,3	0,206	2,228	4	-	0,006	-	0,02	0,06	Infiltração rápida e pouca capacidade de armazenamento na zona saturada. Sistema cársico com elevado grau de circulação.
Ligei (China) ²	81	1195	-	-	-	2,3	0,102	0,779	9	-	0,010	-	0,15	0,06	Transmissão rápida das águas de infiltração. Foco no poder regulador da zona saturada. Sistema muito simplificado e bastante funcional.
Adchiana (Francia) ³	-	1395	1,57	0,07	21,4	8,6	0,025	1,170	20	0,820	0,015	2,2	0,04	0,08	Transmissão rápida das águas de infiltração. Foco no poder regulador da zona saturada. Sistema muito simplificado e bastante funcional.
Budget (Francia) ³	13	1690	0,53	0,05	9,4	2,2	0,008	0,029	36	0,112	0,002	2,1	0,24	0,28	Zona não-saturada com uma rede de condutividade menor desenvolvida do que a zona saturada. Sistema muito simplificado e bastante funcional.
Fonestecchi (Francia) ³	80	1690	-	-	-	5,1	0,029	0,971	39	1,003	0,003	24,3	0,27	0,27	Zona não-saturada com elevado grau de infiltração na circulação (circulação lenta). Zona saturada bastante avariada com ensaio lento.
Fuente Mayor (Espanha) ⁴	20	807	0,25	0,08	0,9	0,7	0,025	0,064	36	0,275	0,007	-	-	-	Próximo de circulação lenta, embora com a existência de galerias onde ocorre circulação rápida de ao longo do dia.
Oleas d'Agua de Alveza ⁴	-	-	10,4	0,20	5,8	10,4	0,012	0,188	90	0,700	0,006	15,4	0,21	0,72	Quase total de circulação lenta, embora com a existência de galerias onde ocorre circulação rápida de ao longo do dia.
Zorobad (Irão) ⁵	-	795	0,21	0,005	1,5	1,4	0,009	0,025	111	0,044	0,005	0,8	-	-	Quase total de circulação lenta, embora com a existência de galerias onde ocorre circulação rápida de ao longo do dia.
Genavre (Francia) ⁶	-	820	-	-	-	1,4	0,011	0,049	94	0,384	0,006	4,9	0,31	0,08	Quase total de circulação lenta, embora com a existência de galerias onde ocorre circulação rápida de ao longo do dia.
Ayler (Espanha) ⁷	250	510	2,35	0,60	9,3	-	0,037	0,069	97	2,144	0,003	71,4	1,64	0,06	Quase total de circulação lenta, embora com a existência de galerias onde ocorre circulação rápida de ao longo do dia.
Alca (Espanha) ⁸	150	1396	4,0	0,90	59,7	19,0	0,009	0,102	114	1,096	0,005	9	0,21	0,08	Quase total de circulação lenta, embora com a existência de galerias onde ocorre circulação rápida de ao longo do dia.
Munshing (China) ²	81	1195	-	-	-	2,1	0,014	0,045	81	-	0,001	-	1,21	0,08	Circulação moderada de circulação lenta e rápida. Zona saturada muito variada com longo poder de armazenamento e circulação lenta.
Alzandeh (Irão) ⁹	-	1010	0,39	0,04	1,4	0,6	0,009	0,009	111	0,370	0,007	6,9	-	0,40	Infiltração profunda lenta e zona saturada avariada, com um elevado poder de regulação. Existência de importantes galerias na zona saturada, com tempo de resposta de alguns dias para a 1.ª zona saturada.
Alzandeh (Irão) ⁹	-	796	0,34	0,03	1,0	0,8	0,007	0,055	143	0,220	0,004	5,4	-	0,40	Infiltração profunda lenta e zona saturada avariada, com um elevado poder de regulação. Existência de importantes galerias na zona saturada, com tempo de resposta de alguns dias para a 1.ª zona saturada.
Kalamoun (Irão) ⁹	-	1013	0,38	0,19	1,0	0,6	0,019	0,131	53	0,357	0,004	8,5	-	0,40	Zona não-saturada importante apenas quando precipitação é intensa. Evidente poder moderado da zona saturada.
Oleas d'Agua de Alveza ⁴	120	1000	1,3	0,2	5,8	2,7	0,028	0,122	54	0,530	0,006	8,2	0,32	0,70	Próximo de circulação lenta, embora com a existência de galerias onde ocorre circulação rápida de ao longo do dia.

Chappin (1996)

Yuan et al. (2010)

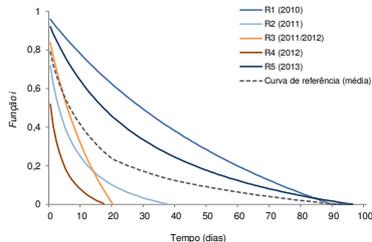


Figura II.IV.III.7 – Evolução diária da função i durante o período de decréscimo para todas as recessões estudadas nos Olhos d'Água do Anços

Este comportamento hidrodinâmico é independente dos valores de caudal no início da recessão (visível nos valores de Q_0) como se constata, por exemplo, nos casos de R_1 ($Q_0 = 2,7 \text{ m}^3/\text{s}; i = 0,96$), R_3 ($Q_0 = 1,3 \text{ m}^3/\text{s}; i = 0,84$) e R_5 ($Q_0 = 5,23 \text{ m}^3/\text{s}; i = 0,92$), pelo que pode ser considerada, definitivamente, como uma característica hidrodinâmica do maciço cársico em estudo. No entanto, mesmo sendo uma característica independente, intrínseca dos hidrossistemas cársicos, ela é acentuada nos anos húmidos pela maior quantidade de água que entra no sistema cársico.

No entanto, os valores de 0,52 na recessão de 2012 e 0,72 na recessão de 2011 (nitidamente dependentes dos valores mais elevados de ϵ) indicam que a infiltração e a circulação na zona não-saturada também podem apresentar um carácter de maior rapidez (menor atraso entre o *input* e o *output*). A função i parece, por isso, indicar também a existência de uma rede de drenagem subterrânea organizada e funcional onde a velocidade de escoamento é bastante mais elevada.

De notar, ainda, que a curva de referência (valores diários médios da função i) apresenta dois segmentos relativamente bem definidos, com declives bastante diferentes e cujo ponto de inflexão ocorre por volta dos 20 dias. A interpretação para esta forma da curva é que o primeiro segmento (de maior declive e mais curto) corresponde à já referida drenagem mais rápida que ocorre imediatamente após o episódio de recarga e o segundo segmento (de declive mais suave e mais longo) representa o escoamento rápido de carácter tardio (escoamento diferido), já sumamente identificado na série de caudais dos Olhos d'Água do Anços. Esta interpretação está em consonância com os resultados extraídos pelo método anterior (curvas de recessão múltiplas), no que respeita aos coeficientes α_1 e α_2 .

A análise dos vários parâmetros calculados pelo método de Mangin para o estudo do comportamento do escoamento rápido (ϵ , η e função i) no período de recessão reitera as

considerações já apresentadas, de que a espessa zona não-saturada do hidrossistema de Degraças-Sicó tem uma enorme importância na relação *input-output*, exercendo uma influência preponderante nas condições de infiltração e circulação hipogea e, consequentemente, no comportamento do caudal da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços.

A análise quantitativa da curva de recessão permite, também, estimar os volumes de água armazenados no início da recessão (V_0) disponíveis para drenagem como escoamento rápido (V_r – volume de infiltração, durante a fase de decrescimento) e como escoamento de base (V_d – volume dinâmico durante toda a recessão). Para além disso, permite estimar, separadamente, desde o início da recessão, a quantidade de escoamento rápido e de escoamento de base e respectivo contributo no total de caudal drenado pela exsurgência neste período (Quadro II.IV.III.V e Figura II.IV.III.2).

Quadro II.IV.III.V – Volume de infiltração (V_r), volume dinâmico (V_d), coeficiente k e função i para cada uma das recessões, calculados pelo método de Mangin (1975)²⁹

Recessão	V_r	V_d	V_0	V_r/V_0	V_d/V_0	V_r/V_d	k	i
	Mm ³	Mm ³	Mm ³	%	%	%		
R ₁ (2010)	6,7	10,5	17,1	39	61	64	0,17	0,96
R ₂ (2011)	1,0	7,0	8,1	13	87	15	0,20	0,72
R ₃ (2011/2012)	0,7	6,7	7,4	9	91	10	0,50	0,84
R ₄ (2012)	0,6	7,1	7,7	7	93	8	0,54	0,52
R ₅ (2013)	10,9	9,9	20,8	52	48	110	0,19	0,92
Valores médios								
Série completa	4,0	8,2	12,2	24	76	41	0,32	0,79
Sem 2011/2012	6,2	9,1	15,3	35	65	63	0,19	0,87

Numa perspectiva geral, pode observar-se, uma vez mais, o predomínio do escoamento de base no caudal dos Olhos d'Água do Anços (V_d médio de 76%) em detrimento do escoamento rápido (V_r médio de 24%). Estas percentagens parecem indicar a presença de reservas consideráveis³⁰, principalmente se atendermos ao facto de que este método fornece uma avaliação, por defeito, do volume de água armazenado no hidrossistema (Marsaud, 1996). O que se afigura, porém, relativamente surpreendente é a relação V_r/V_d revelando que o *Volume de infiltração* representa, em média, 41% do *Volume dinâmico*,

²⁹ O valor de V_0 (volume total de água no início da recessão, disponível para escoamento rápido e escoamento de base) não coincide com o valor de V_R (volume total real de água drenado durante a recessão, – Quadro II.IV.III.1.), sendo sempre superior. A justificação para este desfasamento reside na fórmula de cálculo de V_0 como explica Mangin (1994), situação, aliás, já referida na introdução teórica deste capítulo.

³⁰ Por exemplo, Marsaud (1996) considera valores médios de 4,9 Mm³ como sendo representativos de importantes reservas hídricas na zona saturada. Ebrahimi *et al.* (2007) fazem a mesma consideração para valores de 5,4 Mm³. Mangin (1994) estabelece, sem se referir a áreas dos hidrossistemas que para valores de V_0 inferiores a 0,1 Mm³ o carso molhado era considerado negligenciável; para valores entre 10 Mm³ e 100 Mm³, a zona saturada era realmente importante.

valor que sobe para 63% se excluirmos a recessão anómala do Inverno de 2011/2012. Esta realidade prova que uma parte bastante considerável do caudal desta exsurgência durante a recessão provém de infiltração recente, o que testemunha, de facto, a importância do escoamento diferido nos Olhos d'Água do Anços, o qual, como já vimos, se pode estender por várias semanas.

Na análise individual de cada recessão, verifica-se que há situações em que mais de 90% da água drenada durante a recessão foi escoamento de base, embora se possam considerar situações anómalas. Nos casos de R₃ e R₄ (91% e 93%, respectivamente) a explicação está nas características hidrometeorológicas de 2011/2012 (ano muito seco), em que o caudal dos Olhos d'Água do Anços proveio, quase na totalidade, da água armazenada em profundidade. No caso da recessão de 2011 (R₂), a explicação para a elevada percentagem V_r/V_0 está no facto de, apesar do total anual de precipitação ter sido elevado (cerca de 1200 mm), o volume de recarga foi consideravelmente mais baixo do que em anos com valores pluviométricos não muito diferentes (ver Quadro II.III.II).

O contributo do escoamento rápido e do escoamento de base no caudal diário médio ao longo do período de recessão encontra-se representado na Figura II.IV.III.8 e na Figura II.IV.III.9 sob a forma de volume diário drenado acumulado (valores absolutos e percentuais).

A Figura II.IV.III.8 apresenta, em primeiro lugar, o predomínio do escoamento de base sobre o escoamento rápido em termos quantitativos e de duração, o que revela uma enorme homogeneidade no comportamento do escoamento de base, permitindo concluir que se trata de um hidrossistema que, independentemente da recarga anual, se comporta sempre de modo semelhante – libertação lenta e prolongada da água armazenada. É possível verificar também a grande variabilidade, durante a recessão, do contributo e da duração do escoamento rápido no caudal dos Olhos d'Água do Anços.

No início da recessão, o escoamento rápido significa praticamente 100% da água disponível para drenagem, podendo a sua influência durar apenas 20 dias ou estender-se até aos 98 dias (como escoamento diferido) e representar de 13% a 66% do caudal drenado durante a recessão. De notar também que nos primeiros 20 dias de recessão, o contributo da zona saturada e dos sectores de menor condutividade hidráulica é muito reduzido (inferior a 20% do total do escoamento).

Para se obter uma visão de conjunto, representámos, no mesmo gráfico, o comportamento do escoamento rápido e do escoamento de base em todas as recessões – Figura II.IV.III.9.

A primeira constatação é, como já vimos, a enorme variação (quantitativa e de duração) do escoamento rápido e a sua grande dependência da precipitação, principalmente da sua

distribuição mensal, em particular dos quantitativos nos meses que antecedem o início da recessão. Neste ponto, duas situações merecem, pois, destaque:

(i) as recessões R_1 (2010) e R_5 (2013), correspondentes aos anos hidrológicos com os totais de precipitação e recarga mais elevados da série em estudo, apresentaram um escoamento rápido muito abundante no total da recessão, ou seja, uma parte significativa da água drenada nos Olhos d'Água do Anços correspondeu a escoamento rápido (39% e 52%,

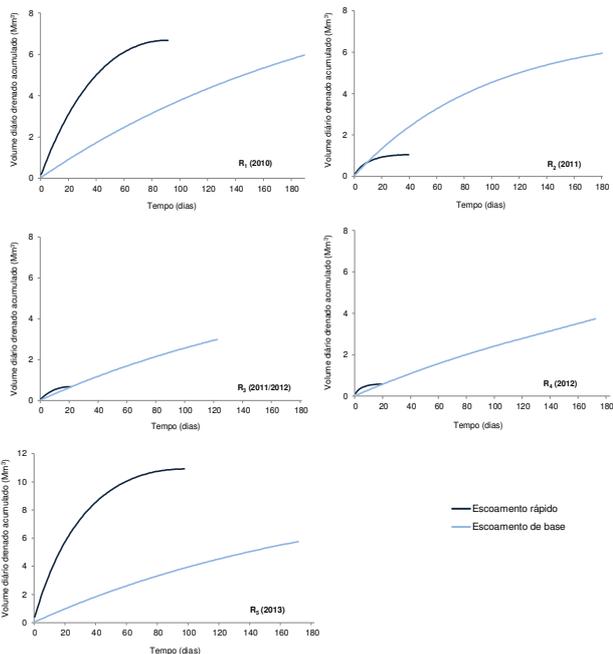


Figura II.IV.III.8 – Volume diário drenado acumulado, em Mm^3 , de escoamento rápido e escoamento de base, ao longo de cada recessão

323

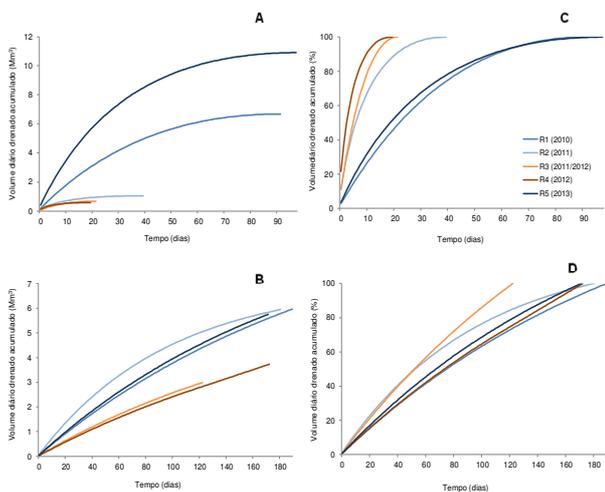


Figura II.IV.III.9 – Volume diário drenado acumulado, em Mm^3 , de escoamento rápido – A e de escoamento de base – B. Percentagem de volume drenado diariamente relativamente ao volume total armazenado para escoamento rápido – C e para escoamento de base – D

respectivamente, em 2010 e 2013). No caso de R_5 (2013), esta proporção é particularmente vincada, já que o volume de escoamento rápido foi superior ao volume de escoamento de base, representando, no total da recessão, maior percentagem do que o escoamento de base³¹ (52% versus 48%). Esta situação é justificada pelo valor anormalmente elevado de precipitação (e recarga) ocorrido no mês anterior ao início da recessão (Março de 2013), pelo que não consideramos que seja uma característica típica deste hidrossistema, encontrando-se mesmo bastante afastado do valor médio (V/V_0 médio de 24%). Estes

³¹ Poder-se-ia equacionar se a proporção escoamento rápido/escoamento de base se poderia alterar caso não se tivesse terminado a recessão a 30 de Setembro e se tivesse considerado o final efectivo da recessão, que, por norma se estende quase até ao final de Outubro. Contudo, as simulações efectuadas posteriormente com dados até 31 de Outubro e com valores de caudal mínimo ($0,2 m^3/s$) revelaram que essa proporção se mantém praticamente inalterada.

elevados valores de recarga no final da estação invernal em conjugação com as características físicas do hidrossistema foram responsáveis por essa elevada percentagem de escoamento rápido (sentido restrito) e, sobretudo, de escoamento diferido;

(ii) na recessão R_2 (2011), mesmo com valores de precipitação acumulada até ao início da recessão semelhantes aos dos anos supra-referidos, o escoamento rápido fez-se sentir apenas durante 40 dias, tendo sido o seu contributo para o total da recessão muito baixo (apenas 13%). Situação que surge ainda mais evidente quando nos focamos no valor absoluto do escoamento rápido, não muito distante dos quantitativos do ano muito seco (1,0 Mm^3 face aos 0,7 e 0,6 Mm^3 na recessão invernal 2011/2012 e em 2012, respectivamente) ou se relacionarmos o escoamento rápido com o escoamento de base (V/V_b – 15%, 10% e 8%, respectivamente nas recessões de 2011, Inverno de 2011/2012 e em 2012). A representação gráfica conjunta do volume diário drenado de escoamento rápido acumulado (em Mm^3 e em % – Figura II.IV.III.9) confirma a proximidade entre estas três recessões, o que se justificará, em 2011, pelos quantitativos de recarga bastante inferiores a 2010 e 2013, em razão dos dois meses mais chuvosos desse ano (Outubro e Abril) não terem coincidido com os meses de maior recarga.

No que se refere ao escoamento de base, as conclusões são semelhantes às registadas ao longo deste capítulo e que passam pela preponderância do escoamento de base face ao escoamento rápido e pela grande uniformidade do comportamento da zona saturada do hidrossistema, mesmo em contextos hidrometeorológicos muito contrastados, podendo-se, por isso, considerar como uma característica hidrodinâmica deste hidrossistema. A única excepção foi a recessão de 2013, onde o escoamento de base foi inferior ao escoamento rápido, pelas razões já apresentadas. Esta regularidade do comportamento hidrodinâmico da zona saturada confirma-se na representação gráfica do volume diário drenado acumulado de escoamento de base (em Mm^3 e em %), cuja evolução é praticamente idêntica nas cinco recessões estudadas, variando apenas nos valores quantitativos no ano de 2011/2012, o ano com menor caudal de toda a série em estudo.

A finalizar esta análise, o cálculo do parâmetro k , indicador do tempo de residência da água no interior do hidrossistema, definindo, por conseguinte, a extensão da zona saturada e o seu poder regulador. Juntamente com a função i , este parâmetro possibilita a classificação do hidrossistema em estudo.

De acordo com Mangin (1975) e Marsaud (1996), os valores de k para hidrossistemas cársicos deveriam ser sempre inferiores a 0,5 (ou seja, um tempo de residência da água na zona saturada inferior a meio ano). No entanto, como já sublinhámos, vários estudos posteriores provaram que, para hidrossistemas com zonas saturadas excepcionalmente desenvolvidas e elevados valores de V_s , o limite de 0,5 pode ser ultrapassado.

325

No caso em estudo, k varia entre 0,17 e 0,54, valores profundamente contrastados, mostrando, no primeiro caso, um baixo tempo de residência no interior do hidrossistema, que se justificará, à semelhança de 2013 ($k = 0,19$) e de 2011 ($k = 0,20$), pela permanente ocorrência de episódios de recarga e respectiva drenagem pelas exsurgências, tendo sido recessões que se caracterizaram por um escoamento rápido muito abundante e com grande valor percentual no volume total escoado durante a recessão. Contrariamente, em 2011/2012 e em 2012, os elevados valores de k ($k = 0,50$ e 0,54, respectivamente) revelam a existência de consideráveis reservas, águas com tempos de residência de cerca de meio ano, que asseguraram o caudal nesse ano seco. Reiteraram, por isso, a importância da água armazenada no interior do hidrossistema em estudo, que garantiu o carácter perene dos Olhos d'Água do Anços e das exsurgências a jusante, mesmo num ano com uma recarga muito baixa (179 mm, cerca de 25% da recarga média calculada para uma série de 28 anos).

Excepcionalmente o ano seco de 2011/2012, os valores de k mostraram que, em anos com quantitativos pluviométricos normais, a água drenada pelos Olhos d'Água do Anços tem um tempo de residência médio ligeiramente superior a dois meses, ou seja, a água drenada durante a recessão resulta do armazenamento ocorrido durante o período de recarga desse ano hidrológico, reforçando, assim, a importância da recarga no período invernal e no início da Primavera.

No entanto, devido ao reduzido número de recessões (apenas cinco) e aos valores encontrados serem bastantes díspares, cremos que ainda não se conseguem retirar conclusões finais e plenamente sustentadas sobre o tempo de residência da água no interior do hidrossistema em estudo e sobre o poder regulador da sua zona saturada. Porém, não podemos deixar de referir que a análise de k fez emergir novamente a dualidade e a heterogeneidade do funcionamento hidrodinâmico e das características físicas do sistema cársico em estudo, mostrando, simultaneamente, a existência de curtos tempos de residência das águas (drenagem funcional, semelhante à de hidrossistemas considerados como bem drenados) e de longos tempos de residência (típicos de hidrossistemas com zona saturada extensa, com grande capacidade de armazenamento e enorme poder de regulação) – Quadro II.IV.III.IV.

A representação gráfica conjunta dos valores médios k e i ($k = 0,32$, $i = 0,79$) mostra que o hidrossistema de Degraçias-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 cársicos complexos** (Figura II.IV.III.10), ou seja, sistemas com grandes dimensões e constituídos por vários subsistemas, caracterizados por um baixo grau de classificação 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.

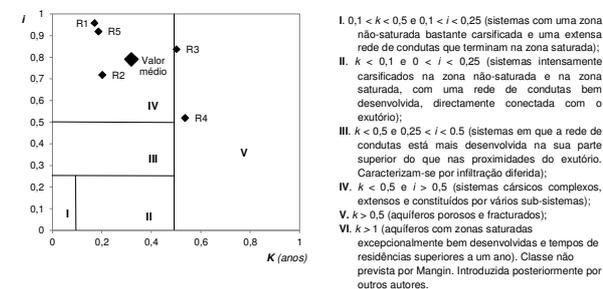
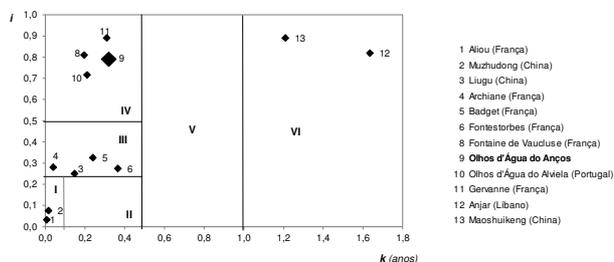


Figura II.IV.10 – Classificação do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó através da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços segundo a análise da curva de recessão (método de Mangin, 1975). Comparação relativa com outros sistemas cársicos (A) ³² e representação no esquema classificativo de todas as curvas de recessão analisadas (B)

Esta classificação reflecte, portanto, as características gerais do hidrossistema em estudo (algumas já conhecidas a partir de estudos de geomorfologia – Cunha, 1988) e resume as conclusões que vimos apresentando ao longo deste capítulo relativamente ao conhecimento mais aprofundado dessas hidrodinâmicas e, conseqüentemente, da estrutura interna do próprio hidrossistema de Degraças-Sicó.

³² Informação extraída do Quadro II.IV.III.IV.

A representação das recessões no período 2009/2010-2012/2013 mostra o posicionamento da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços, enquanto exutório principal do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó, em diferentes domínios, numa relação directa com as condições pluviométricas e de recarga que antecederam cada período recessivo. As recessões R_1 (2010) e R_5 (2013), após períodos de elevados quantitativos de recarga, enquadram-se claramente no domínio dos sistemas cársicos complexos, com elevados valores da função i (grande atraso entre a recarga e a descarga) e baixos valores de k (curtos tempos de residência da água no interior do hidrossistema). A recessão de 2011 (R_2) também se encontra neste domínio, embora com valores da função i consideravelmente mais baixos, pelas razões já anteriormente apresentadas.

As duas recessões que ocorreram durante o ano hidrológico 2011/2012 (R_3 e R_4) posicionam-se no limite, afastando-se da posição do valor médio, o que se explica pelo facto de ter sido um ano muito seco, em que a quase totalidade do caudal foi constituído por escoamento de base proveniente das reservas no interior do hidrossistema, pelo que os tempos de residência foram superiores a 6 meses ($k > 0,5$) e o poder regulador da zona saturada foi acentuado. Acresce, ainda, no caso da recessão invernal de 2011/2012, um valor elevado da função i .

Não obstante a limitação imposta pelo facto de apenas ter sido possível considerar uma única exsurgência nesta análise e de serem apenas cinco curvas de recessão (embora em contextos hidrometeorológicos distintos) foi possível retirar algumas ilações relativas ao funcionamento hidrodinâmico do hidrossistema e, conseqüentemente, às suas características físicas. Por conseguinte, há a destacar:

- (i) longa duração da recessão (entre 5 e 6 meses);
- (ii) predomínio do escoamento de base relativamente ao escoamento rápido no total do caudal drenado pelos Olhos d'Água do Anços durante a recessão;
- (iii) prolongada influência da recarga (escoamento rápido e escoamento diferido) no caudal desta exsurgência – cerca de 54 dias (tempo de atravessamento longo);
- (iv) infiltração predominantemente difusa e circulação lenta ao longo da zona não-saturada, independentemente dos quantitativos pluviométricos e de recarga acumulados até ao início da recessão;
- (v) a zona não-saturada exerce uma enorme influência sobre a infiltração e a circulação subterrânea, actuando como um poderoso filtro, pelo que se deduz que seja um domínio: (i) ou pouco carsificado (predomínio da circulação ao longo de uma rede densa de fissuras e fracturas de baixa condutividade hidráulica); (ii) ou bastante carsificado, mas com pouca funcionalidade (rede de drenagem com elevada condutividade hidráulica, mas pouco organizada ou deficientemente conectada). Esta última hipótese tem maior sustentação devido à existência, já referida anteriormente, de uma paleo-drenagem (de que o *trap-plein*

do Malhadoiro é testemunho), que revela uma carsificação polifaseada, ligada ao soerguimento do Maciço de Sicó;

(vi) presença de uma importante componente de escoamento diferido em razão do elevado tempo de atravessamento da zona não-saturada decorrente de características do próprio hidrossistema, como explicámos anteriormente;

(vii) esvaziamento lento e prolongado da zona saturada (baixo valor do coeficiente de esgotamento);

(viii) zona saturada extensa e bastante desenvolvida, em grande parte, abaixo do nível do exutório (tipo vaclusiano) com uma apreciável capacidade de armazenamento e que assegura o caudal dos Olhos d'Água do Anços na ausência de recarga;

(ix) existência de reservas consideráveis na zona saturada para drenar como escoamento de base ao longo da recessão (volume dinâmico médio de 8,2 Mm³, variando de 6,7 a 10,5 Mm³, consoante o ano hidrológico seja excedentário ou deficitário). 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 exurgências a jusante.

II. O funcionamento hidrodinâmico a partir da variação da temperatura e da condutividade eléctrica da água na exurgência dos Olhos d'Água do Anços

1. Enquadramento teórico e considerações metodológicas

O estudo do comportamento hidrogeológico dos hidrossistemas cársicos baseado em métodos de análise do hidrograma descreve e caracteriza os volumes de água que circulam no interior do hidrossistema bem como as condições gerais dessa circulação, fornecendo uma primeira análise semi-quantitativa. No entanto, não fornece informação mais pormenorizada, por exemplo, sobre os tempos de circulação (*water transit time*), os diferentes mecanismos de circulação, os tempos exactos de residência ou sobre o contributo de cada sector do hidrossistema para o caudal da surgência.

Enquanto o estudo da hidrodinâmica fornece informações sobre o modo como se faz a transferência de energia (transmissão de carga hidráulica) no interior do sistema cársico, o estudo geoquímico e termal das águas de poços ou surgências fornece ensinamentos complementares sobre a estrutura e o funcionamento dos hidrossistemas mediante a análise dos contrastes termodinâmicos e hidroquímicos da água que transita no interior do sistema (Bakalowicz, 1979; Plagnes, 1997; Mathevet, 2002).

Nesse sentido, torna-se necessário completar o estudo do funcionamento do hidrossistema cársico de Degraçias-Sicó com uma análise hidrogeoquímica, através da interpretação

329

da composição físico-química da água drenada pelas exurgências (condutividade eléctrica, temperatura da água, composição química e/ou isotópica), em particular pelos Olhos d'Água do Anços.

Infelizmente, consideramos que esta abordagem analítica sofreu um forte constrangimento dado não possuímos informação detalhada, e temporalmente contínua, de elementos químicos (por exemplo magnésio, cálcio, sódio, potássio, cloretos, sulfatos, bicarbonatos), isótopos (caso do ¹⁸Oxigénio) ou traçadores orgânicos naturais (total de carbono dissolvido, por exemplo). Esses dados permitiriam tirar conclusões sustentadas e inequívocas sobre o funcionamento hidrodinâmico e respectivas características internas do hidrossistema drenado pelos Olhos d'Água do Anços, à semelhança do que acontece na quase totalidade dos principais estudos que têm sido realizados, por exemplo López-Chicano *et al.* (2001); Batiot *et al.* (2003); Perrin (2003); Birk *et al.* (2004); Doctor *et al.* (2006); Liñán Baena *et al.* (2009); Barberá e Andreo (2010); Mudarra e Andreo (2011); Bicalho *et al.* (2012); Wong *et al.* (2012). Por exemplo, Luhmann (2011) faz uma excelente síntese sobre as valências dos parâmetros químicos nestes estudos e sobre as imensas possibilidades que oferece o uso combinado do hidrograma com a resposta química e termal das surgências (monitorização contínua): separação e conhecimento das proveniências da água que chega ao exutório; informação geral sobre o sistema de drenagem hipogea; estimação do volume das condutas e das suas características geométricas; conhecimento do modo como se faz a transferência de calor no interior dos sistemas cársicos; os locais de retenção temporária da água, entre outros.

As restrições ao nível da informação hidroquímica obrigaram a que centrássemos o nosso estudo apenas no comportamento da temperatura e da condutividade eléctrica da água dos Olhos d'Água do Anços, entendido como um dos métodos indirectos para o conhecimento da dinâmica hidrogeológica e das próprias características físicas do hidrossistema de Degraçias-Sicó.

Enquanto a condutividade eléctrica tem sido profusamente utilizada em estudos de hidrogeologia cársica, a resposta térmica das exurgências tem sido muito pouco explorada e analisada enquanto fonte de informação sobre as características internas e a hidrodinâmica dos sistemas cársicos. Tal como salientam Anderson (2005) e Saar (2011), que fazem uma revisão dos trabalhos elaborados neste âmbito, a temperatura da água (onde está implícito o *fluxo de calor*) já provou ser um poderoso traçador natural, capaz de fornecer informação preciosa sobre a circulação subterrânea e sobre as características físicas dos hidrossistemas cársicos. À semelhança da condutividade eléctrica, a temperatura é considerada um traçador natural não-conservativo, que pode ser afectado por inúmeros factores complexos como a duração e a intensidade da precipitação, as características da zona não-saturada e a interacção condutas-rocha.

Em termos metodológicos, procedemos à instalação de um CTD Diver datalogger (Eijelkamp Company) junto à principal saída da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços para que não houvesse alteração das características da água por agentes externos, designadamente precipitação, temperatura do ar e interferências antrópicas. O diver iniciou os registos a 1 de Outubro de 2011, medindo, em simultâneo, o caudal (através da pressão atmosférica), a condutividade eléctrica (mS/cm) e a temperatura da água (°C).

No caso da temperatura, porém, os registos aqui utilizados são mais antigos (desde 1 Junho de 2009) em virtude da sonda instalada nessa altura para registo do caudal dos Olhos d'Água do Anços. Esta sonda, uma sonda Level-Troll 500 tem uma precisão de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Embora não existam discrepâncias assinaláveis entre os valores da temperatura das duas sondas, por uma questão de coerência e para evitar erros de interpretação, utilizámos apenas os dados da Level-Troll 500 porque conseguíamos uma análise de quatro anos hidrológicos em vez de apenas dois (registos CTD Diver datalogger).

Os registos digitais da temperatura (em ambas as sondas) e da condutividade eléctrica foram efectuados a cada 20 minutos, de modo a termos uma cobertura temporal pormenorizada, para assim não se perder informação, principalmente aquando das mudanças hidrometeorológicas, em particular na resposta do hidrossistema a importantes episódios de recarga. Isto porque os comportamentos hidrodinâmico e hidroquímico das surgências são considerados um reflexo do funcionamento hidrológico do hidrossistema, o que fornece importante informação sobre os modos de circulação no interior do hidrossistema (e nos vários subsistemas) e, conseqüentemente, permite uma inferência mais rigorosa e fundamentada sobre as características físicas do próprio sistema cársico.

No que se refere à condutividade eléctrica, e porque o seu valor depende da temperatura, os registos têm de ser reportados como correspondendo a uma temperatura *standard*, que, no nosso caso, era de 25°C (definição da própria sonda).

Para além dos Olhos d'Água do Anços fizemos medições regulares de temperatura, condutividade eléctrica, pH e TDS em várias outras exsurgências permanentes e temporárias no bordo oeste do hidrossistema em estudo de forma a saber se existiam variações espaciais significativas nestes parâmetros.

No que se refere ao desenvolvimento e apresentação da análise, devido à grande quantidade de dados e à complexidade subjacente à interpretação dos resultados, começaremos por uma abordagem de carácter mais geral (dados diários da temperatura e da condutividade eléctrica da água) de modo a fornecer uma visão global do funcionamento do hidrossistema. Seguir-se-lhe-á um estudo mais pormenorizado dos referidos parâmetros (episódios específicos) em diferentes contextos hidrometeorológicos, tendo por base dados horários.

331

2. A variação diária da temperatura da água

A representação gráfica da temperatura diária da água drenada pelos Olhos d'Água do Anços ao longo dos quatro anos hidrológicos (Figura II.IV.IV.1) mostra comportamentos perfeitamente individualizados e muito nítidos:

- (i) o comportamento sinusoidal da temperatura da água segue, grosso modo, as variações sazonais da temperatura do ar, embora de forma muito mais atenuada e com um atraso de cerca de 1 mês;
- (ii) a variação da temperatura é sempre no sentido inverso à variação do caudal (coeficiente de correlação de Pearson de -0,944), exceptuando-se o período entre 20 de Fevereiro e 25 de Março de 2013, onde a uma subida do caudal correspondeu uma subida da temperatura da água;
- (iii) os desvios da temperatura estão relacionados apenas com eventos de recarga e a magnitude desses desvios depende da importância do episódio de recarga;
- (iv) após o período de cheia, a temperatura volta lentamente ao valor pré-evento, podendo esse processo demorar várias semanas ou até mais de 1 mês.

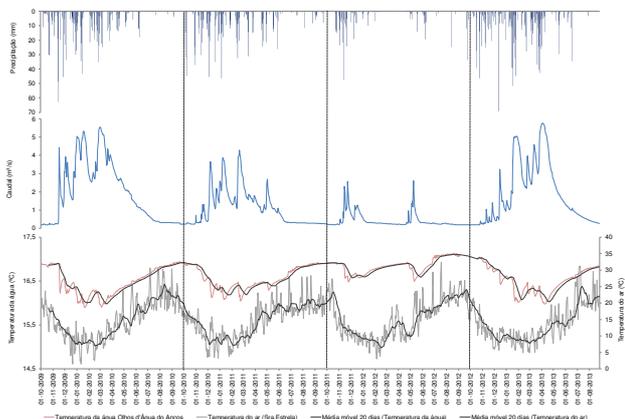


Figura II.IV.IV.1 – Representação dos valores diários de caudal (m^3/s) e da temperatura da água ($^\circ\text{C}$) nos Olhos d'Água do Anços, da temperatura diária média do ar ($^\circ\text{C}$) e precipitação diária (mm) na Sra. da Estrela nos anos hidrológicos de 2009/2010 a 2012/2013

A Figura II.IV.1 mostra dois padrões muito bem definidos no comportamento da temperatura da água escoada pelos Olhos d'Água do Anços: variações de curto e de longo prazo, correspondendo as primeiras a variações de alguns dias induzidas por recarga do sistema e as de longo prazo correspondendo a variações sazonais. Resultados semelhantes foram encontrados, por exemplo, nos trabalhos de Benderitter *et al.* (1993) e de Luhmann (2011).

Em primeiro lugar, constata-se que a temperatura da água segue as variações sazonais da temperatura do ar (Figura II.IV.1 e coeficiente de correlação de Pearson de 0,502 – Quadro II.IV.1 A), não reflectindo, contudo, proporcionalmente, as oscilações da temperatura exterior. Esta constatação revela, por um lado, que a água permanece no interior do hidrossistema durante algum tempo (retenção temporária), o suficiente para efectuar trocas de calor e adquirir equilíbrio térmico com a rocha. Por outro lado, expressa uma circulação profunda, afastada da superfície e, por isso, de carácter marcadamente vertical, onde as variações térmicas de curta duração do ar exterior (por exemplo dia/noite) não têm repercussão directa na temperatura da rocha (interior do sistema cársico) e no comportamento da temperatura da água.

Esta última afirmação é fundamentada pelas conclusões de Renner e Sauter (1997), Kogovsek e Petric (2010) para hidrossistemas cársicos no sul da Alemanha e no sudoeste da Eslovénia, respectivamente, e, segundo as quais, a influência da temperatura do ar não se estende para além dos 100 m de profundidade. Luetscher e Jeannin (2004) referem igualmente 100 m, embora sublinhem que alguns autores, a partir da medição da temperatura do ar em grutas, estendem essa influência às primeiras centenas de metros da zona não-saturada, profundidade que dependerá do clima e do grau de carsificação do maciço calcário. No mesmo âmbito, Villarreal e Cuchi (2004) constataram, no nordeste de Espanha, uma dependência diária da temperatura da água da exsurgência em relação aos valores diários da temperatura exterior (atraso de apenas 3 horas), inferindo, a partir daí, que a circulação da água era relativamente superficial, a uma profundidade onde ainda se fazia sentir uma forte influência da temperatura do ar de superfície.

Na Figura II.IV.1 é graficamente identificável um desfaseamento de cerca de 1 mês (26 dias, mais precisamente³³) entre mínimos e máximos de temperatura do ar/temperatura da água, sendo que, durante esse período, estas variáveis estão mesmo em contra-ciclo. Este desfaseamento está relacionado com o aquecimento/arrefecimento do interior do sistema cársico, que, como escreve Luhmann (2011), é uma função da profundidade do aquífero versus a profundidade de penetração dos sinais sazonais da temperatura exterior através da circulação da água (*convective heat flow*).

³³ Obtido por correlação cruzada entre os valores diários da temperatura da água e da temperatura do ar.

Quadro II.IV.1 – Coeficientes de correlação entre os valores diários das variáveis caudal e temperatura da água nos Olhos d'Água do Anços, temperatura do ar e precipitação na Sra. da Estrela (A) e parâmetros estatísticos de tendência central e de dispersão da temperatura diária da água para os Olhos d'Água do Anços (B) para o período 2009/2010 – 2012/2013 (medição contínua). Parâmetros estatísticos idênticos para as principais exsurgências do vale do rio Anços (C) – medições pontuais

A	Temperatura da água	Temperatura do ar	Precipitação	Caudal
Temperatura da água	1	0,502	-0,144	-0,894
Temperatura do ar	0,502	1	-0,204	-0,452
Precipitação	-0,144	-0,204	1	0,197
Caudal	-0,894	-0,452	0,197	1

B	2009/2010	2010/2011	2010/2011	2011/2012	2012/2013	Média
Máximo (°C)	16,9	16,9	16,8	16,8	17,0	16,9
Mínimo (°C)	15,9	16,1	16,2	15,7	16,0	16,0
Máximo-mínimo (°C)	1,0	0,8	0,6	1,1	1,1	0,9
Média (°C)	16,4	16,5	16,6	16,2	16,6	16,5
Desvio padrão (°C)	0,32	0,25	0,14	0,28	0,29	0,25
Coefficiente de flutuação	1,06	1,05	1,04	1,07	1,07	1,06
Coefficiente de variação (%)	1,94	1,51	0,85	1,74	1,73	1,51

C	Rio da Estrada	Olhos d'Água do Anços	Caruncho	Casal dos Morcegos	Fonte da Rainha	Ourão
Máximo (°C)	18,4	17,4	19,1	18,0	17,1	18,7
Mínimo (°C)	16,2	15,8	17,2	16,2	16,6	16,9
Máximo-Mínimo (°C)	2,2	1,6	1,9	1,8	0,5	1,8
Média (°C)	17,5	16,5	18,2	17,0	16,9	17,6
Desvio padrão (°C)	0,8	0,4	0,6	0,6	0,2	0,5
Coefficiente de flutuação	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1
Coefficiente de variação (%)	4,8	2,6	3,3	3,5	0,9	2,7

Coefficiente de flutuação = Caudal máximo/Caudal mínimo
 Coeficiente de variação (%) = (Desvio padrão/média)*100

O transporte convectivo de calor é extremamente importante no caso do hidrossistema em estudo, já que é a única forma do sinal térmico do ar se propagar em profundidade, dadas as características da parte superior do hidrossistema (epicarso) e a sua espessura considerável. Esta realidade é visível, por exemplo, na mudança de estação, quando os 26 dias de atraso aumentam quase para o dobro, dado que a tendência do comportamento da temperatura do ar não é acompanhada por precipitação e infiltração suficientes para o transporte do (novo) sinal térmico para profundidades muito superiores às possíveis apenas

por processo de condução (*conductive heat flow*)³⁴. Esta situação é particularmente evidente na transição Verão/Outono, sempre que a descida da temperatura do ar não é acompanhada por infiltração suficiente devido à escassa precipitação que se tem registado no início do Outono. Deste modo, ao mesmo tempo que se verifica uma descida substancial da temperatura diária média do ar, continua a verificar-se uma subida ou estabilização da temperatura da água devido ao equilíbrio térmico resultante do elevado tempo de residência da água no interior do hidrossistema em estudo.

A propagação em profundidade das modificações sazonais da temperatura atmosférica é efectuada com base em circulação hipogea predominantemente lenta, em que a água (proveniente de infiltração difusa) vai realizando trocas de calor com a rocha, ao longo do seu percurso. Outra explicação poderá ser a retenção temporária que ocorrerá em alguns sectores da zona não-saturada, processo que, ao mesmo tempo que permite trocas de calor água-rocha, estabelecendo um maior equilíbrio térmico entre ambas, não ocorre durante tempo suficiente para que seja totalmente eliminado o sinal térmico transportado pela água recém-infiltrada, que, assim, o transporta ao longo da zona não-saturada.

O outro padrão térmico visível na Figura II.IV.IV.1 refere-se à descida da temperatura da água, aquando de episódios de recarga intensa, em que a entrada de quantidades elevadas de água, provoca, com um atraso de 1 a 2 dias (consoante a quantidade e intensidade de precipitação), a descida da temperatura da água da exurgência (entre 0,7°C e 0,2°C). Estas flutuações parecem confirmar a existência de circulação rápida ao longo da zona não-saturada (canais preferenciais de drenagem), com um curto tempo de atravessamento do hidrossistema, levando a que, por um lado, não exista tempo suficiente para trocas de calor efectivas com a rocha (e para o mínimo de equilíbrio térmico entre ambas) e, por outro lado, permita que a água recém-infiltrada conserve, em parte, o sinal térmico proveniente da superfície.

Esta situação estará presente em particular no sector oeste da área de estudo, onde, tal como referido anteriormente, o elevado grau de carsificação do Maciço de Sicó terá proporcionado condições para o desenvolvimento de uma rede de condutas, em parte funcional, nas quais a água circula com muito maior velocidade do que no restante hidrossistema. Para além disso, este sector oeste apresenta uma carsificação superficial mais desenvolvida e a descoberto (sendo a área com maior densidade de formas cársicas

³⁴ Segundo Luhmann (2011), as flutuações térmicas em profundidade (em resultado apenas de processos de condução térmica) a partir das flutuações da temperatura da superfície apenas se sentirão na rocha pouco para além de uma 'camada' superficial que o autor calculou ser de cerca de 3 m de espessura apenas. Por isso, apenas serão observadas em aquíferos muito pouco profundos. Luetscher e Jeannin (2004) referem que essa 'camada heterotérmica' não ultrapassará os 5 m, dependendo, contudo, do grau de carsificação superficial do maciço, que permitirá a maior ou menor circulação do ar nessa camada.

inventariadas e exploradas) pelo que reúne condições para a ocorrência pontual de infiltração concentrada (através da abertura dos algares à superfície).

Apesar deste último comportamento, as oscilações da temperatura da água dos Olhos d'Água do Anços são bastante pequenas, como revelam, por exemplo, os 0,9°C³⁵ de diferença entre a máxima média e a mínima média anuais, o valor muito baixo do desvio padrão, do coeficiente de flutuação e do coeficiente de variação (0,25%, 1,06 e 1,51%, respectivamente) – Quadro II.IV.IV.1 B. Esta realidade é, aliás, corroborada pelo comportamento da temperatura da água de todas as exurgências (permanentes e temporárias) do vale do rio Anços que fomos medindo, periodicamente, ao longo do trabalho de campo (Quadro II.IV.IV.1C). Para além de uma grande uniformidade da temperatura detectada no conjunto das exurgências, também se verifica que as diferenças existentes não são consideráveis. Apenas de salientar alguns valores mais elevados (superiores a 18°C) da água nas exurgências do Caruncho, Rio da Estrada e Ourão, mas que apenas reflectem a sua forma em represa, não devendo, por isso, ser considerados como indicadores de características dos subsistemas por elas drenados.

Variações tão baixas justificam-se por: (i) inexistência de recarga alóctone; (ii) insignificância da recarga concentrada (apenas pela abertura superficial dos algares); (iii) grande espessura do hidrossistema (cerca de 300 m), sendo que o nível piezométrico se situará a mais de 200 m abaixo da superfície, o que coloca esta zona do hidrossistema longe da influência 'directa' da temperatura do ar da superfície; (iv) predominio de circulação lenta na zona não-saturada através de fracturas e fissuras; (v) existência de uma importante componente de escoamento diferido; (vi) possível existência de armazenamento temporário na zona epissaturada, o que contribuiu para uma maior homogeneidade térmica da água.

Apesar de, na generalidade, a água drenada pelos Olhos d'Água do Anços apresentar uma relativa uniformidade térmica, quando analisada mais em pormenor, vê-se que regista flutuações (desvios negativos que podem atingir 0,7°C) durante os períodos de maior recarga. De acordo com a literatura da especialidade, essas variações são atribuídas à água da recarga, recém-infiltrada, que circula rapidamente na zona não-saturada através de uma rede funcional de condutas, sendo que a interacção com a rocha é muito breve, pelo que o sinal térmico da superfície, transportado pela água da recarga, vai atingir o exutório, interferindo na temperatura da água drenada pela exurgência.

Assim sendo, vemos que a temperatura da água numa surgência (enquanto variável de compreensão da relação *input-output*) é influenciada por duas importantes entidades: a temperatura da água de recarga e o modo como ocorre essa recarga e as características da

³⁵ Em comparação com valores presentes em diversos estudos da especialidade, este valor pode considerar-se baixo (por exemplo Liñán Baena *et al.*, 2009 – próximo de 2,5°C; Kogovšek e Petric, 2010 – cerca de 18°C; Luhmann *et al.*, 2011 – 2,5°C; Mudarra e Andreo, 2011 – quase 2°C).

zona não-saturada. Sendo um traçador natural não-conservativo (alteração por interacção com a rocha), a temperatura da água numa surgência permite saber a velocidade de circulação (ou seja, o tempo necessário para atravessar a zona não-saturada), o modo (difuso ou concentrado) como ocorreu essa circulação e, assim, indirectamente conhecer a estrutura e organização internas do hidrossistema.

O comportamento da temperatura da água nos Olhos d'Água do Anços parece, pois, estar mais relacionado com o processo de recarga (difusa ou concentrada) e com o modo de circulação da água na zona não-saturada (detectado nas variações do caudal) do que com as oscilações da temperatura do ar (coeficiente de correlação temperatura da água/caudal de -0,894; coeficiente de correlação temperatura da água/temperatura do ar de 0,502). Esta constatação está de acordo com as conclusões de Jeannin (1990) e de Renner e Sauter (1997) de que as características térmicas da água que chega à zona saturada não são controladas pela temperatura da água que se infiltra, mas pelo gradiente geotérmico do hidrossistema e pela condutividade hidráulica da zona não-saturada. Segundo estes últimos, o grau de trocas de calor é controlado pelas características térmicas da rocha, pelas características das condutas (como o comprimento, o diâmetro) e pela velocidade de circulação da água.

Para comportamentos térmicos semelhantes aos que ocorrem nos Olhos d'Água do Anços (estabilidade térmica generalizada com pequeno desvio após episódios de recarga), Renner e Sauter (1997) elencam três características obrigatórias da zona não-saturada para que se verifiquem tais comportamentos:

- (i) a zona não-saturada tem de ser suficientemente espessa para interferir nas características térmicas da água que entra no hidrossistema;
- (ii) é necessário tempo de residência suficiente no interior do hidrossistema (na zona não-saturada ou na epissaturada) para que a água de recarga se adapte à temperatura da rocha (retenção temporária e circulação lenta);
- (iii) por outro lado, parte da circulação desde a superfície até ao exutório tem de ocorrer ao longo de uma rede funcional de canais preferenciais (rede de condutas, fracturas alargadas) com celeridade suficiente, de modo a evitar o equilíbrio térmico entre a água e a rocha.

No mesmo sentido, Luhmann (2011) e Luhmann *et al.* (2012) afirmam que o comportamento térmico da água numa surgência é largamente determinado pela eficácia das trocas de calor água-rocha ao longo do seu percurso subterrâneo. Nos seus trabalhos, os autores quantificaram essa 'eficácia' e mostraram que uma elevada eficácia (troca de calor efectiva) é produzida devido a percursos extensos e velocidades de circulação baixas ao longo de uma rede de condutas muito estreitas e de fracturas; enquanto uma baixa eficácia (ausência de trocas de calor) é produzida por condutas largas ou percursos curtos, combinados com

337

uma circulação rápida, o que permite que o sinal térmico da água de recarga se desloque ao longo do sistema de condutas até à surgência. Esta última situação constata-se nas descidas da temperatura da água no seguimento de eventos pluviosos abundantes e concentrados. A grande homogeneidade da temperatura da água nos Olhos d'Água do Anços (que já havíamos salientado) ocorre mesmo durante o período mais frio do ano (Novembro a Fevereiro), quando a água que se infiltra se encontra a uma temperatura baixa. Os sinais térmicos do *input* são, assim, tremendamente distorcidos, revelando o predomínio de uma elevada eficácia das trocas de calor entre a rocha e a água recém-infiltrada.

Esta atenuação e profunda alteração do sinal térmico do *input*, mesmo durante a época de maior recarga, parecem não confirmar a existência de circulação rápida na sequência de intensos e abundantes episódios pluviométricos como evidenciado até ao momento neste estudo. No entanto, alguns estudos aprofundados sobre o tema ajudam a explicar esta suposta contradição, confirmando a eficácia térmica e, simultaneamente, a existência de circulação rápida na zona não-saturada, visível no hidrograma da exsurgência e comprovada através da análise de séries temporais. Assim:

(i) a resposta, segundo Luhmann (2011), estará no modo difuso como ocorre a recarga (infiltração difusa), o que origina que a água se desloque através de meios termicamente muito mais eficazes, como sejam o solo, o epicarso, a matriz da rocha e pequenas fissuras e fracturas antes de entrar no sistema de condutas³⁶. Neste seu trabalho, o autor sublinha, ainda, após experiências realizadas com traçadores artificiais, que a existência de um padrão claro de trocas efectivas de calor água-rocha não implica que não existam caminhos de circulação preferencial (circulação rápida, em condutas);

(ii) por seu lado, Luetscher e Jeannin (2004) referem que a explicação para a influência térmica da zona não-saturada poderá também estar relacionada com o facto de essa zona (em particular da parte mais profunda em hidrossistemas espessos) estar pouco conectada com a superfície, pelo que a circulação do ar vai sendo progressivamente reduzida. Devido à menor ventilação, as trocas de calor são feitas com a água em circulação, o que pode originar uma enorme interferência nas características térmicas dessas águas. A ocorrência desta interferência é favorecida pelo facto da rede de drenagem hipogea em maiores profundidades se ir concentrando num menor número de condutas que, mesmo assegurando a circulação rápida, não impedem as trocas de calor com a rocha.

³⁶ Segundo Luhmann (2011) a heterogeneidade dos hidrossistemas cársicos faz com que contemham tanto percursos de grande eficácia quanto de ineficácia térmica, pelo que sublinha que a resposta térmica de uma exsurgência é fortemente influenciada pela forma de recarga. A recarga localizada tipicamente drena ao longo de condutas (termicamente pouco eficazes) enquanto que a recarga difusa se desloca através de estruturas termicamente muito mais eficazes (o solo, o epicarso, a matriz da rocha e pequenas fissuras e fracturas) antes de entrar na rede de condutas.

Qualquer um dos argumentos apresentados mostra que o facto da zona não-saturada alterar profundamente o sinal térmico da água infiltrada, não implica necessariamente que não exista circulação rápida em condutas ou que esta se faça apenas de modo lento e difuso. Esta explanação consubstancia a ideia de que estamos perante um hidrossistema com um funcionamento duplo: uma enorme capacidade de filtração (neste caso visível no sinal térmico da água) com inegável predomínio de circulação lenta e escoamento diferido (confirmado pelos métodos de análise anteriores), mas onde existirá circulação rápida, ao longo de uma rede organizada de canais preferenciais.

A inventariação espeleológica de algumas cavidades e galerias na zona epicársica e a referência a uma 'rede bem desenvolvida de galerias' em resultado de uma 'carsificação profunda bem desenvolvida' presente no trabalho de Cunha (1988) provam a existência efectiva de condições geomorfológicas para a ocorrência de circulação rápida, pelo menos em parte da zona não-saturada. Acresce, ainda, a constatação *in loco*, da elevada carga sólida em suspensão na água da exurgência dos Olhos d'Água do Anços (Figura II.IV.IV.2) a 17 de Novembro de 2009 acompanhando um extraordinário aumento do caudal (em 24 horas, o caudal passou de 0,7 m³/s para 4,1 m³/s), evidenciando circulação rápida. A turvação da água escoada, patente na Figura II.IV.IV.2, prova segundo vários autores (por exemplo Bouchaou *et al.*, 2002) a ocorrência de circulação rápida na zona não-saturada.

A excepcional quantidade de precipitação ocorrida nos dois dias anteriores (111 mm) terá sido responsável pelo surgimento desses sedimentos nos Olhos d'Água do Anços, juntamente com um abaixamento significativo da temperatura da água, provando, assim, não só a existência de circulação rápida mas também que essa circulação pode, inclusive,



Figura II.IV.IV.2 – Sedimentos em suspensão indicando a existência de circulação hipogea em regime turbulento (em condutas), no seguimento de recarga abundante e concentrada (111 mm de precipitação nos dois dias anteriores). Dia 17/11/2009, 12h; caudal instantâneo: 4,56 m³/s

339

ter um carácter turbulento. Situações semelhantes de chegada de sedimentos aquando de um forte aumento da descarga foram documentadas por Sauter (1992) e Toran *et al.* (2006) que concluíram que elevados volumes de recarga eram capazes de remover e transportar sedimentos armazenados nas condutas.

Não obstante a sua utilidade e capacidade de fornecer informação sobre a hidrodinâmica cársica e sobre as características físicas da zona não-saturada, o facto de a temperatura ser um traçador natural altamente reactivo e de resposta mais 'amortecida' e mais demorada (devido à interacção água/rocha), faz com que devam ser utilizados, em simultâneo, outros elementos físico-químicos na análise *input-output* e no conhecimento dos sistemas de circulação subterrâneos. Vários estudos têm sido recentemente concretizados nesse âmbito, por exemplo López-Chicano *et al.* (2001), Grasso e Jeannin (2002), Desmarais e Rojstaczer (2002); Grasso *et al.* (2003), Birk *et al.* (2006), Perrin *et al.* (2007), Liñán Baena *et al.* (2009), Mudarra e Andreo (2011), Bicalho *et al.* (2012), Luhmann *et al.* (2012).

Nestes estudos, a análise das variações da temperatura da água é sempre realizada em paralelo com o comportamento da condutividade eléctrica, dos principais iões e de traçadores naturais, de modo a fornecer uma perspectiva conjunta e sólida das características físico-químicas das águas drenadas pelas surgências. Esta perspectiva metodológica de análise integrada (utilizando vários métodos) tem por objectivo conhecer as diferentes proveniências das águas, o modo de infiltração, o tipo de circulação hipogea, os tempos de residência, entre outros aspectos do funcionamento hidrodinâmico de um sistema cársico.

No presente estudo, juntamente com a análise da temperatura, efectuamos também o estudo pormenorizado do comportamento da condutividade eléctrica apenas para os dois últimos anos hidrológicos em análise (2011/2012 e 2012/2013), não tendo sido possível, tal como assinalámos anteriormente, desenvolver uma investigação mais aprofundada no domínio da variação de elementos hidroquímicos em diferentes contextos hidrometeorológicos, como seria desejável e como pretendido inicialmente.

3. Condutividade eléctrica

Os dois anos hidrológicos de monitorização da condutividade eléctrica nos Olhos d'Água do Anços foram, em termos hidrometeorológicos, muito diferentes, tendo sido o ano de 2011/2012 muito seco e o de 2012/2013 húmido. Esta situação teve como vantagem o facto de ter sido possível, apenas com dois anos, verificar o comportamento físico-químico da água da exurgência em estudo e retirar algumas ilações sobre as características hidrodinâmicas e propriedades físicas do hidrossistema em contextos hidrometeorológicos

bastante contrastados. No entanto, dificultou bastante o estabelecimento de padrões gerais e característicos no funcionamento hidrológico do hidrossistema em estudo (à semelhança do que ocorreu nos dois outros métodos utilizados neste trabalho).

O valor médio de condutividade eléctrica foi de 533 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (água mediamente mineralizada)³⁷ com valores que oscilaram entre os 380 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e os 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (em 2011/2012) e os 474 $\mu\text{S}/\text{cm}$ os 652 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no ano seguinte, revelando, assim, uma ampla oscilação da condutividade eléctrica durante o ano hidrológico. Essa variação foi particularmente elevada no ano seco, com uma flutuação de 270 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (coeficiente de variação superior a 16%) enquanto no ano de 2012/2013 a flutuação foi apenas de 178 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (pouco mais da metade do ano transacto), com um coeficiente de variação próximo dos 8% – Quadro II.IV.IV.II

Quadro II.IV.IV.II – Parâmetros estatísticos correspondentes aos valores de condutividade eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), por ano, nos Olhos d'Água do Anços (2011/2012 e 2012/2013) – comparação com os parâmetros estatísticos do caudal

	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Coefficiente de flutuação
Condutividade eléctrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\mu\text{S}/\text{cm}$	%	$\mu\text{S}/\text{cm}$
2011/2012	650	380	534	80,7	15,1	270
2012/2013	652	474	518	43,2	8,3	178
Série completa	651	427	526	64,9	12,3	224
Caudal	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s		m^3/s
2011/2012	2,6	0,2	1,4	0,4	28,8	2,4
2012/2013	5,8	0,2	3	1,7	55,5	5,6
Série completa	4,2	0,2	2,2	1,0	42,2	4,0

Esta disparidade entre os dois anos em estudo dificultou a análise, embora se deva considerar como mais representativos os valores apresentados em 2012/2013, dado que o ano de 2011/2012 foi anormalmente seco, pelo que não será de estranhar que os parâmetros estatísticos se desviem bastante da média e sejam menos representativos do comportamento do hidrossistema em estudo.

No entanto, e numa visão global sobre as águas drenadas pelos Olhos d'Água do Anços, parece existir uma aparente contradição entre uma flutuação considerável dos valores absolutos da condutividade (valor médio de 224 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e um valor de coeficiente de variação médio relativamente baixo (12,3%).

De acordo com vários estudos elaborados para hidrossistemas cársicos no sul de Espanha (López-Chicano *et al.*, 2001; Liñán Baena *et al.*, 2009; Mudarra e Andreo, 2011),

³⁷ López-Chicano *et al.* (2001) referem o valor de 368 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como sendo um valor baixo e o de 725 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como sendo relativamente alto. Do mesmo modo, Mudarra e Andreo (2011) referem que as águas de nascentes cársicas com valores médios inferiores a 389 $\mu\text{S}/\text{cm}$ são apenas levemente mineralizadas.

tais valores de coeficiente de variação são característicos de hidrossistemas pouco carsificados (inexistência de sistemas subterrâneos de condutas) ou com carsificação pouco funcional, onde predomina a circulação difusa. Isto porque uma carsificação pouco desenvolvida e/ou pouco funcional promove a acumulação e homogeneização das águas de recarga no interior do hidrossistema com conseqüente redução da variação da mineralização (Lepiller, 1980, citado por Auzmendi, 1988). Por outro lado, a existência de uma carsificação desenvolvida e funcional permite o aparecimento, no exutório, de águas com diferentes características, promovendo uma maior variação nos valores da condutividade eléctrica, sendo, por isso, um reflexo do tipo de circulação interna no hidrossistema.

Esta aparente contradição é explicada novamente pela, já constatada, dualidade do funcionamento hidrológico do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó, que se comporta como um poderoso filtro, com um enorme poder regulador e grande capacidade de armazenamento, mas que, em situações de elevada recarga possui uma resposta rápida. Assim sendo, a água drenada pelos Olhos d'Água do Anços é, predominantemente, água com significativa mineralização devido ao tempo de residência no interior do sistema cársico (resultado da sua capacidade de armazenamento e de retenção temporária). Contudo, na sequência de elevados quantitativos de recarga, a circulação rápida ao longo da rede de canais preferenciais na zona não-saturada faz chegar à exurgência águas menos mineralizadas, originando a descida da condutividade eléctrica.

3.1. O comportamento diário

A evolução temporal da condutividade eléctrica nos Olhos d'Água do Anços foi bastante diferente de um ano para o outro, o que se justifica pelas características hidrometeorológicas contrastadas destes dois anos (Figura II.IV.IV.3). Não obstante os aspectos específicos do comportamento da condutividade eléctrica em cada um dos anos, a tendência geral foi a de que o aumento da descarga na exurgência foi acompanhado sobretudo pela subida dos valores de condutividade eléctrica, a qual decresce posteriormente, quando o caudal diminui substancialmente, numa relação bastante complexa e instável (coeficiente de correlação caudal-condutividade de 0,164) – Quadro II.IV.IV.III.

O aumento da condutividade eléctrica durante o período de águas altas, embora pouco comum, devido ao efeito diluidor das águas de recarga ocorreu em ambos os anos (coeficiente de correlação caudal-condutividade de 0,465 em 2011/2012 e de 0,241 em 2012/2013). De acordo com a literatura da especialidade, a explicação residirá no facto de se tratar de um hidrossistema onde existirão sectores com carsificação menos desenvolvida,

onde predomina a circulação difusa e um regime hidrológico de efeito-pistão³⁸, que força a água armazenada na zona saturada a fluir até à exsurgência em períodos de elevada recarga. Interpretação apresentada, por exemplo, por Raesi e Karami (1997) e Mohammadi e Field (2009) em aquíferos cársicos no Irão e por Mudarra e Andreo (2011) no sul de Espanha.

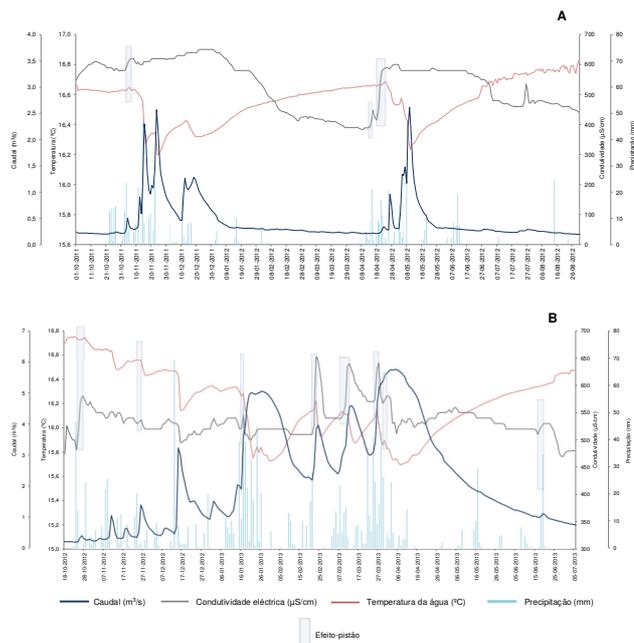


Figura II.IV.IV.3 – Evolução dos valores diários da condutividade eléctrica, da temperatura e do caudal dos Olhos d’Água do Anços e da precipitação na Sra. da Estrela nos anos hidrológicos de 2011/2012 (A) e 2012/2013 (B)

³⁸ Mecanismo natural de expulsão de águas ‘antigas’, com maior tempo de residência no hidrossistema e, por isso, mais mineralizadas, que são ‘empurradas’ pelo impulso de pressão gerado pela recarga. (Ver nota de rodapé 39, mais à frente neste ponto do trabalho.)

Quadro II.IV.IV.III – Correlação (de Pearson) entre a precipitação (mm), caudal (m³/s), condutividade eléctrica (µS/cm) e temperatura da água (°C) para a exsurgência dos Olhos d’Água do Anços

	Temperatura	Condutividade	Caudal	Precipitação	
2011/2012	Temperatura	1	-0,667	-0,668	-0,019
	Condutividade	-0,667	1	0,465	0,158
	Caudal	-0,668	0,465	1	0,111
	Precipitação	-0,069	0,207	0,126	1
<i>n</i> = 335					
2012/2013	Temperatura	1	-0,109	-0,922	0,017
	Condutividade	-0,109	1	0,241	0,008
	Caudal	-0,922	0,241	1	0,083
	Precipitação	0,017	0,008	0,083	1
<i>n</i> = 247					
Média	Temperatura	1	-0,291	-0,914	-0,135
	Condutividade	-0,291	1	0,164	0,082
	Caudal	-0,914	0,164	1,000	0,203
	Precipitação	-0,167	0,096	0,227	1
<i>n</i> = 582					

No ano de 2011/2012 verificou-se uma grande (e paradoxal) variação da condutividade eléctrica, com o mínimo, bastante acentuado e prolongado, a registar-se durante os meses de Fevereiro e Março, coincidente com um Inverno anormalmente seco e com valores de caudal que não ultrapassaram os 0,3 m³/s. Contrariamente, os períodos com os valores de condutividade mais elevada corresponderam aos dois períodos em que ocorreu recarga (Novembro e Abril/Maio).

O período outonal caracterizou-se por valores de condutividade eléctrica próximos da média (ligeiramente acima dos 550 µS/cm), ou seja, águas mineralizadas, com maior tempo de residência no interior do hidrossistema, armazenadas na zona saturada (fase final da recessão, domínio absoluto do escoamento de base). Ao longo deste período foram-se verificando pequenas subidas pontuais da condutividade, coincidentes com episódios pontuais de recarga elevada (pequenos efeito-pistão), mas sem que se tenha verificado descidas subsequentes na condutividade (por efeito de diluição da água recém-infiltrada), o que leva a supor que essa recarga foi sendo maioritariamente absorvida pelo próprio hidrossistema. Esta hipótese baseia-se: (i) nos resultados da *análise de séries temporais*, segundo os quais os episódios de precipitação até 5/6 dias são fortemente transformados pelo hidrossistema; (ii) no carácter predominante persistente da precipitação ocorrida neste período (escassos dias com precipitação elevada, acima de 20 mm). O caudal dos Olhos d’Água do Anços seria, assim, assegurado principalmente por água com significativo tempo de residência no interior do hidrossistema (zona saturada) e cuja drenagem poderia estar a

ser forçada pela carga hidráulica provocada pela água da recarga que se foi armazenando no hidrossistema, o que se depreende também do facto dessa água da recarga apenas, pontualmente, ter sido detectada na exsurgência mediante a diminuição pontual e ténue da condutividade eléctrica e da temperatura.

López-Chicano *et al.* (2001) identificaram e analisaram idêntico comportamento num hidrossistema no sul de Espanha tendo justificado a ocorrência de valores relativamente elevados durante um período tão extenso com um longo *efeito-pistão* (cerca de 3 meses) provocado pela abundante precipitação no início do ano hidrológico. A explicação mais razoável para os autores, embora considerassem poder ser discutível, era a de que esse prolongado *efeito-pistão* seria o resultado de um mecanismo de circulação difusa com acumulação de água na parte mais profunda da zona não-saturada que, em função da elevada espessura dessa zona do hidrossistema, favorecia o aumento da carga hidráulica aquando de uma elevada recarga. Mesmo podendo não ser esta a explicação mais correcta no caso em estudo, é aquela que se reveste de algum sentido e a única que conseguimos apresentar neste momento, dado possuímos apenas dois anos de dados e não existir informação hidroquímica que permita esboçar outra justificação.

O período que se segue (de finais de Dezembro ao início de Abril) é, em nosso entender, o de mais difícil explicação, já que o caudal vai decrescendo até uma situação atípica de águas baixas inverniais, diminuição sempre acompanhada por uma descida considerável da condutividade eléctrica, situação igualmente anómala, segundo a literatura da especialidade. O carácter inabitual desta situação explica-se pelo facto de águas baixas inverniais (por retenção nival ou escassa precipitação) significarem a subida da condutividade eléctrica devido ao caudal ser assegurado por água armazenada no hidrossistema; por outro lado, uma descida tão consistente da condutividade eléctrica ocorre por efeito de diluição das águas recém-infiltradas. Qualquer uma destas situações-tipo, presentes na literatura da especialidade, não auxilia na interpretação da complexa e anómala relação precipitação / caudal /condutividade eléctrica e temperatura da água dos Olhos d'Água do Anços neste período.

Essa descida contínua e prolongada da condutividade eléctrica poderá ser o resultado da chegada à exsurgência da água infiltrada e armazenada no período de recarga de Novembro-Dezembro, em que terá ocorrido uma substituição de águas mais mineralizadas da parte superior da zona saturada (longo efeito-pistão precedente?) por 'águas novas', menos mineralizadas. O facto de não se ter verificado recarga nos meses inverniais, conduziu à diminuição do gradiente hidráulico, pelo que esta fase foi igualmente marcada por caudais reduzidos e com baixa velocidade de drenagem na exsurgência (à semelhança do que se verifica nos meses de águas baixas). No entanto, consideramos que se trata apenas de uma possibilidade de explicação, a única que, neste momento, se afigura como

345

relativamente plausível e com alguma fundamentação, embora possa ser bastante discutível.

Este comportamento da condutividade eléctrica, verdadeiramente atípico, é interrompido com nova recarga (precipitação de meados de Abril ao início de Maio – total de 179 mm), o que, imediatamente, reproduz o comportamento hidrodinâmico do início do ano hidrológico.

O início dos dois principais períodos pluviosos no ano hidrológico de 2011/2012 e, conseqüentemente, de subida acentuada do caudal dos Olhos d'Água do Anços (em Novembro e, posteriormente, em Abril) é marcado, como vimos, por uma fase de efeito-pistão bem evidente na Figura II.IV.3 A. Ou seja, após um episódio de precipitação (e de recarga) abundante, gera-se um impulso de pressão na rede de condutas e fracturas alargadas, o qual é responsável pela expulsão de água previamente armazenada no hidrossistema, nas proximidades do exutório (efeito de propulsor do impulso de pressão sobre a zona saturada). Assim, as águas drenadas no início da subida do caudal na exsurgência são águas antigas, mais mineralizadas, o que provoca a subida imediata dos valores da condutividade eléctrica.

A primeira situação em que é evidente a presença de efeito-pistão ocorre a 5 de Novembro e tem a duração de cerca de 3 dias, duração e importância que se justificam pelo facto de o hidrossistema estar, antes do episódio de precipitação, na fase final do esvaziamento estival e, por isso, o impulso de pressão expulsou água muito mineralizada decorrente de vários meses de residência no interior do hidrossistema. A segunda situação ocorreu a 15 de Abril, mas com duração inferior a 1 dia e com valores bem mais baixos de condutividade eléctrica do que o episódio referido anteriormente, situação justificável pela recarga ter sido bastante inferior ao episódio de Novembro.

Este comportamento reforça as conclusões retiradas por Grasso (1999) e Grasso e Jeannin (2002), cujos estudos demonstraram que a duração e magnitude da fase de efeito-pistão variam enormemente de um pico de caudal/cheia para outro, estando fortemente dependentes do estado hidráulico prévio do hidrossistema, da intensidade e irregularidade da precipitação/recarga e do intervalo entre dois episódios pluviosos consecutivos.

Porém, a descida da temperatura das águas (entre 0,2°C e 0,4°C) aquando da subida abrupta do caudal e a coincidência dos valores mínimos de temperatura com os picos de caudal justifica-se, contudo, com o já analisado comportamento bimodal do hidrossistema cársico de Dregacias-Sicó que, apesar do predomínio do escoamento de base, possui uma componente importante de escoamento rápido proveniente da circulação em condutas, que existirão, principalmente, no sector oeste (mais fracturado e carsificado). Assim sendo, ao mesmo tempo que ocorre a saída de águas mais mineralizadas provenientes da zona saturada, águas recentemente infiltradas, muito menos mineralizadas, rapidamente circulam por uma rede de drenagem relativamente funcional ao longo da zona não-saturada,

atingindo as exsurgências com um atraso de poucas horas. Essas 'águas novas' são, por isso, mais frias, dado o curto tempo de atravessamento do hidrossistema e a consequente impossibilidade de equilíbrio térmico com a rocha. A quase simultaneidade entre o efeito-pistão e a chegada de 'águas novas' no início do ano hidrológico é explicada, em parte, por Doerfliger *et al.* (2004), segundo os quais a transmissividade é máxima nesta altura e o poder regulador do hidrossistema é mínimo pelo facto da sua rede de drenagem subterrânea se encontrar ainda com muito pouca água.

A evolução temporal da condutividade eléctrica no ano de 2012/2013 não foi tão atípica nem tão complexa como no ano anterior, embora não seja concordante com a maioria dos casos analisados na vasta bibliografia da especialidade e que, de um modo geral, se caracterizam por valores mais baixos de condutividade eléctrica no Inverno (efeito de diluição da água infiltrada) e mais elevados no Verão, em resultado da escassa precipitação e do esvaziamento progressivo do hidrossistema (contributo da zona saturada). Ravbar *et al.* (2010) perante uma situação semelhante à do presente estudo (valores mais elevados de condutividade em águas altas) afirmam tratar-se de um comportamento anómalo e atípico em hidrossistemas cársicos.

Nos Olhos d'Água do Anços, os valores elevados (e máximos) de condutividade eléctrica têm ocorrido não em épocas secas, mas no seguimento de períodos bastante pluviosos e de elevados caudais (em período de águas altas). Segundo Massei *et al.* (2007) essa situação está associada à posição do nível piezométrico, mais elevada do que o normal. A subida do nível piezométrico (maior carga hidráulica), tal como comprova Bicalho *et al.* (2011), activa/provoca a circulação de águas mais mineralizadas, armazenadas em compartimentos específicos, provavelmente localizados a grandes profundidades. Este será, portanto, o caso do hidrossistema drenado pelos Olhos d'Água do Anços devido à considerável espessura e às características da zona não-saturada e, conseqüentemente, ao maior peso da carga hidráulica e também às características vauculianas da sua saturada.

Os valores máximos de condutividade eléctrica neste ano estão relacionados, uma vez mais, com situações de efeito-pistão, confirmadas pelo comportamento da temperatura das águas que aumenta num primeiro momento, imediatamente a seguir ao episódio de recarga, o que indica tratar-se de águas que já se encontravam há bastante tempo no interior do hidrossistema, em contacto com a rocha, e que, por isso, apresentam uma temperatura mais elevada. Esta situação foi particularmente vincada nos picos de condutividade eléctrica de final de Fevereiro a início de Abril de 2013. A interpretação para estes valores máximos está no facto de se tratar de águas provenientes de maior profundidade da zona saturada, que foram empurradas e obrigadas a sair em virtude da enorme carga hidráulica exercida pela elevada quantidade de água entrada no hidrossistema, particularmente a partir de Janeiro

347

de 2013 (de notar que até meados de Janeiro apenas tinha ocorrido 32% da precipitação anual e que de 15 de Janeiro a 10 de Abril se registaram 782 mm – 58% do total anual, muito acima do normal para esta época do ano na área em estudo).

Os valores mínimos de condutividade eléctrica em 2012/2013 decorreram de episódios de excepcional recarga (precipitação diária superior a 50 mm), com subida abrupta do caudal. São águas muito menos mineralizadas (*dilution waters*), resultantes de infiltração pontualmente concentrada (pela abertura dos algares) com um percurso rápido na zona não-saturada. O decréscimo simultâneo da temperatura da água (entre 0,6 e 0,2°C) reforça a anterior explicação.

Excepcionalmente as situações hidrometeorológicas extremas, o ano de 2012/2013 caracterizou-se por uma relativa homogeneidade dos valores de condutividade eléctrica (por volta dos 520 – 540 µS/cm), que se verificaram ao longo de todo o ano hidrológico. No entanto, e mesmo sem parâmetros químicos que nos auxiliem nessa análise, acreditamos que sejam águas provenientes sobretudo do escoamento diferido e de algum escoamento de base, mas com pouco tempo de residência. A *análise de séries temporais* e a *análise da curva de recessão* revelaram essa realidade do ponto de vista hidrodinâmico, que aqui se comprova do ponto de vista da variação da temperatura e da condutividade eléctrica da água drenada pelo principal exutório do hidrossistema em estudo (Figura II.IV.4 B). Assim:

(i) no Outono (até ao início de Dezembro) o ritmo de entrada da água é relativamente contínuo, sem alimentação excepcional, ao mesmo tempo que a temperatura e a condutividade eléctrica da água drenada pelos Olhos d'Água do Anços vai diminuindo, revelando que se trata de uma mistura de água proveniente da zona saturada (facto denunciado por

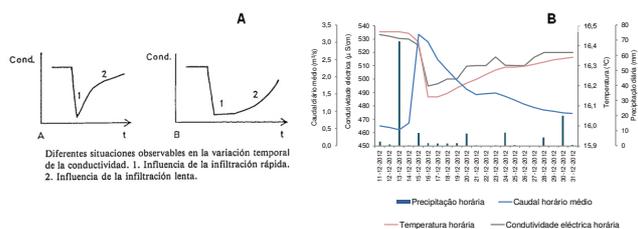


Figura II.IV.4 – Representação gráfica da forma como a condutividade eléctrica recupera para os valores pré-evento pluvioso. Desenho esquemático (extraído de Auzmendi, 1988) – A e situação real ocorrida nos Olho d'Água do Anços (Dezembro de 2012) – B

pequenos efeito-pistão, coincidentes com pequenas subidas do caudal) e de água recentemente infiltrada, que ficou retida temporariamente em estruturas de menor condutividade hidráulica com tempo para adquirir alguma mineralização (zona não-saturada e epissaturada), mas sem ser suficiente para o equilíbrio térmico pelo contacto demorado com a rocha;

(ii) a forma relativamente côncava, de declive pouco acentuado, que caracteriza o modo como a condutividade eléctrica, após atingir os valores mínimos, volta aos seus 'valores médios' é indicativa da importante influência do escoamento diferido, que impede a rápida subida dos valores de condutividade, terminado o contributo do escoamento rápido (Auzmendi, 1988). A Figura II.IV.4 mostra esse comportamento, confirmado pelo facto da temperatura da água também não subir rapidamente, fazendo-o, igualmente, de forma gradual e lenta.

Este comportamento foi particularmente visível no início de Abril de 2013, em que o elevado caudal drenado pelos Olhos d'Água do Anços, após um importante efeito-pistão, foi constituído quase totalmente por escoamento diferido, perfeitamente identificado na temperatura da água, que se manteve bastante inferior aos valores habituais e que foi recuperando, igualmente de forma lenta, com uma evolução temporal em forma amplamente côncava, tendo permanecido cerca de um mês com valores anormalmente baixos (inferiores a 16°C). Esta constatação é corroborada pelas análises precedentes, em particular pela *análise da curva de recessão*, a qual revelou que, nesta recessão, a influência do escoamento proveniente da zona não-saturada se estendeu por mais de três meses.

De notar, ainda, que durante os dois anos analisados, pequenos episódios isolados de recarga durante a Primavera/início do Verão ou até mesmo no Inverno não tiveram qualquer efeito na condutividade eléctrica nem na temperatura da água dos Olhos d'Água do Anços devido à enorme capacidade de filtragem e ao carácter inerte que o hidrossistema em estudo possui. Deste modo, apenas episódios continuados de precipitação persistente e em quantidade considerável ou episódios isolados de precipitação muito abundante (superior a 40 mm/dia) provocaram alterações nestes dois parâmetros físicos da água da exsurgência em estudo.

3.2. Distribuição das frequências dos valores de condutividade eléctrica

Para além da variação temporal da condutividade eléctrica da água drenada pelos Olhos d'Água do Anços, a distribuição das frequências relativas dos valores de condutividade constitui um excelente método para completar e aprimorar o conhecimento das características internas do hidrossistema de Degraçias-Sicó, um dos objectivos centrais deste trabalho.

Em termos teóricos, a distribuição das frequências da condutividade eléctrica reflecte a variabilidade da mineralização e da composição química da água das surgências, sendo,

349

por isso, utilizada para identificar a existência de diferentes tipos de circulação dentro do mesmo hidrossistema. Bakalowicz (1979) utilizou este método para classificar o grau de carsificação de vários hidrossistemas, associando diferentes valores de condutividade eléctrica com diferentes tipos de água (de origem e tempo de residência diferentes), sugerindo que o número de classes de condutividade eléctrica e a distância entre elas constituíam um indicador da eficiência da rede de drenagem hipogea e, conseqüentemente, do grau de carsificação de um hidrossistema.

No presente estudo, o facto de termos apenas dois anos de observações e de terem sido hidrologicamente tão contrastados fez com que tivéssemos dois gráficos completamente diferentes, mostrando que o comportamento do hidrossistema pode variar de um ano para o outro consoante as condições hidrometeorológicas – Figura II.IV.5. Numa observação inicial do gráfico, constata-se que, apesar do número de picos de condutividade eléctrica ser idêntico nos dois anos analisados, a sua distribuição no eixo das abcissas, a sua magnitude e a distância entre eles varia consideravelmente de um ano para o outro.

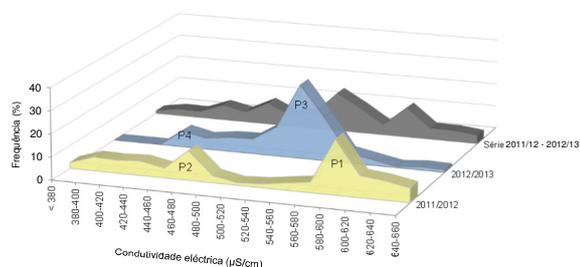


Figura II.IV.5 – Distribuição das frequências da condutividade eléctrica da água drenada pelos Olhos d'Água do Anços nos anos hidrológicos de 2011/2012, 2012/2013 e no conjunto da série

O ano de 2011/2012 apresenta dois picos distintos e relativamente afastados do outro, indicando proveniências e/ou tempos de residência diferentes das águas drenadas pelos Olhos d'Água do Anços. O pico P1 (na classe dos 580-600 µS/cm) engloba 24% da água e apresenta uma posição no eixo das abcissas em valores anormalmente elevados

para esta exsurgência³⁹. Esta água, como vimos anteriormente, corresponderá a água proveniente de maior profundidade, armazenada na zona saturada, com elevado tempo de residência e, portanto, muito mineralizada. O prolongado efeito-pistão, na sequência da recarga no início do ano hidrológico (após um longo estio), será a explicação para a chegada destas águas à exsurgência. O pico P2 (classe dos 460-480 $\mu\text{S}/\text{cm}$) tem menos expressão que o anterior (13% dos valores de condutividade eléctrica registados) e representa, juntamente com as classes de condutividade inferior ao P2, o contributo da água recém-infiltrada, que chega à exsurgência após a expulsão da água mais antiga.

Esta configuração da distribuição das frequências da condutividade eléctrica e, particularmente a existência de um significativo afastamento entre P1 e P2, revela que praticamente não se verificou mistura entre as águas com diferentes tempos de residência no hidrossistema. A justificação para esta distribuição das frequências da condutividade eléctrica está claramente no carácter contrastado que a precipitação assumiu nesse ano, permitindo perceber que os diferentes compartimentos do hidrossistema em estudo se comportam de forma muito mais independente num ano seco, pelo que as águas drenadas nas exsurgências tiveram características físicas muito diferentes.

O ano de 2012/2013 foi muito mais húmido que o anterior e caracterizou-se por uma maior regularidade na distribuição da precipitação, apresentando dois picos de condutividade eléctrica de magnitude muito desigual e totalmente desfasados dos picos do ano de 2011/2012, revelando, por isso, hidrodinâmicas também bastante diferentes do ano anterior.

Em termos gerais, verificou-se um deslocamento para valores mais baixos em abcissas, o que significa uma menor mineralização da água drenada através dos Olhos d'Água do Anços. Para além disso, apresenta uma distribuição tendencialmente unimodal, com o pico mais representativo – P3 (520-560 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a englobar 52% dos valores de condutividade, esboçando-se apenas um ligeiro pico secundário (P4, 420-440 $\mu\text{S}/\text{cm}$), que corresponde a apenas 7% e representa o escoamento rápido (em sentido restrito). No entanto, ao contrário de 2011/2012, o intervalo entre estes dois picos significa 38% das frequências da condutividade eléctrica, o que representa a contribuição do escoamento diferido, confirmada pelos resultados da *análise da curva de recessão* que demonstraram que a influência do escoamento proveniente da zona não-saturada em 2012/2013 se prolongou por mais de 90 dias.

O pico P3 representa uma distribuição temporal bastante uniforme, que se estendeu desde Novembro ao final de Junho, correspondendo o caudal dos Olhos d'Água do Anços a

³⁹ A campanha de medições pontuais durante 2009/2010 e 2010/2011 mostrou um valor médio de condutividade eléctrica nos Olhos d'Água do Anços de 528 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tendo apenas ultrapassado os 560 $\mu\text{S}/\text{cm}$ por uma vez (590 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em Julho de 2010).

uma mistura permanente de fluxos provenientes de vários sectores do hidrossistema de menor condutividade hidráulica mas com alguma capacidade de armazenamento (componente lateral). Esta dinâmica apenas foi interrompida, pontualmente, por episódios de excepcional recarga (pontual ou persistente).

Se atendermos ao conjunto dos dois anos, a distribuição das frequências de condutividade eléctrica é claramente multimodal, o que, segundo Bakalowicz (1977) implica algum grau de carsificação, a qual seria tanto mais desenvolvida quanto maior o espaçamento entre as classes. No entanto, mais recentemente, Massei *et al.* (2007) demonstraram que o afastamento entre classes não poderia constituir uma medida para aferir a carsificação de um hidrossistema, a não ser que fosse considerada uma longa série de anos. A partir da análise de um hidrossistema muito semelhante ao do presente estudo, estes últimos autores concluíram que o comportamento hidrogeológico de um hidrossistema cársico não é constante, sendo frequente variar de um ano para outro, dependendo das condições hidrometeorológicas.

Assim sendo, e apesar do carácter multimodal da distribuição das frequências da condutividade eléctrica da série, os poucos anos de dados, a pequena amplitude entre as classes e o facto de não haver afastamento entre elas (a não ser em situações hidrológicas anómalas), continuam a demonstrar que, no geral, o hidrossistema de Degraçias-Sicó tem um funcionamento complexo e heterogéneo. Não é possível, pois, com base em apenas dois anos de características tão dispares ir mais além no que se refere à classificação do hidrossistema de Degraçias-Sicó.

Numa abordagem de síntese, constata-se que as maiores variações dos parâmetros físicos ocorreram durante episódios de cheia, com maior dispersão dos valores da condutividade (e da temperatura), uma vez que, durante estes períodos, o caudal dos Olhos d'Água do Anços constituem uma mistura de água proveniente de escoamento rápido (que predomina) e de escoamento de base ou diferido (dependendo da altura do ano considerada), estes em muito menor proporção. Durante a estiagem, o caudal na exsurgência é alimentado principalmente por água proveniente do curso molhado, pelo que a variação das características da água é muito menor (Mathevet, 2002).

O Inverno e início da Primavera de 2012/2013 assumem-se como um bom exemplo da complexidade deste hidrossistema, com a ocorrência de variações substanciais da condutividade, sendo a água debitada pelos Olhos d'Água do Anços uma mistura complexa de água de grande profundidade (vigoroso efeito-pistão), de água de circulação rápida (elevada e intensa recarga) e de infiltração profunda diferida e lenta (proveniente da recarga continuada ao longo dos meses de Inverno). A outra situação de forte variabilidade da condutividade coincidiu com parte da curva de recessão nesse mesmo ano, momento em que o caudal se caracterizou sobretudo por uma mistura de água proveniente de diferentes

sectores da zona não-saturada ('componente lateral'), o que se explica pela elevadíssima quantidade de água entrada no hidrossistema durante o Inverno e o início da Primavera.

4. O funcionamento hidrodinâmico a partir da análise de pormenor (episódios) da condutividade eléctrica e da temperatura da água dos Olhos d'Água do Anços

No estudo do funcionamento hidrodinâmico a partir do comportamento pormenorizado da condutividade eléctrica e da temperatura, verificámos que, na generalidade, perante um episódio de recarga, a condutividade é o parâmetro que responde em primeiro lugar, sendo seguido, após algumas horas, pela descida da temperatura. Esta constatação está de acordo com os esquemas conceptuais sobre os diferentes tipos de circulação no interior de um hidrossistema e respectivas implicações no tipo de água e na sucessão da sua chegada ao exutório. Deste modo, a subida do caudal em resposta a eventos de recarga é sempre realizada com água que se encontra armazenada na zona saturada nas proximidades do exutório (muito mais mineralizada) e só algumas horas depois a água recentemente infiltrada (baixa mineralização) atinge a exurgência.

Assim sendo, e dado que iremos analisar a hidrodinâmica de pormenor, torna-se pertinente esclarecer que estamos a considerar dois momentos no processo de resposta a episódios de recarga na exurgência em estudo: o primeiro representa o impulso de pressão (*pressure pulse*) e é muito mais rápido do que o fluxo que se lhe segue, num segundo momento⁴⁰, e que corresponde à chegada efectiva à exurgência de água recentemente infiltrada (*water transit time*).

A análise dos dados horários da precipitação, do caudal, da temperatura e da condutividade eléctrica nos Olhos d'Água do Anços serviu, assim, um dos objectivos centrais deste estudo: o conhecimento pormenorizado da relação *input-output* no hidrossistema cársico Degraças-Sicó. Deste modo, para além da informação pormenorizada da precipitação e do caudal (estudo de base da hidrodinâmica) a utilização dos dados da temperatura e da condutividade eléctrica da água possibilitou o conhecimento mais aprofundado dessa hidrodinâmica, permitindo compreender os diferentes percursos e tempos de circulação interna da água e, sobretudo, permitiu inferir algumas propriedades físicas do próprio

⁴⁰ De acordo com Ford e Williams (2007), a distinção relaciona-se com a velocidade de propagação, ou seja, quando ocorre a entrada de uma quantidade bastante elevada de água no hidrossistema vai-se gerar um impulso sob a forma de uma 'onda' que se desloca como uma onda cinemática ao longo das condutas da zona não-saturada e como um impulso de pressão nas condutas da zona saturada, onde funciona como um propulsor (*water hammer*). Quanto maior for essa onda (recarga mais elevada) maior será a sua velocidade, a qual é superior à velocidade da água, particularmente em meios aquáticos (sendo quase espontânea, à velocidade do som). Por isso, é tão importante distinguir o tempo de um impulso de pressão (tempo de resposta hidráulica) e o tempo de circulação da água. O exemplo fornecido por aqueles autores mostra que o tempo de um impulso de pressão foi de 6 h, enquanto o tempo de circulação foi de 40h. No mesmo sentido, Mathevet (2002) escreve que 'as noções de transferência e de trânsito estão nitidamente dissociadas nos sistemas cársicos'.

hidrossistema. Consequentemente, as principais ilações aqui apresentadas são referentes, principalmente, à zona não-saturada.

Em termos metodológicos, há que referir que o *atraso* (da resposta) foi considerado como o intervalo de tempo entre o "início" do episódio pluvioso e o início da subida do caudal. Não foi considerado, portanto, como normalmente ocorre em Hidrologia, o centro gravítico do episódio pluvioso porque estamos a medir um pequeno intervalo (em horas), que seria com certeza muito encurtado se nos reportássemos apenas ao centro gravítico da chuvada. Para além disso, as características físicas da área de recarga, em especial a presença de carso descoberto e a existência de pontos de infiltração concentrada (abertura superficial dos algares) promovem a infiltração desde o primeiro momento. Acresce ainda a presença de extensas áreas de vegetação rasteira e esclerófila que não retém de modo apreciável, à superfície, a precipitação do início do episódio. A coincidência da época mais chuvosa com a época mais fria faz com que a evapotranspiração se mantenha em valores muito baixos. Assim sendo, consideramos como início do episódio, de acordo com a especificidade de cada situação hidrometeorológica: (i) numa sequência horária, a primeira hora de ocorrência de precipitação (quando esse valor horário é superior a 2 mm e se prolonga ininterruptamente por várias horas) ou o primeiro pico horário, quando as primeiras horas são de precipitação muito baixa e/ou com algumas interrupções; (ii) picos horários isolados elevados ou com valores precedentes negligenciáveis. O valor horário de 2 mm é totalmente empírico, mas foi escolhido para salvaguardar qualquer perda inicial no episódio chuvoso, resultante, por exemplo, de retenção sub-aérea nas mais diversas superfícies.

. A variação no período outonal e no início do Inverno

Durante o Outono e o início do Inverno, nos dois anos analisados, registaram-se entre 4 e 6 picos de descarga intercalados por vários dias, e até semanas, de baixo caudal, com esses valores máximos de caudal a serem sucessivamente mais elevados, já que o hidrossistema vai ficando com mais água no seu interior devido aos sucessivos episódios de recarga.

Numa primeira abordagem foram identificados e individualizados três momentos na relação *caudal / temperatura da água / condutividade eléctrica da água* perante um episódio de recarga, na seguinte sequência temporal: (i) o início da subida do caudal foi acompanhado pela subida da condutividade e da temperatura (efeito-pistão); (ii) a continuação do aumento do caudal (curva de crescimento) foi acompanhada por uma descida da temperatura (cerca de 0,3 a 0,4 °C) e estabilização ou até ligeira subida da condutividade eléctrica; (iii) a parte final da curva de crescimento e o pico de caudal coincidiram com uma descida acentuada tanto da temperatura como da condutividade eléctrica.

Em 2011/2012, o primeiro pico de caudal ocorreu em meados de Novembro de 2011 na sequência de 38 mm de precipitação em 8 horas, episódio seguido por uma subida discreta da condutividade cerca de 20h após o início da chuvada, tendo continuado, progressivamente, a aumentar, ao mesmo tempo que se verificava uma tendência de diminuição da temperatura das águas, iniciada 4h depois do aumento da condutividade eléctrica (Figura II.IV.4.6 A).

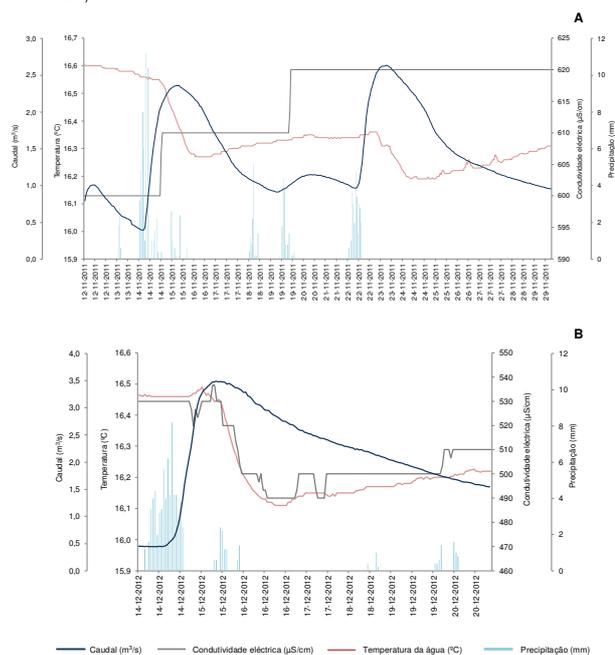


Figura II.IV.6 – Evolução horária do caudal, temperatura e condutividade eléctrica das águas dos Olhos d'Água do Anços e precipitação horária na Sra. da Estrela durante o Outono em cada um dos anos de estudo (2011/2012 e 2012/2013). Em Novembro de 2011 (A) e Dezembro de 2012 (B)

355

Este comportamento das variáveis, após precipitação concentrada, evidencia, num primeiro momento, o importante contributo da zona saturada na fase de subida do nível da água da exurgência (impulso de pressão com *efeito-pistão* e consequente aumento da condutividade eléctrica) e revela a chegada, quase em simultâneo, da água recém-infiltrada (diminuição da temperatura), com circulação rápida em condutas ao longo da zona não-saturada.

Em Dezembro de 2012, após um evento chuvoso de quase 70 mm ao longo de 17 horas⁴¹, a descida da mineralização das águas (20h depois do início da chuvada) anuncia a chegada de 'água nova' aos Olhos d'Água do Anços proveniente de circulação rápida, ao mesmo tempo que a subida da temperatura demonstra o contributo (em simultâneo) de água armazenada na zona saturada. A descida conjunta da temperatura e da condutividade eléctrica que ocorre já muito próximo do pico de caudal, ou seja mais de 24 horas depois do início da subida do caudal, confirma o tempo que a água leva a atravessar a zona não-saturada⁴² nesta altura do ano hidrológico. Esta entrada excepcional de água no seguimento de um Outono chuvoso resultou numa descida um pouco mais acentuada da condutividade eléctrica (menos 47 µS/cm) e da temperatura (menos 0,4 °C) o que revela a preponderância, nesta situação, da circulação rápida ao longo da zona não-saturada, com um considerável efeito de diluição na água drenada pela exurgência. A água que sai pelos Olhos d'Água do Anços é, nesta fase, composta principalmente por escoamento rápido (embora em proporção decrescente face ao escoamento diferido), que se faz sentir ao longo de cerca de 15 dias⁴³, aspecto visível na recuperação lenta dos valores de temperatura e condutividade eléctrica para valores próximos dos do pré-evento.

Este comportamento de ambas as variáveis mostra também que o caudal nos Olhos d'Água do Anços possui uma parte considerável de escoamento proveniente da zona não-saturada (incluindo zona epissaturada), responsável pela relativa estabilidade dos valores de condutividade eléctrica, já que atenua o impacto da água recém-chegada. Este escoamento diferido é detectado também na tendência geral de decréscimo gradual da temperatura da água, visível no período outonal de 2012/2013 (Figura II.IV.4.3).

⁴¹ De salientar que o funcionamento hidrodinâmico do hidrossistema cársico é uma função de múltiplas variáveis, das quais se destacam, neste ponto da análise, o estado hidráulico prévio do hidrossistema e, sobretudo, a intensidade da precipitação. Neste último caso, e para idênticas condições do hidrossistema, a ocorrência de episódios de precipitação abundante e muito concentrada conduz a uma resposta muito mais rápida da exurgência (entre 3 e 8 horas de atraso desde o início da chuvada ao aumento do caudal). A repartição da precipitação ao longo de várias horas consecutivas apenas se repercute no caudal cerca de 10 horas depois do início da chuvada.

⁴² Ravbar *et al.* (2010), por exemplo, falam em 7 h para um sistema bastante carsificado (Eslovénia). Ryan e Neiman (1996) referem um atraso de 6h igualmente para um sistema fortemente carsificado (Mammoth Cave National Park, Estados Unidos da América).

⁴³ Valor muito próximo da duração média do escoamento rápido determinada pela *análise de séries temporais* - 14 dias.

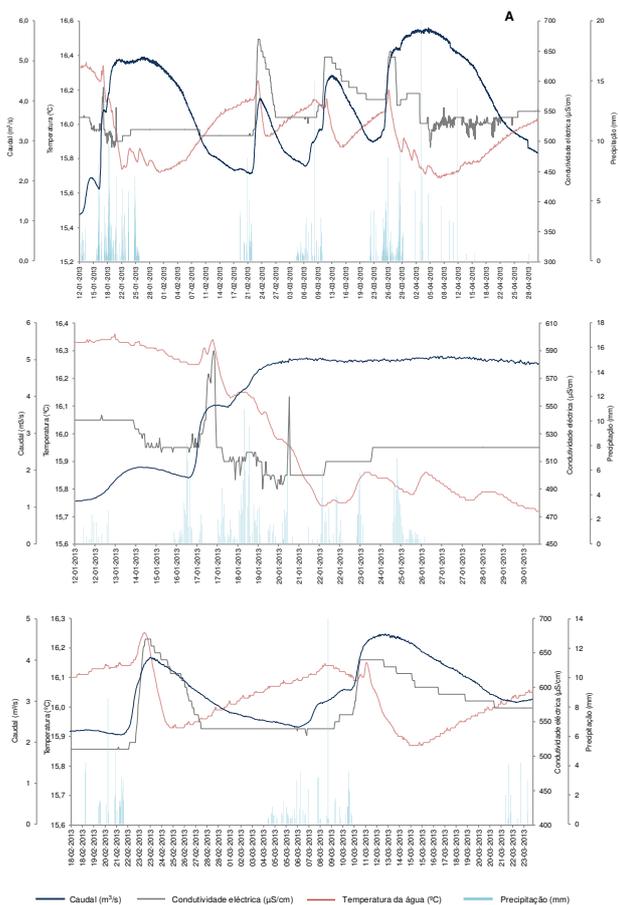
De notar ainda que, nesta altura do ano hidrológico, há uma grande proximidade temporal em termos da chegada à exsurgência de água resultante do impulso de pressão e de água proveniente da circulação rápida na zona não-saturada (cerca de 20h), situação que se deve ao facto de o sistema cársico conter ainda pouca água (início do ano hidrológico) e o sistema de condutas se encontrar praticamente vazio.

. O comportamento durante o Inverno e início da Primavera

A estação invernal nos dois anos em estudo foi, em termos da evolução do caudal, condutividade eléctrica e temperatura, diametralmente oposta. Tendo sido o Inverno de 2011/2012 anormalmente seco e o comportamento da condutividade eléctrica difícil de explicar, optámos por considerar, na análise de pormenor, o Inverno/Primavera de 2012/2013 que, embora tendo sido anormalmente chuvoso no mês de Março, se coaduna mais com a realidade hidroclimatológica da área em estudo.

No Inverno/Primavera de 2012/2013 ocorreram as maiores cheias do período em estudo (em duração, volume de água drenado e valor instantâneo máximo) – Figura II.IV.14.7. O primeiro evento teve início a 12 de Janeiro de 2013, com uma ligeira subida inicial do caudal em resultado de um pequeno episódio de precipitação, mas que resultou num primeiro abaixamento da condutividade e da temperatura, o que se explicará pelo efeito de diluição da água recém-infiltrada sobre o escoamento diferido, que estaria a assegurar maioritariamente o caudal da exsurgência nesse período de cerca de uma semana sem precipitação. O início do período de elevada e continuada precipitação que se iniciou a 16 de Janeiro provocou a subida rápida do caudal nos Olhos d'Água do Anços, que se fez inicialmente à custa de água mais mineralizada acumulada na zona saturada, facto deduzido da subida simultânea e considerável da temperatura e da condutividade eléctrica 19 horas após o início da chuva e 8 horas após a subida inicial do caudal. A continuação da recarga provocou o aumento do caudal e, ao mesmo tempo, a descida acentuada da temperatura e da condutividade, revelando a chegada à exsurgência da água de infiltração rápida, pouco mineralizada, 35 horas após o início da precipitação. Este intervalo de tempo, aparentemente elevado, pode ser justificado pela enorme quantidade de água no interior do hidrossistema ocupando as condutas.

Nas duas semanas que se seguiram, o caudal manteve-se muito elevado (próximo dos 5 m³/s até 1 de Fevereiro), com a condutividade eléctrica e a temperatura, inicialmente, a oscilarem bastante, revelando a mistura de águas de diferentes proveniências (vários sectores do hidrossistema) a contribuírem, em simultâneo, para o caudal dos Olhos d'Água do Anços. Após estas variações, a condutividade estabilizou em valores muito próximos da



Continua →

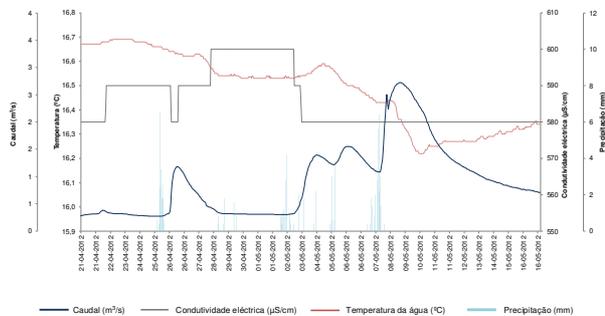


Figura II.IV.4.7 – Evolução horária do caudal, temperatura e condutividade eléctrica das águas dos Olhos d'Água do Anços e precipitação horária na Sra. da Estrela de Janeiro a Maio de 2013. Representação do período completo (A) e por episódio (restantes gráficos)

'média' para este hidrossistema e a temperatura foi sofrendo pequenas variações, explicadas por repetidos eventos de recarga, insuficientes, contudo, para provocar diluição efectiva nas águas da exurgência. A estabilização da condutividade e a subida progressiva da temperatura até meados de Fevereiro evidencia que a água drenada pelos Olhos d'Água do Anços, neste período sem precipitação, seria principalmente escoamento diferido, mas com um tempo de residência já superior no interior do hidrossistema, suficiente para se notar a interacção água-rocha patente no comportamento da temperatura.

O período que se segue, e que se estende de meados de Fevereiro ao início de Abril é marcado por excepcionais quantitativos de precipitação e de recarga, distribuídos por vários episódios (maioritariamente três), separados por mais de uma semana sem precipitação, o que permitiu observar com clareza o funcionamento hidrodinâmico global do sistema cársico em estudo nesta altura do ano hidrológico e nestas condições hidrometeorológicas.

Depois de 24 dias sem registo de precipitação, o pequeno evento pluvioso de 19-21 de Fevereiro (51 mm) desencadeou uma subida rápida do caudal (de 2,3 m³/s às 0h do dia 22 para os 4,1m³/s às 0h do dia 24) e uma surpreendente e abrupta subida da condutividade eléctrica (de 510 µS/cm às 0h do dia 22 para os 670 µS/cm às 14h do dia 23) acompanhada por uma pequena subida da temperatura. Consideramos tratar-se de um poderoso efeito-pistão, em águas altamente mineralizadas, provenientes de maior profundidade da zona

359

saturada, provocado, como já referimos anteriormente, pela enorme carga hidráulica exercida pela água que percolou até ao nível piezométrico no seguimento de um Outono/Inverno chuvosos a que se juntou mais este episódio. Mesmo não tendo sido muito abundante, foi o suficiente para desencadear uma forte subida do caudal, sublinhando a forte não-linearidade que caracteriza o hidrossistema em estudo. Este processo repetiu-se mais duas vezes (a 11 e 26 de Março de 2013), na sequência de eventos pluviosos abundantes.

A descida abrupta da temperatura, coincidente com o pico de cheia nos dois primeiros episódios, revela a chegada de água recém-infiltrada à exurgência, o que acompanhado pela diminuição da condutividade, mostra o efeito de diluição provocado por estas 'águas novas'. Durante a fase de recessão do caudal nos Olhos d'Água do Anços, a descida lenta e a estabilização dos valores de condutividade eléctrica e a recuperação lenta da temperatura, mostram o contributo do escoamento rápido e, principalmente, do escoamento diferido (águas com pouco tempo de residência e, por isso, com temperatura mais baixa e menor mineralização). O contributo da zona saturada é igualmente visível nos valores elevados da condutividade (superiores à média do hidrossistema) o que representa a saída de água da zona saturada no seguimento da expulsão de água altamente mineralizada de maior profundidade.

As diferentes proveniências das águas drenadas pelos Olhos d'Água do Anços estão perfeitamente representadas na última e mais importante cheia de todo este período. A precipitação que se iniciou a 24 de Março e que se prolongou, quase ininterruptamente, até ao dia 30 de Março originou uma subida do caudal, não tão acentuada como a que ocorreu em Janeiro, devido à muito maior quantidade de água no interior do hidrossistema, à menor velocidade de circulação nas condutas, já muito preenchidas com a água que vinha entrando no hidrossistema e ao carácter essencialmente persistente da precipitação (sem ocorrência de episódios concentrados). O início da subida do caudal foi assegurado por água proveniente de grande profundidade, facto deduzido a partir dos valores de condutividade eléctrica anormalmente altos (650 µS/cm).

A partir daí, e na sequência da continuação da precipitação, a condutividade eléctrica e a temperatura da água da exurgência estiveram em permanente oscilação, situação que se manteve por mais três semanas (até 22 de Abril), confirmando as diferentes proveniências da água (matriz da rocha, fissuras, fracturas da zona não-saturada; epicarso; zona episaturada; zona saturada), os diferentes tempos de residência e os diferentes percursos (e respectiva velocidade de circulação).

O último gráfico da Figura II.IV.4.7 mostra o comportamento do hidrossistema em Maio de 2012 e constituiu um excelente exemplo do carácter não-linear deste hidrossistema, uma

vez que a resposta a episódios de precipitação com alguma semelhança ocorre de modo diferente, o que é visível no comportamento da temperatura e da condutividade eléctrica.

A recarga do hidrossistema durante a estação invernal promove uma extensa renovação das águas armazenadas na zona saturada, em particular na sua parte superior e sobretudo em anos húmidos. Essa renovação das águas na zona saturada terá sido em grande volume, já que se verificou uma descida progressiva da mineralização das águas drenadas durante o período de estiagem (quando o caudal é alimentado apenas por escoamento de base) para valores bastante inferiores à média (entre os 440 e os 480 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em Julho, Agosto e Setembro). Estes valores mostram, portanto, que o tempo de residência das águas armazenadas na parte superior da zona saturada foi baixo, insuficiente para adquirirem uma elevada mineralização. O facto de a temperatura da água ir subindo gradualmente durante o Verão não parece contrariar a ideia anterior, já que, como vimos anteriormente, esta segue, grosso modo, o comportamento sazonal da temperatura do ar.

De um modo resumido, pode observar-se no esquema da Figura II.IV.IV.8 o comportamento da temperatura e da condutividade eléctrica da água drenada pelos Olhos d'Água do Anços em resposta a episódios chuvosos em diferentes contextos hidrometeorológicos. Os atrasos que aparecem identificados permitem uma visão sintetizada dos episódios analisados.

Em síntese, o comportamento da temperatura e da condutividade eléctrica da água drenada pelos Olhos d'Água do Anços veio, em primeiro lugar, confirmar as conclusões apresentadas pelos dois anteriores métodos (*análise de séries temporais* e *análise da curva de recessão*) relativamente ao funcionamento hidrodinâmico e a algumas características físicas do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó. Paralelamente, veio acrescentar mais informação sobre a hidrodinâmica de pormenor, em particular sobre o modo como se processa a resposta do hidrossistema a situações de recarga com diferentes características e em contextos sazonais diversos. Assim sendo, há a salientar que:

(i) de um modo geral, a temperatura segue, de forma muito atenuada e com um desfasamento de quase 1 mês, as variações sazonais da temperatura do ar, o que reflecte um tempo significativo de atravessamento do hidrossistema e demonstra a retenção temporária de água recém-infiltrada dentro do hidrossistema;

(ii) a relativa uniformidade térmica das águas drenadas pelos Olhos d'Água do Anços (oscilação máxima de 0,9°C nos dois anos em estudo) e uma elevada eficácia das trocas de calor entre a rocha e a água recém-infiltrada, equilíbrio apenas interrompido por episódios de recarga abundante. Os sinais térmicos do *input* são, assim, tremendamente distorcidos,

361

confirmando a enorme transformação do sinal de *input* pelo hidrossistema, característica já revelada pela *análise de séries temporais*;

(iii) de acordo com os padrões térmicos estabelecidos por Luhmann (2011)⁴⁴, o hidrossistema de Degracias-Sicó insere-se em dois padrões, de características completamente diferentes, pertencendo, simultaneamente, ao Padrão 1 e ao Padrão 3, o que significa, resumidamente, que pertence: (i) ao grupo dos hidrossistemas onde se verificam trocas de calor efectivas com a rocha e cuja temperatura da água se encontra desfasada das variações sazonais da temperatura exterior; (ii) ao grupo onde não ocorrem trocas de calor com a rocha e cuja variação da temperatura das águas ocorre à escala do evento de recarga;

(iv) a magnitude dos desvios da temperatura depende da importância do episódio de recarga (quantidade e intensidade) e do estado hidráulico prévio do hidrossistema. Numa situação de elevada recarga com o hidrossistema contendo ainda pouca água após um longo período sem precipitação verifica-se o seguinte mecanismo sequencial: (1) maior quantidade e intensidade da precipitação – (2) maior velocidade e menor tempo de contacto com a rocha – (3) chegada mais rápida da água à exsurgência, com pouca alteração em relação à temperatura exterior;

(v) o primeiro momento na resposta (quase sempre rápida) do caudal dos Olhos d'Água do Anços a um episódio de recarga faz-se com base em água que já estava no hidrossistema (efeito-pistão sobre as águas da zona saturada), que é empurrada pelas águas recém-infiltradas. Isto acontece tanto no ano seco como no ano húmido, em qualquer estação, pelo que parece ser um processo independente do estado hidráulico prévio do hidrossistema e do tipo de evento pluvioso (embora seja bem mais acentuado em situações de recarga abundante e/ou intensa);

(vi) sobreposição temporal de duas hidrodinâmicas e, conseqüentemente, de dois tipos de escoamento, ou seja, o funcionamento, em simultâneo, da drenagem na rede de condutas e da contribuição da zona saturada, revelado pelos comportamentos contrários das duas variáveis em análise. Deste modo, ao mesmo tempo que ocorre a saída de água mais mineralizada proveniente da zona saturada (escoamento de base) verifica-se circulação rápida da água recentemente infiltrada, muito pouco mineralizada, ao longo de uma rede relativamente funcional de canais preferenciais (condutas e fracturas alargadas por dissolução) na zona não-saturada, chegando à exsurgência com um atraso de poucas horas em relação ao episódio de recarga - escoamento rápido;

⁴⁴ Apresentados e explicados na componente teórica deste estudo (*Parte I, Capítulo I*).

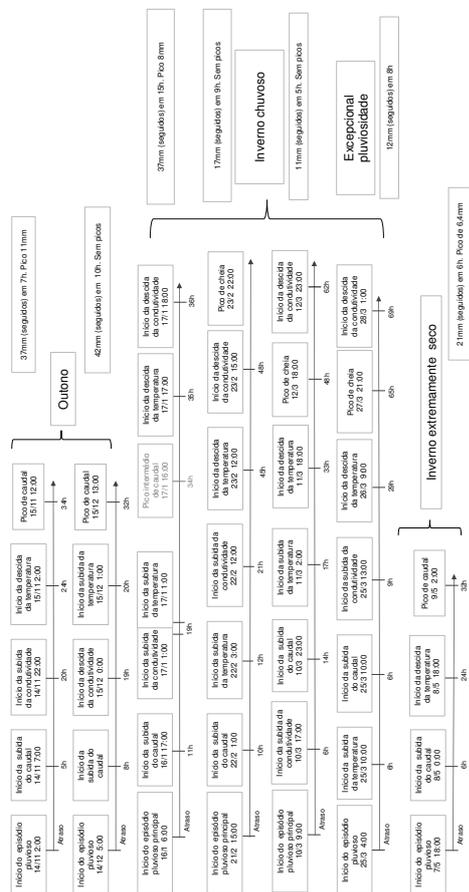


Figura II.IV.18 – Representação esquemática dos atrasos da resposta da exurgência dos Olhos d'Água do Anços para alguns episódios de recarga em diferentes contextos hidrometeorológicos de 2011/2012 e 2012/2013

(vii) esse funcionamento simultâneo de diferentes estruturas no interior do hidrossistema em estudo é muito frequente ocorrer no início do ano hidrológico (ou após longos períodos sem precipitação), uma vez que a velocidade de circulação na rede de condutas é máxima nessa altura, pelo que a chegada da água recentemente infiltrada ocorre ainda na fase de efeito-pistão. Durante o Inverno e início da Primavera, esta situação altera-se, com a água proveniente do escoamento rápido a atingir o exutório várias horas após o efeito-pistão inicial. Esta situação é detectável pelo facto de ser a condutividade eléctrica o parâmetro que responde em primeiro lugar (subida), seguido, passado algumas horas, pela descida da temperatura;

(viii) a sequência típica da resposta do caudal dos Olhos d'Água do Anços a um episódio de recarga no início do ano hidrológico: (i) a subida inicial do caudal é acompanhada da subida da condutividade eléctrica e da temperatura; (ii) ao aumento consistente de caudal corresponde a descida brusca da temperatura (cerca de 0,3 a 0,4°C) e estabilização ou até subida da condutividade; (iii) a continuação da subida e o pico de caudal são acompanhados pela descida acentuada da condutividade eléctrica e pela continuação da descida da temperatura. Este comportamento ocorreu quer no ano seco quer no ano húmido e parece ser independente do tipo de evento pluvioso (prolongado ou concentrado);

(ix) nos meses mais chuvosos, a sequência típica da resposta do caudal dos Olhos d'Água do Anços a um episódio de recarga é a seguinte: (i) a subida inicial do caudal é acompanhada da subida da condutividade e da temperatura; (ii) parte da curva de crescimento e o pico de caudal caracterizam-se pela descida da temperatura e da condutividade; (iii) após o mínimo, ambas as variáveis vão subindo de forma gradual, revelando a importância e a duração do escoamento diferido nos Olhos d'Água do Anços. Portanto, a subida inicial do caudal é feita com base em água que já estava no hidrossistema (efeito-pistão), que é empurrada pelo impulso de pressão sobre a zona saturada. O pico de caudal ou de cheia e o início da recessão correspondem a água proveniente do escoamento rápido;

(x) no Outono verifica-se diferença na velocidade de resposta do hidrossistema perante diferentes modos de recarga: a ocorrência de episódios de precipitação abundante e muito concentrada conduz a uma resposta muito mais rápida da exurgência (entre 3 e 8 horas desde o início da chuvada ao aumento inicial do caudal). Se a precipitação for persistente e menos abundante esse atraso sobe para 10 horas;

(xi) o atraso da resposta inicial da exurgência, induzida pelo impulso de pressão, é superior quando o hidrossistema tem pouca água no seu interior (Outono ou após longos períodos sem precipitação) variando entre as 19 h e as 24 h. No final do Inverno esse atraso

é muito menor (cerca de 6 a 8 h) dado o impulso de pressão se propagar mais rapidamente em meio aquático;

(xii) o tempo médio de atraso da resposta da exsurgência (provocado pelo impulso de pressão) é substancialmente diferente do atraso médio entre o início do episódio chuvoso e a chegada dessa água à exsurgência (tempo de atravessamento – *transit time*): o primeiro foi de 7 horas e o segundo de 30 horas⁴⁵, atrasos que dependem do estado hidráulico prévio do hidrossistema e das características do evento pluvioso. No que se refere ao tempo de atravessamento da água recém-infiltrada, os menores atrasos ocorreram em alturas que se seguiram a longos períodos de águas baixas (episódios outonais e em Maio de 2012 após um Inverno extremamente seco quando a rede de drenagem está praticamente vazia e a transmissividade é máxima). Ocorreram, também, na sequência de eventos pluviosos mais concentrados e com picos horários destacados; enquanto os maiores atrasos ocorreram de Janeiro a Março de 2003 (abundante recarga num contexto de elevada quantidade de água já no interior do hidrossistema).

(xiii) a análise da evolução temporal da temperatura e da condutividade eléctrica do caudal dos Olhos d'Água do Anços veio comprovar a dualidade do hidrossistema de Degracias-Sicó já revelada pelos dois métodos anteriores, em especial a análise de séries temporais. Assim sendo, verifica-se, por um lado, que a variação da temperatura e da condutividade é pequena, mostrando que existe um contacto suficientemente longo com a rocha para haver algum equilíbrio térmico e de mineralização da água, o que revela o carácter inerte do hidrossistema assim como a retenção temporária no seu interior, a existência de reservas consideráveis na zona saturada e o esvaziamento lento do hidrossistema. Por outro lado, a descida abrupta da temperatura e da condutividade eléctrica pouco tempo após o início da subida do caudal confirma a presença de escoamento directo no caudal, o que demonstra, de modo inequívoco, a existência, pelo menos em alguns sectores do hidrossistema, de uma rede organizada e funcional de condutas onde ocorre circulação rápida desde a área de recarga até ao exutório. Essa circulação, em situação de recarga muito elevada e concentrada e com a rede de drenagem hipogea praticamente sem água, pode ocorrer em regime turbulento, dinâmica hidrológica deduzida da turvação da água dos Olhos d'Água do Anços, cuja cor acastanhada revelou o dismantelar e transportar de sedimentos existentes em galerias subterrâneas.

A terminar este ponto de análise e o capítulo dedicado ao estudo aprofundado da dinâmica hidrológica no hidrossistema cársico de Degracias-Sicó apresentamos um esque-

⁴⁵ Valor semelhante ao apresentado na análise do hidrograma de dados diários e ao valor obtido na análise de séries temporais (*Parte II, Capítulo IV*).

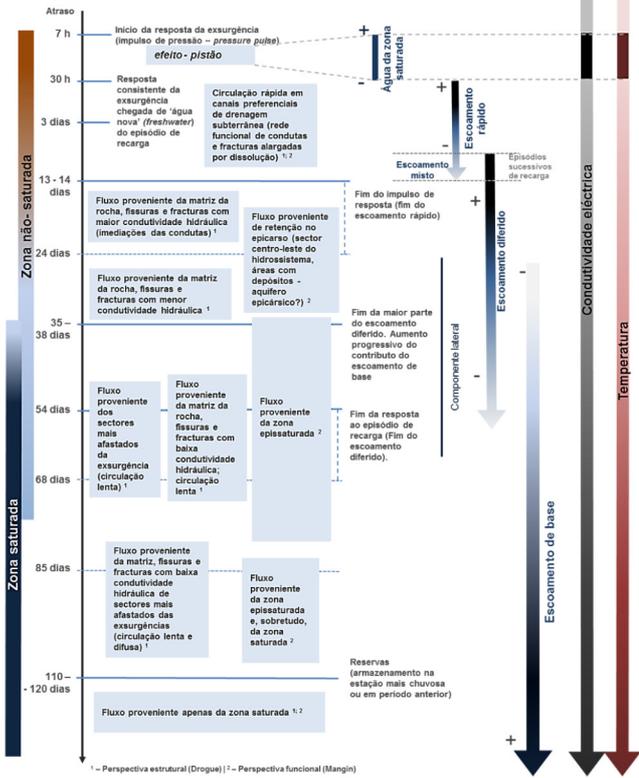
ma-síntese onde se conjugam, em forma de sequência temporal, as ilações que foram sendo retiradas ao longo deste extenso Capítulo IV – Figura II.IV.9. Procurámos reunir, numa só imagem, o modo e o tempo de resposta da exsurgência, os tipos de circulação subterrânea, os vários tipos de escoamento e respectiva duração no caudal dos Olhos d'Água do Anços e a proveniência provável desses escoamentos. Neste último ponto, em razão dos diferentes entendimentos conceptuais de um hidrossistema cársico, decidimos servir-nos de ambas as perspectivas (estrutural e funcional) para entender melhor, e de forma sequencial, a complexa e heterogénea hidrodinâmica deste sistema cársico.

De salientar, tal como referido anteriormente (Figura II.IV.8), que se trata de um esquema puramente teórico, que não tem em consideração o momento do ano hidrológico em que ocorre o episódio de recarga, nem as características do mesmo. Refere-se apenas ao que podemos considerar como o comportamento-padrão do hidrossistema em estudo.

(na página seguinte)

Figura II.IV.9 – Sequência temporal (completa) do funcionamento hidrológico do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó na resposta a um episódio de recarga elaborada a partir dos resultados da análise do hidrograma e do comportamento da temperatura e da condutividade eléctrica da água da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços

Precipitação – Infiltração (RECARGA)



PARTE III

**A ESPECIFICIDADE DA HIDRODINÂMICA CÁRSICA.
O HIDROSSISTEMA DE DEGRACIAS-SICÓ NO CONTEXTO
HIDROLÓGICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARUNCA**

CAPÍTULO I

A PARTICULARIDADE DO SECTOR CÁRSICO NA DIVERSIDADE HIDROGEOMORFOLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARUNCA

1. Considerações metodológicas

Esta última parte do trabalho apresenta os resultados do estudo da relação precipitação – caudal em dois sectores da bacia hidrográfica do rio Arunca com funcionamento hidrológico distinto: a sub-bacia do rio Arunca (sector não-cársico) e o hidrossistema cársico de Degraças-Sicó (que ocupa praticamente toda a sub-bacia do rio Anços, curso de água que recebe a água drenada pelas exsurgências do bordo ocidental deste hidrossistema).

A instalação de duas sondas de nível, uma no rio Arunca (estação hidrométrica do Sobral) e outra na exsurgência dos Olhos d'Água do Anços, permitiu a obtenção de registos contínuos e digitais simultâneos que possibilitaram a comparação da hidrodinâmica dos sectores cársico e não-cársico e, assim, a comprovação da especificidade da hidrodinâmica cársica. A partir dos registos da precipitação e do caudal, primeiramente numa escala temporal diária e, posteriormente, ao nível do evento hidrometeorológico (valores horários de ambas as variáveis), faz-se uma análise comparativa e temporalmente coincidente entre a resposta hidrológica do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó e da sub-bacia do rio Arunca, neste caso tendo como referência a secção de vazão do Sobral (próxima da confluência com o rio Anços).

Deste modo, ao mesmo tempo que conhecemos e compreendemos melhor a resposta hidrológica do sector não-cársico, comprovamos a especificidade da hidrodinâmica cársica, enquadrando, agora, os seus comportamentos muito particulares, que vimos analisando ao longo de todo este estudo.

371

Trata-se, efectivamente, de duas hidrodinâmicas distintas no interior da mesma unidade hidrogeomorfológica (bacia hidrográfica do rio Arunca), pelo que consideramos da máxima pertinência a sua comparação no seguimento de episódios pluviosos que ocorrem quase em simultâneo. Para isso, no caso do funcionamento cársico, serão consideradas a estação udográfica da Sra. da Estrela e a estação hidrométrica da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços e, no caso da sub-bacia do rio Arunca, consideramos a estação udográfica de Santiago de Litém (cabeceiras da bacia) e a estação hidrométrica de Sobral no período que se estende de 7 de Fevereiro de 2010 a 30 de Setembro de 2013. Com a utilização das duas estações udográficas, evitaram-se as incertezas inerentes à distribuição espacial das chuvadas e, principalmente, às perturbações introduzidas pelo factor *relevo* (Maciço Calcário de Sicó, onde se atingem altitudes superiores a 500 m em comparação com os 30 m do vale do rio Arunca neste sector intermédio).

A primeira abordagem centra-se na caracterização da dinâmica hidrológica a nível diário, de modo a fornecer uma perspectiva inicial do tipo de resposta bem como do tempo de resposta aproximado de ambos os sectores da bacia¹. No entanto, a escala diária em termos de análise hidrológica é grosseira, pelo que, na segunda parte deste capítulo, abordaremos com bastante pormenor essa hidrodinâmica a partir dos valores horários da precipitação e do caudal. Convém, no entanto, esclarecer que os valores horários de caudal utilizados correspondem a um valor médio resultante de três medições, uma vez que as sondas de nível de ambas as estações hidrométricas foram programadas para registar o nível da água com uma periodicidade de 20 minutos.

Esta análise abrange episódios que ocorreram no Outono, Inverno e na Primavera de forma a obtermos um maior conhecimento do comportamento hidrológico de cada um dos sectores da bacia e, assim, anteciparmos a sua resposta perante determinados episódios pluviosos em diferentes alturas do ano. A comparação da resposta do caudal à ocorrência de precipitação entre um sector cársico e um sector não-cársico tem de ser extremamente cuidadosa, já que os factores intervenientes são muito diferentes e as hidrodinâmicas são, por si só, profundamente distintas, uma com circulação à superfície (drenagem exorreica, neste caso) e outra com circulação totalmente subterrânea (drenagem criptorreica).

No caso da hidrodinâmica fluvial, a relação precipitação-caudal é relativamente simples, com a alternância entre o domínio de escoamento directo (no seguimento da ocorrência de precipitação), a presença de algum escoamento intermédio e o domínio total do escoamento de base, neste caso quando não se verifica precipitação e o caudal é alimentado apenas pelas reservas aquíferas. No caso da hidrodinâmica cársica, como vimos

¹ A necessidade de proceder a comparações entre a hidrodinâmica fluvial e a hidrodinâmica cársica levou a que, mesmo aplicando métodos específicos em cada caso, utilizássemos a terminologia da hidrologia fluvial (em particular do hidrograma unitário teórico) para designar os diferentes momentos e tempos na resposta a um determinado evento de recarga (por exemplo, *tempo de resposta*, *tempo de crescimento*).

ao longo deste estudo, as surgências apresentam respostas muito variadas e complexas aos eventos pluviosos (e de recarga), em função principalmente do tipo de recarga, das características e estruturação/funcionalidade da rede subterrânea de drenagem e do estado hidráulico do hidrossistema podendo, por isso, a resposta variar de apenas algumas horas a vários dias. Acresce ainda, como vimos no presente estudo, que a resposta dos hidrossistemas cársicos compreende dois momentos muito particulares: uma 'primeira' resposta decorrente do impulso de pressão, notada nas surgências pela variação química e física das águas e uma ligeira subida no caudal (início da curva de crescimento) e uma 'segunda' resposta que corresponde à chegada ao exutório da água recém-infiltrada e que se traduz na subida efectiva e contundente do caudal.

Apesar da complexidade e da especificidade da resposta dos hidrossistemas cársicos à precipitação e a dificuldade da análise comparativa com a resposta dos meios porosos e fracturados, consideramos que, no presente caso, esse exercício é possível já que é a precipitação a única forma de recarga em ambos os casos.

2. Caracterização breve dos sectores inicial e intermédio (área não-cársica)

A bacia hidrográfica do rio Arunca é a maior e mais extensa do sector terminal da bacia hidrográfica do rio Mondego, ocupando uma área de, aproximadamente, 550 Km². Os principais cursos de água desta bacia são o rio Arunca e o seu principal tributário, o rio Anços, embora mereçam referência, pela importância hidrológica para a cidade de Pombal, as ribeiras de Valmar e do Outeiro das Galegas e o Ribeiro do Vale, todos afluentes da margem direita do rio Arunca.

O rio Arunca é a principal linha de água da bacia e o principal afluente da margem esquerda do Mondego, no seu troço final, estendendo-se desde as proximidades de Albergaria-dos-Doze (Pombal) até Montemor-o-Velho, numa extensão de, aproximadamente, 55 Km, num percurso rigidamente orientado, por força de condicionamentos tectónicos, de sul para norte. O seu principal tributário, o rio Anços, apresenta orientação semelhante, correndo em vale bastante aberto desde a Redinha (Pombal) até Soure. Nas imediações desta vila abandona claramente a direcção SSE-NNW e passa a correr de ESE para WNW. O rio Anços tem grande parte do seu percurso inicial e intermédio junto à bordadura ocidental do hidrossistema de Degraças-Sicó, sendo o seu escoamento assegurado pelo caudal das exurgências que drenam este sistema cársico para ocidente.

A bacia hidrográfica do rio Arunca, até à vila de Soure (excluindo, portanto, o sector vestibular) pode ser dividida em duas sub-bacias, de dimensões bastantes desiguais: a bacia hidrográfica do rio Anços, no sector centro-leste, que engloba o hidrossistema de Degraças-

373

-Sicó (cerca de 20% do conjunto da bacia) e a sub-bacia do rio Arunca, cujas cabeceiras correspondem a áreas com altitudes até aos 350 m e declives por vezes acentuados (>32%) e a restante sub-bacia se estende por terrenos baixos (altitude inferior a 50 m) e bastante planos (declive inferior a 8%), configurando os restantes 80% – Figura III.1.1

Uma das principais diferenças entre estas sub-bacias (rio Anços e rio Arunca) reside nas componentes litológica e estrutural, uma vez que grande parte da sub-bacia do rio Anços corresponde ao Maciço Calcário de Sicó (e, por conseguinte, ao hidrossistema cársico de Degraças-Sicó), profundamente afectado pela tectónica e pela carsificação, aspectos que condicionam a hidrodinâmica desta área, como vimos ao longo deste estudo.

Em contrapartida, a sub-bacia do rio Arunca, que corresponde aos sectores montante e intermédio da área total da bacia do rio Arunca desenvolve-se em formações sedimentares detríticas essencialmente terciárias (sector intermédio da bacia, onde dominam os depósitos paleogénicos e miocénicos de origem continental, geralmente espessos, cobertos por formações pliocénicas) e em terrenos cretácicos e do Jurássico superior (cabeceiras e sector montante da bacia).

A dinâmica hidrológica reflecte as diferenças em termos de litologia e fracturação, com a individualização nítida de duas hidrodinâmicas: (i) por um lado, a hidrodinâmica cársica, de uma profunda complexidade e especificidade, com circulação subterrânea e, por isso, uma rede de drenagem superficial escassa e pouco desenvolvida, apresentando apenas uma ligeira dinâmica residual de superfície em locais onde existem depósitos gresosos que, localmente, podem dificultar a infiltração; (ii) por outro lado, a hidrodinâmica fluvial, decorrente de uma rede hidrográfica superficial, por vezes de grande densidade, que drena, à superfície, a água caída sobre os terrenos do Jurássico superior e do Cretácico, no sector montante da bacia, e as formações sedimentares detríticas do sector intermédio da bacia – Figura III.1.2. Assim sendo, a área de recarga do hidrossistema de Degraças-Sicó (Serras do Rabaçal e de Sicó e, principalmente, Planalto Degraças-Alvorge) promove uma elevada infiltração devido às suas características geomorfológicas (elevada fracturação e carsificação), enquanto o sector não-cársico da bacia do rio Arunca favorece o escoamento superficial por se tratar de formações predominantemente argilosas, que dificultam a infiltração.

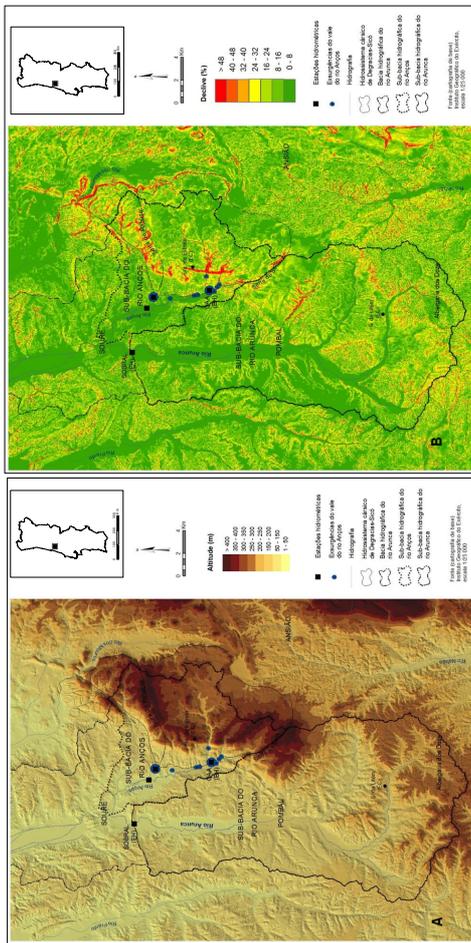


Figura III.1.1 – As sub-bacia do rio Arunca e do rio Anunca e o hidrossistema cársico de Degracias-Sicó no conjunto da bacia hidrográfica do rio Arunca. Mapa hipsométrico (A) e mapa de declives (B) com a localização das estações hidrométricas (EH) e climatológicas (EC) em cada um dos sub-sectores em estudo (OAA – Oltos d'Água do Anços)

375

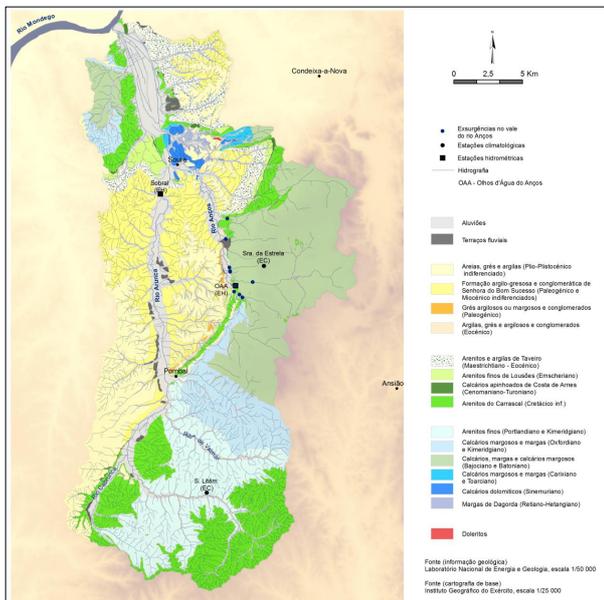


Figura III.1.2 – A litologia e a rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Arunca²
 EC – Estação climatológica; EH – Estação hidrométrica

A sub-bacia do rio Arunca, que engloba as cabeceiras e grande parte do sector intermédio de toda a bacia do rio Arunca pode dividir-se em duas partes: (i) a área das cabeceiras que se desenvolve em materiais do Jurássico superior e do Cretácico, de declives acentuados e áreas com altitudes que oscilam entre os 250 e os 340 m); (ii) a área intermédia, entre Pombal e Soure, com espessos depósitos paleogénicos e miocénicos, de

² A litologia foi representada à escala original (1/50 000); a rede de drenagem à escala original (1/25 000). As linhas de água desenhadas sobre os calcários do Batonian e do Bajociano correspondem a formas de relevo (vales), não apresentando dinâmica hidrológica de superfície, uma vez que estamos em meio cársico (hidrossistema cársico de Degracias-Sicó), onde a água precipitada se infiltra, escoando subterraneamente até às exsurgências do vale do rio Anços.

origem continental, cobertos por um complexo pliocénico de base marinha, parte média continental e parte superior com depósitos greso-argilosos e conglomeráticos continentais do Pliocénico ou até mesmo Calabriano, encimados por uma plataforma marinha que se desenvolve entre os 120 e os 170 m de altitude (Manupella *et al.*, 1978).

O sector intermédio da bacia do rio Arunca corresponde a uma extensa área que se estende para oeste do Maciço Calcário de Sicó, de terrenos baixos e planos, onde predominam pequenas colinas talhadas em materiais cenozóicos com altitudes que rondam os 100 a 180 m de cimos aplanados. Estas colinas gresosas são, segundo Almeida *et al.* (1990), as construídas a partir de uma superfície ligada a depósitos plio-calabrianos, testemunhando um episódio transgressivo do final do Pliocénico ou do Calabriano, superfície que foi sendo desmantelada pela instalação e organização hierárquica das linhas de água, entre elas o rio Arunca e os seus afluentes. Neste sector da bacia do rio Arunca, ao contrário do que acontece nas proximidades do rio Mondego, ainda se conservam largos retalhos desta plataforma, dado o menor desmantelamento pelo entalhe da rede de drenagem. A natureza lítica desta superfície plio-quadernária (maioritariamente grés, argilas, grés-argilosos, conglomerados) e das unidades que lhe subjazem (alternância de grés argilosos, por vezes conglomeráticos, de argilas e de alguns níveis margosos) é responsável pelo desenvolvimento de uma densa rede de drenagem, que rapidamente encaminha o escoamento, após uma chuvada, até ao rio Arunca, transportando uma enorme carga sólida.

As cabeceiras da bacia do rio Arunca ocupam uma extensa área a SSW do Maciço Cársico de Sicó, correspondente a afloramentos do Jurássico superior (principalmente Portlandiano-Kimeridgiano), aos quais se sobrepõem extensas manchas de arenitos cretácicos (Arenitos do Carrascal). É uma área caracterizada por um relevo mais ou menos ondulado, cujas altitudes máximas não ultrapassam os 350 m. Os afloramentos jurássicos são constituídos por arenitos argilosos com intercalações de argilas e margas, bancadas de calcários margosos ou gresosos e grés margosos, normalmente brandos. Os afloramentos cretácicos, que se sobrepõem nesta área às formações jurássicas, são constituídos por arenitos argilosos, argilas e conglomerados consolidados por cimento argiloso (Manupella *et al.*, 1978; Teixeira *et al.*, 1968). A composição essencialmente argilosa e margosa destas formações incute-lhe um carácter global de baixa permeabilidade, explicando, assim, a elevada densidade de drenagem que caracteriza estes afloramentos. No caso dos Arenitos do Carrascal, segundo Santos (2009), a densidade de drenagem varia entre 3,5 Km/Km² e 6,5 Km/Km² atingindo, em alguns locais, valores superiores a 6,5 Km/Km², tratando-se, por isso, de áreas muito bem drenadas³.

³ O autor adoptou a classificação presente em Franco e Lencastre (1992), segundo a qual, valores de densidade de drenagem até 3,5 km/km² indicam uma bacia com uma boa drenagem; valores superiores a 3,5

A elevada densidade de drenagem que caracteriza esta área de cabeceiras da bacia contribui para um tempo de resposta aos eventos pluviosos bastante mais reduzido quando comparado com uma bacia com má drenagem, uma vez que a água, após uma chuvada, chega com maior rapidez ao canal principal. Acresce ainda, em situação de ocorrência de precipitação, o escoamento proveniente da densa rede de drenagem do sector intermédio, que, juntamente com o escoamento proveniente das áreas mais a montante, provoca uma subida rápida do nível da água na secção de referência (estação hidrométrica do Sobral).

Como se pode constatar pelas características do sector cársico e respectiva dinâmica hidrológica (estudadas pormenorizadamente neste trabalho) e pelas características físicas principais do sector não-cársico, aqui brevemente apresentadas, estamos em presença de duas hidrodinâmicas profundamente diferentes, cujo estudo comparativo se impõe.

3. As hidrodinâmicas cársica e fluvial: análise comparativa através do caudal diário médio

Numa perspectiva geral, o hidrograma do rio Arunca apresenta uma grande flutuação dos caudais, com curvas de crescimento muito pronunciadas, revelando uma resposta rápida e exuberante, em particular a episódios de chuva intensa. A subida acentuada dos valores do caudal, após algumas horas de precipitação, para valores várias vezes superiores ao caudal instantâneo no início da subida é uma característica deste curso de água. Este tipo de resposta ocorre no final do Outono e, principalmente, no Inverno e no início da Primavera (quando a quantidade de água acumulada no sistema-bacia é já bastante elevada). No início do Outono a resposta do rio, embora rápida, é pouco pronunciada, mesmo que se trate de quantitativos pluviométricos elevados (superiores a 20mm diários), o que se explica pela elevada evapotranspiração que ainda se verifica no final de Setembro e em Outubro e pela influência da vegetação e do solo, que está a repor a sua reserva de água após o estio.

Este comportamento hidrológico é comum a todos os anos em estudo, independentemente das características hidrometeorológicas gerais de cada ano. No entanto, se o comportamento é similar, a magnitude da resposta difere consoante a quantidade de precipitação acumulada até ao momento em que ocorre o novo episódio. Esta realidade é visível nos valores máximos de caudal diário médio e caudal instantâneo dos anos de 2011/2012 e de 2012/2013, os mais contrastados da série em estudo. No primeiro ano em causa, esses valores foram de 9,5 m³/s (valor diário) e 19,5 m³/s (valor instantâneo);

km/km² revelam que as bacias são muito bem drenadas. A fórmula utilizada: $D_d = L/A$ em que L é o comprimento total de todas as linhas de água e A a área.

enquanto em 2012/2013 (ano húmido) foram de 55,1 m³/s e 76,9 m³/s, respectivamente (Quadro III.1.1). No caso de 2011/2012 (ano muito seco), os valores foram, portanto, incomparavelmente mais baixos, mesmo tendo ocorrido episódios de precipitação igualmente intensa.

A apresentação de valores de caudal característicos do rio Arunca e da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços bem como o cálculo de algumas medidas de dispersão revelaram algumas diferenças e semelhanças, ainda que de carácter genérico entre os dois sectores em análise.

Quadro III.1.1 – Valores característicos do caudal e medidas de tendência central e de dispersão, por ano hidrológico, para as séries de caudal diário médio do rio Arunca (sub-bacia) e da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços

	2009/2010*	2010/2011	2011/2012	2012/2013	Série completa	
Rio Arunca (Goire)	Caudal diário médio máximo (m ³ /s)	19,8	31,2	9,5	55,1	55,1
	Caudal diário médio mínimo (m ³ /s)	1,1	1,3	1,6	1,9	1,1
	Caudal instantâneo máximo (m ³ /s)	47,1	61,5	9,5	76,9	76,9
	Caudal instantâneo mínimo (m ³ /s)	1,1	1,9	1,1	1,8	1,1
	Caudal anual médio (m ³ /s)	2,4	3,6	2,6	5,1	3,5
	Percentil 50 (m ³ /s)	1,7	3,6	2,7	4,0	3,0
	75 (m ³ /s)	2,6	3,8	2,8	4,8	3,6
	90 (m ³ /s)	4,1	5,9	3,4	9,2	5,4
	Caudal específico (l/s/km ²)	9,6	14,4	10,4	20,4	14,0
	Desvio-padrão (m ³ /s)	2,1	3,1	0,9	6,2	3,9
	Coefficiente de flutuação	17,9	24,0	5,9	29,0	50,1
	Coefficiente de variação (%)	88,6	86,1	34,6	121,6	111,4
	Olhos d'Água do Anços	Caudal diário médio máximo (m ³ /s)	5,6	4,3	2,6	5,8
Caudal diário médio mínimo (m ³ /s)		0,2	0,2	< 0,2	0,2	< 0,2
Caudal instantâneo máximo (m ³ /s)		5,7	4,3	2,7	5,8	5,8
Caudal instantâneo mínimo (m ³ /s)		0,2	0,2	< 0,2	0,2	< 0,2
Caudal anual médio (m ³ /s)		2,0	1,1	0,4	1,7	1,3
Percentil 50 (m ³ /s)		1,2	1,4	0,3	2,1	1,2
75 (m ³ /s)		2,8	1,6	0,3	2,7	1,6
90 (m ³ /s)		4,0	2,5	1,0	4,6	3,3
Caudal específico (l/s/km ²)		19,5	11,1	4,2	17,0	12,9
Desvio-padrão (m ³ /s)		1,7	1,0	0,4	1,6	0,8
Coefficiente de flutuação		24,7	18,9	13,0	28,7	28,8
Coefficiente de variação (%)		84,8	87,7	93,1	96,8	83,1

* Cálculos elaborados a partir de 7 de Fevereiro de 2010

Coefficiente de flutuação = Máximo/Mínimo Coeficiente de variação (%) = (Desvio-padrão/Média)*100

A principal diferença reside nos valores do desvio-padrão, muito superiores no caso do rio Arunca, o que mostra a maior irregularidade deste sector da bacia hidrográfica do rio Arunca, justificada pela ocorrência de valores muito elevados de caudal na ponta de cheia, dado tratar-se de uma sub-bacia com características físicas que favorecem essa

379

hidrodinâmica: (i) declives acentuados nas cabeceiras desta sub-bacia; (ii) carácter pouco permeável dos Arenitos do Carrascal, que predominam nesta área; (iii) densa rede de drenagem ao longo de toda a sub-bacia; (iv) forma rectilínea da maior parte do percurso do rio Arunca; (v) não existir interferência antrópica relevante em termos de represamento da água ao longo da linha de água principal e dos seus principais afluentes.

Contudo, a variabilidade do caudal, embora com menor diferença entre os valores máximo e mínimo, é também uma característica dos Olhos d'Água do Anços, que, em alguns anos, apresenta valores de coeficiente de variação e de flutuação superiores aos do rio Arunca. Relativamente à variação quantitativa do caudal diário médio, a observação mais detalhada da série no rio Arunca mostra destacadas variações como resposta à precipitação, das quais se pode destacar, por ordem estacional, os seguintes episódios:

- . de 3,2 m³/s para 9,5 m³/s (subida de 2,9 vezes) – 14 para 15 de Novembro 2011;
- . de 3,2 m³/s para 10,5 m³/s (subida de 3 vezes) – 20 para 21 de Dezembro 2010;
- . de 13,4 m³/s para 55,1 m³/s (subida de 4,1 vezes) – 18 para 19 de Janeiro 2013;
- . de 6,1 m³/s para 31,2 m³/s (subida de 5,1 vezes) – 5 para 7 de Janeiro 2011;
- . de 4,4 m³/s para 19,8 m³/s (subida de 4,5 vezes) – 24 para 25 de Fevereiro 2010;
- . de 7,2 m³/s para 23,7 m³/s (subida de 3,3 vezes) – 18 para 19 de Fevereiro 2011;
- . de 9,9 m³/s para 33,7 m³/s (subida de 3,4 vezes) – 25 para 26 de Março 2011;
- . de 2,9 m³/s para 25,1 m³/s (subida de 8,7 vezes) – 17 para 18 de Maio 2011.

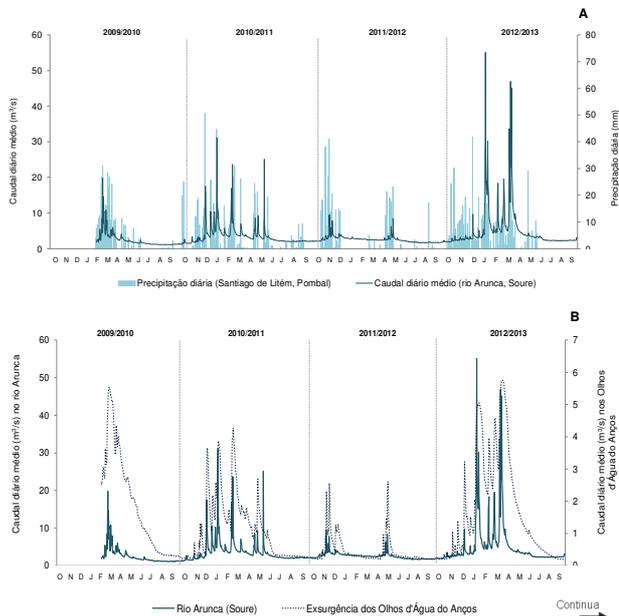
Essas oscilações bruscas no caudal do rio Arunca em resposta à precipitação, como se pode ver nos exemplos supra-referidos e nas representações que se seguem (Figura III.1.2), verificam-se em qualquer altura do ano hidrológico e não dependem do volume de água escoado no momento da ocorrência de precipitação. Para além disso, podem também ocorrer quer num ano seco, quer num ano húmido, embora com muito menor expressividade no caso do ano seco, particularmente no que se refere a valores máximos de caudal.

Se compararmos os exemplos anteriores com os apresentados para a exsurgência dos Olhos d'Água do Anços (Parte II, Capítulo IV, ponto 1), em conjugação com os gráficos do caudal diário médio da Figura III.1.3, verifica-se que, em termos gerais, e exceptuando algumas situações hidrológicas muito específicas⁴, a subida acentuada do caudal na sequência de um episódio pluvioso intenso é comum aos sectores cársico e não-cársico da bacia hidrográfica do rio Arunca. A principal diferença na resposta de cada um destes sectores não está no modo como ocorre (por norma é uma subida pronunciada), mas no tempo que o rio e a exsurgência levam a responder a esse episódio. Em termos diários, é comum o pico de caudal no rio Arunca ocorrer no mesmo dia do episódio chuvoso mais

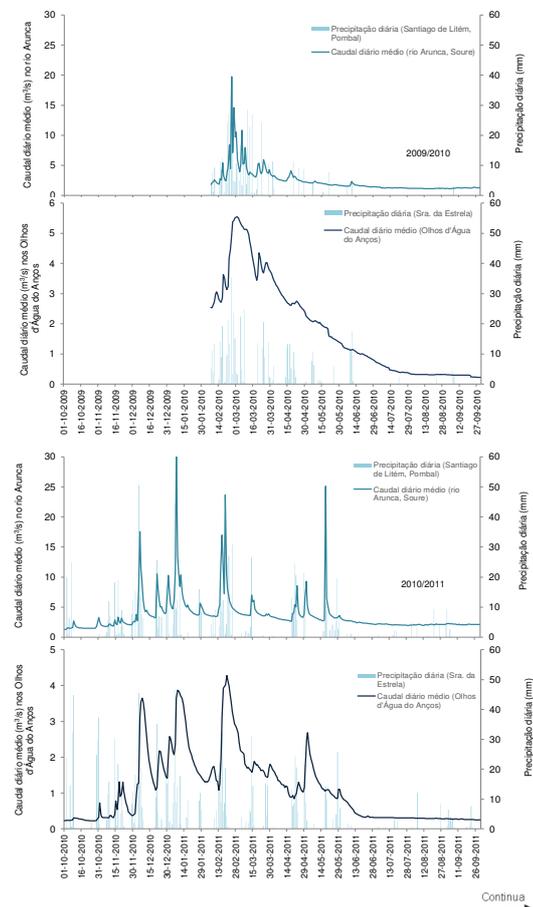
⁴ Por exemplo, situações de caudal muito abundante nos Olhos d'Água do Anços (superior a 4 ou 5 m³/s) no momento em que ocorre o episódio de recarga.

abundante enquanto esse valor sofre um atraso de 1 a 3 dias na exsurgência dos Olhos d'Água do Anços.

Uma das diferenças mais salientes entre estes dois sectores encontra-se na forma menos irregular do hidrograma da exsurgência, com a permanência de quantitativos de caudal muito próximos dos da ponta de cheia durante vários dias, o que se justifica, como vimos, pela enorme capacidade filtrante do hidrossistema cársico de Degracias-Sicó e pelos constrangimentos impostos pela dimensão da galeria subterrânea (sifão vertical) através da qual a água chega até à exsurgência. No rio Arunca, a descida do caudal ocorre no mesmo dia em que se verifica o caudal máximo, mesmo que esse pico ocorra em alturas em que o sistema-bacia já contém bastante água ou ocorra na sequência de um período de precipitação persistente.



381



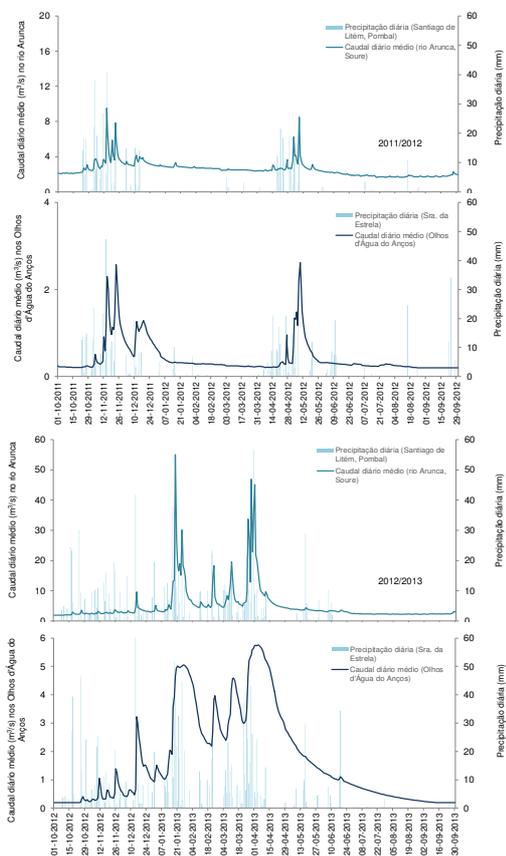


Figura III.1.3 – Hidrograma dos caudais diários médios do rio Arunca (secção do Sobral) e da precipitação em Santiago de Litém (A); hidrograma conjunto do rio Arunca e da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços (B); hidrogramas dos Olhos d'Água do Anços com a precipitação da Sra. da Estrela e do rio Arunca com a precipitação de Santiago de Litém, por ano hidrológico

383

A curva de decrescimento constitui, pois, uma das principais diferenças nas características hidrodinâmicas destes dois sectores. O decrescimento do caudal é muito mais lento nos Olhos d'Água do Anços, o que evidencia a continuação da alimentação da exsurgência por escoamento rápido e escoamento diferido (como concluímos anteriormente), enquanto no rio Arunca o predomínio absoluto do escoamento directo traduz-se na descida rápida do caudal logo após cessar ou diminuir consideravelmente a precipitação. O carácter profundamente íngreme da curva de decrescimento é, por isso, uma característica da hidrodinâmica do rio Arunca, ocorrendo tanto em anos com valores de precipitação superiores como inferiores à média e no seguimento quer de períodos prolongados de precipitação quer de episódios de precipitação intensa. Os registos digitais e o trabalho de campo mostraram que o caudal do rio Arunca volta para valores próximos dos do início da subida em poucos dias (menos de uma semana), sendo perfeitamente visível uma descida considerável nas horas seguintes ao pico de caudal.

É também frequente neste período de descida do caudal, a ocorrência de pequenos episódios de precipitação (quantitativa e temporalmente), que têm reflexo imediato no hidrograma do rio Arunca, originando novos picos de caudal (ainda que de menor expressão), podendo mesmo originar uma sucessão de pequenos picos ao longo da curva de decrescimento. Na exsurgência dos Olhos d'Água do Anços esses episódios praticamente não se reflectem no caudal, sendo necessário quantitativos mais elevados de recarga para produzir uma subida do caudal, o que se explica pela referida capacidade do hidrossistema cársico em filtrar pequenos episódios pluviosos.

No intuito de conseguirmos uma imagem nítida e comparativa da hidrodinâmica destes sectores procedemos à representação, em gráfico de dispersão, dos caudais diários médios dos Olhos d'Água do Anços e do rio Arunca por ano hidrológico e na totalidade da série – Figura III.1.4 e Quadro III.1.II.

Numa primeira observação, percebe-se que, à excepção do ano muito seco de 2011/2012, a nuvem de pontos apresenta uma configuração global muito aproximada, mostrando uma variação de caudais muito mais estruturada na exsurgência do que no rio Arunca. Neste caso, percebe-se que a precipitação tem uma influência muito directa no caudal do rio, dada a existência de pontos que se destacam, de forma muito clara, no sentido do eixo das abcissas, o que significa que não é uma subida ou descida gradual, como nos Olhos d'Água do Anços, mas sim picos muito elevados e isolados de caudal em resposta a episódios pluviosos muito intensos (domínio absoluto do escoamento directo). Em contrapartida, os Olhos d'Água do Anços, mostram um comportamento que, apesar de variável consoante a precipitação que alimenta o hidrossistema cársico, tem um funcionamento muito mais regular que o rio, o que se comprova pela nuvem contínua e estruturada de pontos ao longo do eixo das ordenadas.

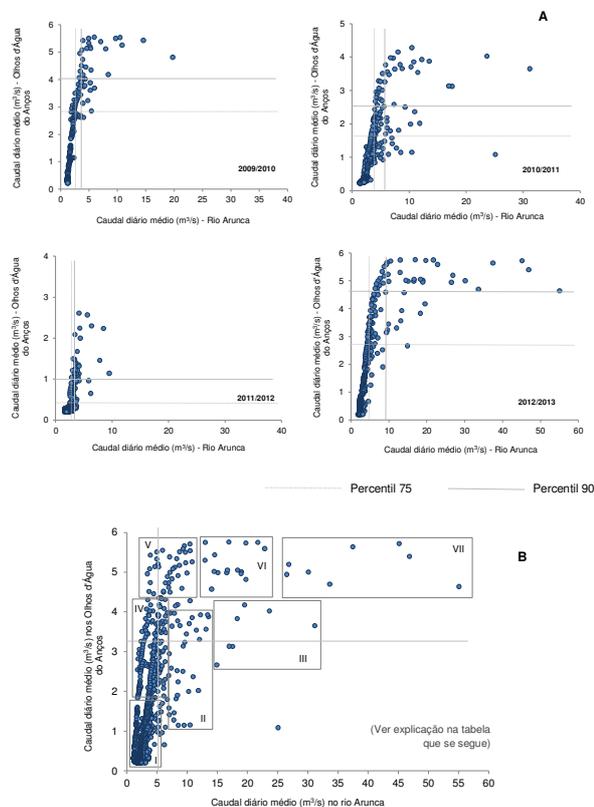


Figura III.1.4 – Representação dos caudais diários médios na exurgência dos Olhos d'Água do Anços e no rio Arunça por ano hidrológico (A) e na totalidade da série (B).
(ver explicação da imagem B no Quadro III.1.II)

385

Quadro III.1.II – Diferentes períodos na dinâmica hidrológica dos sectores cársico (exurgência dos Olhos d'Água do Anços) e não-cársico (sub-bacia do rio Arunça) da bacia hidrográfica do rio Arunça (explicação da Figura III.1.4 B)

Período VII	
Caudal diário médio (m ³ /s) Rio Arunça	Valores máximos de caudal diário médio no rio Arunça e na exurgência dos Olhos d'Água do Anços. Correspondem às principais pontas de cheias, que ocorrem em períodos de elevada pluviosidade, particularmente em anos húmidos.
Exurgência	≥ 25,0
Período VI	
Caudal diário médio (m ³ /s) Rio Arunça	Período imediatamente após as principais pontas de cheia, em que os caudais se mantêm muito elevados nos Olhos d'Água do Anços (próximos dos caudais de ponta de cheia durante várias semanas), mas diminuem rápida e substancialmente no rio Arunça (curva de recessão muito íngreme).
Exurgência	13,0 - 23,0
	≥ 4,6
Período V	
Caudal diário médio (m ³ /s) Rio Arunça	Os caudais diários continuam muito elevados nos Olhos d'Água do Anços, mas no rio descem para valores bastante baixos, próximos dos valores anteriores à subida, existindo, por isso, um nítido contraste entre a descida lenta nos Olhos d'Água do Anços e a descida rápida e acentuada no rio Arunça. Situação característica de Março e Abril em anos normais e tendencialmente húmidos e corresponde ao período de maior disparidade, em termos de valor de caudal, entre os dois sectores.
Exurgência	≤ 10,0
	≥ 4,6
Período IV	
Caudal diário médio (m ³ /s) Rio Arunça	Os caudais diminuem paulatinamente na exurgência (elevado 'efeito-memória' do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó), enquanto no rio Arunça os caudais são já muito baixos, próximos do seu valor médio (cerca de 3,5 m ³ /s). Período que corresponde a grande parte da curva de recessão dos Olhos d'Água do Anços após a entrada de elevada e persistente quantidade de precipitação durante o final do Outono e Inverno em anos normais. Esta situação verificou-se, por exemplo, em Abril e princípio de Maio de 2010.
Exurgência	≤ 6,0
	2,0 - 4,0
Período III	
Caudal diário médio (m ³ /s) Rio Arunça	Este grupo individualiza-se principalmente pelos valores bastante elevados (mas não máximos) de caudal do rio Arunça, que correspondem aos caudais de ponta de cheia em resposta a episódios bastante intensos de precipitação no Inverno e início da Primavera (quando a bacia hidrográfica já possui bastante água). Na exurgência, correspondem a valores de caudal relativamente elevados, que compõem a curva de crescimento do hidrograma, em resposta a esse mesmo episódio pluvioso, mas cuja maior demora de resposta do hidrossistema cársico faz com que não sejam ainda os caudais de ponta de cheia.
Exurgência	15,0 - 32,0
	3,0 - 4,2
Período II	
Caudal diário médio (m ³ /s) Rio Arunça	Este período diferencia-se do Período III pelo facto de os caudais de ponta de cheia do rio Arunça serem inferiores (abaixo dos 14 m ³ /s). Estas pontas de cheia, de muito menor significado, ocorrem como resposta a episódios curtos, mas de intensa pluviosidade e são característicos: (i) do final do Outono, altura em que o caudal dos Olhos d'Água do Anços ainda é relativamente baixo (inferior a 2 m ³ /s); (ii) durante todo o Inverno e início da Primavera, em que o caudal da exurgência é bem mais elevado (entre 2 e 4 m ³ /s) e tais eventos pluviométricos têm repercussão assinalável apenas no rio.
Exurgência	7,0 - 14
	1,2 - 4,0
Período I	
Caudal diário médio (m ³ /s) Rio Arunça	Valores muito baixos e mínimos em ambos os sectores cársico e não-cársico. Correspondem aos caudais nos meses de estio (Junho, Agosto e Setembro), embora sejam também frequentes em Junho e Outubro. Nos anos secos, estes valores podem ocorrer também em meses em que a precipitação é atipicamente baixa (exemplo da seca meteorológica de Dezembro de 2011 a Março de 2012).
Exurgência	≤ 5,0
	≤ 1,8

A Figura III.1.4 mostra o comportamento contrastado tanto do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó como da sub-bacia do rio Arunça (e que caracteriza a hidrologia da região em que se inserem), decalcando nitidamente o regime estacional da precipitação e os episódios de precipitação. Deste modo, percebe-se, por um lado, a significativa estabilidade dos caudais tanto nos Olhos d'Água do Anços como no rio Arunça até um determinado quantitativo (no conjunto da série, 90% dos dias registaram caudais inferiores a 3,3 m³/s e

5,4 m³/s na exsurgência e no rio, respectivamente), revelando, em ambos os casos, que o armazenamento subterrâneo de água é de grande importância na manutenção do escoamento de superfície. Por outro lado, observa-se uma enorme variação nos caudais diários na sequência de episódios intensos de precipitação, variação que é muito mais acentuada no rio Arunca devido ao predomínio do escoamento directo e ao seu funcionamento de superfície. Porém, tais oscilações configuram apenas 10% dos valores diários de caudal, ou seja, durante todo o ano apenas 10% dos dias (cerca de 36 dias) registam caudal médio superior aos valores acima referidos.

No sentido de uma melhor comparação, reunimos, num só gráfico, ambas as séries de caudais diários médios (de 7 de Fevereiro de 2010 a 30 de Setembro de 2013) e, a partir daí, tentámos compreender o funcionamento, em simultâneo, de cada um dos hidrosistemas em análise, estabelecendo períodos relativamente homogêneos que revelem e caracterizem essas dinâmicas hidrológicas – Figura III.1.4 B. Esses períodos, bem como os valores de caudais diários médios que os caracterizam e as hidrodinâmicas cársica e fluvial que aí ocorrem estão sumarizadas no Quadro III.1.II.

A representação gráfica e a respectiva interpretação do funcionamento hidrológico simultâneo dos dois sectores salientaram as semelhanças e, principalmente, as diferenças entre estes sectores, das quais destacamos o recorrente contraciclo entre estas duas hidrodinâmicas, ou seja, a ocorrência de situações de subida de caudal no rio ainda em fase de diminuição do caudal dos Olhos d'Água do Anços (resposta mais rápida do rio) e a descida do caudal no rio ainda em fase de subida do caudal na exsurgência (resposta mais demorada dos Olhos d'Água do Anços).

É frequente, também, verificar-se nos Olhos d'Água do Anços a permanência de uma situação de caudal muito elevado (próximo do valor de ponta de cheia) durante bastante tempo (várias semanas, por vezes) enquanto no rio ocorrem vários picos de caudal, quase sempre de menor significado do que o principal, que os antecedeu. Por conseguinte, compreende-se facilmente a ocorrência de elevados valores de caudal nos Olhos d'Água do Anços e de baixos ou muito baixos no rio, já que, após um máximo instantâneo de caudal, o nível da água no rio diminui de imediato, atingindo rapidamente valores idênticos aos do momento da resposta (valores baixos, por norma inferiores a 10 ou 5 m³/s). Este funcionamento hidrológico tão desigual é o que permite explicar o carácter alongado da nuvem de pontos (ao longo do eixo de ordenadas), onde se pode observar valores diários médios muito altos no contexto dos Olhos d'Água do Anços (superiores a 5,5 m³/s) e muito baixos no contexto rio Arunca (cerca de 5 a 7 m³/s).

387

4. As hidrodinâmicas cársica e fluvial: análise comparativa através do caudal horário (médio)

4.1. O tempo de crescimento e o tempo de resposta

No seguimento do estudo efectuado com base nos valores diários médios de caudal, impõem-se, agora, um aprofundamento dessa análise, com recurso aos valores horários médios, onde sobressaem as diferenças acentuadas entre a hidrodinâmica do sector não-cársico e do sector cársico, permitindo compará-las e sublinhar a especificidade desta última. Nesse sentido, a análise conjunta dos hidrogramas dos valores horários médios de cada sector desde o final do Outono ao início da Primavera⁵, permite quantificar (em horas) alguns dos principais componentes desses hidrogramas e, assim, concluir, de forma fundamentada, as características hidrológicas de cada um dos sectores em análise.

Essa representação dos caudais horários médios do rio Arunca (no Sobral) e da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços mostra, de forma inequívoca, as diferenças existentes entre estes dois sectores, com a identificação de hidrodinâmicas muito particulares, temporalmente desfasadas e, por vezes, em contraciclo – Figura III.1.5⁶.

As principais constatações que se podem retirar da análise atenta desses gráficos são: (i) a resposta dos Olhos d'Água do Anços a um evento pluvioso é sempre posterior à resposta do rio; (ii) o caudal máximo (picos de caudal e pontas de cheia) é atingido mais rapidamente no rio do que na exsurgência; (iii) a forma arredondada e alongada do hidrograma nos Olhos d'Água do Anços, em situação de ponta de cheia, contrasta com a forma muito pontiaguda no rio Arunca; (iv) a curva de decrescimento é extremamente íngreme no rio, enquanto na exsurgência tem uma forma ligeiramente convexa, espelhando a chegada de escoamento diferido; (v) no Outono, ou a seguir a um longo período seco, o desfasamento entre os dois sectores, no que respeita ao início da subida do caudal, é muito menor e o hidrograma dos Olhos d'Água do Anços tem uma forma mais pontiaguda do que o habitual; (vi) o rio rapidamente volta a valores de caudal semelhantes aos registados antes da subida do caudal, enquanto os Olhos d'Água do Anços levam várias semanas, tempo que depende da quantidade de água já existente no hidrossistema, o que não sucede no rio, cujo comportamento é semelhante, qualquer que seja a altura do ano hidrológico.

⁵ Não procedemos à análise de alguns períodos do ano hidrológico (por exemplo período de águas baixas e estiagem) por serem alturas de grande estabilidade dos caudais, com muito pouco interesse neste item de análise e por não ter ocorrido no período estudado qualquer situação merecedora de análise.

⁶ Os gráficos estão dispostos de acordo com a estação do ano, seguindo o ano hidrológico (Outono – Inverno – Primavera) e não com a sequência temporal dos anos (2009/2010-2012/2013), para permitir, assim, a visualização do comportamento hidrológico nos diferentes períodos do ano hidrológico, independentemente do ano em que ocorreram.

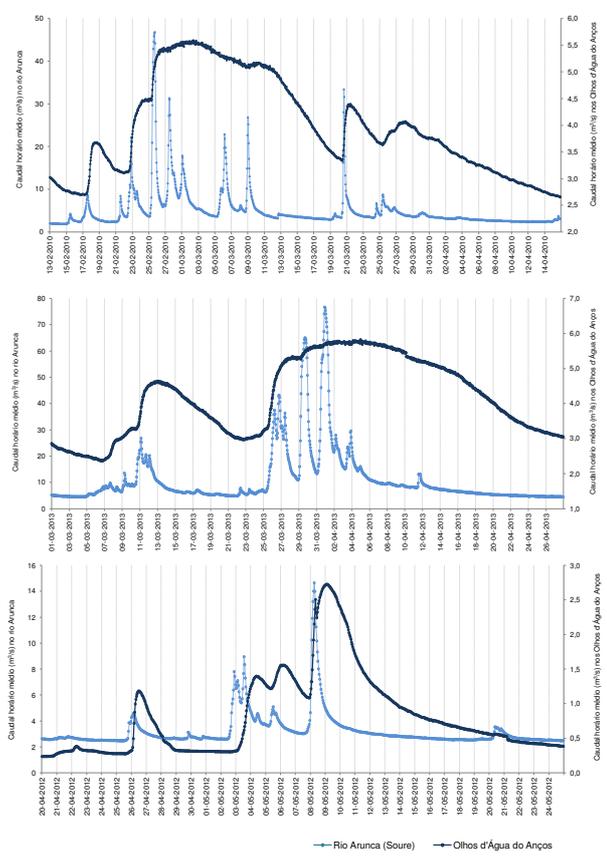
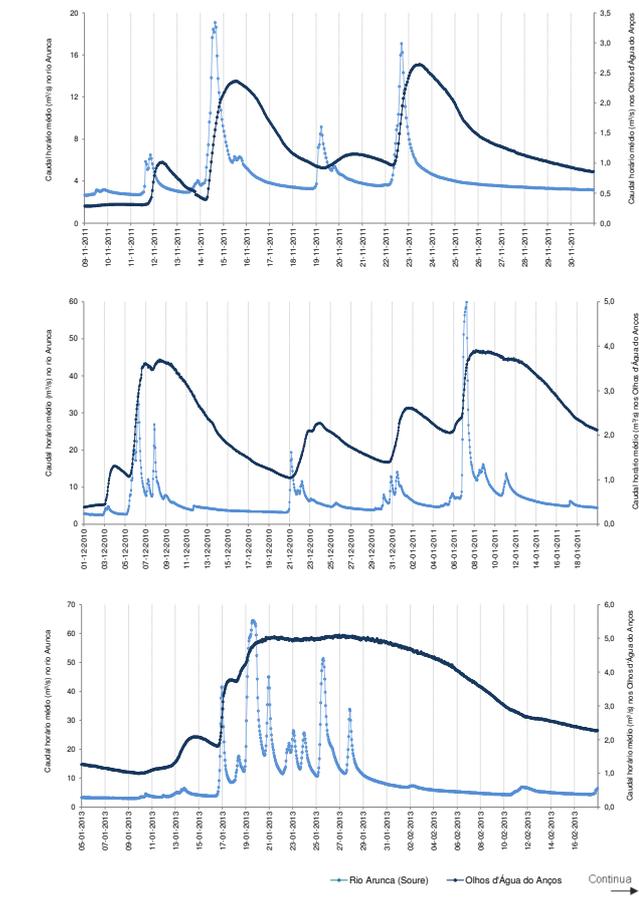


Figura III.1.5 – Caudais horários médios do rio Arunca (Sobral) e da exsurgência dos Olhos d'Água do Anjos

Para além da representação gráfica conjunta dos valores horários médios, procedemos também à determinação, tanto para o rio como para a exsurgência, das diferenças horárias entre o início da subida do caudal e o pico de caudal (*tempo de crescimento*) e também entre o pico de caudal e o final da resposta ao evento pluvioso (*tempo de decrescimento*⁷). Calculámos, ainda, para o mesmo evento hidrometeorológico, o desfasamento temporal: (i) entre o início da subida do caudal no rio e na exsurgência; (ii) entre o momento da ocorrência do pico de caudal em cada um desses locais; (iii) entre o final da resposta à precipitação em cada um dos sectores em análise. Estes valores horários fornecem informação muito exacta sobre a forma como cada um desses sectores responde à precipitação em diferentes contextos sazonais e com diferentes quantitativos de precipitação acumulada até ao momento da subida do caudal – Quadro III.I.III.

Os valores obtidos confirmam a subida muito rápida e acentuada do caudal no rio Arunca, atingindo quantitativos máximos muito elevados em poucas horas, situação que se verifica quer o caudal, no momento da subida, seja escasso ou abundante, como mostram os seguintes exemplos:

- . de 8 m³/s para 27 m³/s em apenas 4 horas (07 de Dezembro de 2010)
- . de 8 m³/s para 61 m³/s em 10 horas (06 Janeiro de 2011)
- . de 5 m³/s para 42 m³/s em 8 h (16 de Janeiro de 2013)
- . de 5 m³/s para 26 m³/s em apenas 3 horas (05 de Março de 2010)
- . de 3 m³/s para 33 m³/s em apenas 6 horas (20 de Março de 2010)
- . de 26 m³/s para 36 m³/s em apenas 5 horas (27 de Março de 2013)
- . de 21 m³/s para 55 m³/s em apenas 5 horas (19 de Janeiro de 2013)

Em média, o *tempo de crescimento* no hidrograma do rio Arunca, no Sobral, é de cerca de 11 horas, valor que sobe para mais do triplo (cerca de 37 horas) na exsurgência, o que revela, nitidamente, a diferença em termos de resposta entre os sectores cársico e não-cársico da bacia hidrográfica do rio Arunca (embora perante um mesmo episódio, o início da subida ocorra apenas com 6 horas de diferença, sendo o rio o primeiro a responder) – Quadro III.I.III. Consta-se, ainda, que o *tempo de crescimento* é sempre inferior no rio Arunca, independentemente do mês em que ocorra essa subida e do contexto hidrometeo-

⁷ O *tempo de decrescimento* é um dos componentes do hidrograma mais difíceis de determinar e corresponde ao tempo que decorre desde a ponta do hidrograma ao ponto de separação entre o escoamento proveniente de um episódio de precipitação (escoamento directo na hidrodinâmica fluvial e escoamento rápido na hidrodinâmica cársica) e o escoamento originado predominantemente pelo contributo das reservas subterâneas (escoamento de base). No presente estudo, considerámos, por isso, genericamente, e em ambos os hidrogramas, a primeira ou segunda inflexão na curva de recessão, que marca exactamente esse ponto. O critério seguido foi a marcação do ponto onde ocorre a maior inflexão, evitando, em algumas situações, logo a primeira inflexão, já que é muito redutora e prematura no caso do rio, dado ocorrer apenas 4 a 5 horas após o pico de cheia, e o escoamento directo continuar a alimentar o caudal do rio na secção considerada. No caso da ocorrência de um novo episódio pluvioso, pouco tempo depois do caudal máximo (até 2 dias depois), considerámos o valor mais baixo de caudal antes da nova subida, tanto no rio como na exsurgência.

Quadro III.I.III – Caracterização da hidrodinâmica fluvial e cársica da bacia do rio Arunca a partir da variação do caudal horário médio (m³/s)

	Precipitação acumulada	Rio Arunca						Olhos d'Água do Anjos						Rio Arunca						Olhos d'Água do Anjos						Arunca - Olhos d'Água do Anjos								
		Q _i		Q _u		Q _f		Q _i		Q _u		Q _f		Q _i		Q _u		Q _f		Q _i		Q _u		Q _f		Q _i		Q _u		Q _f				
		h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s	h	m ³ /s			
2010	NOVEMBRO	SL	11-nov	11-nov	12-nov	11-nov	12-nov	14-nov	14-nov	21-nov	04-dez	20-nov	09-dez	03-dez	7	7	14	13	42	55	6	12	48											
		SE	14:00	21:00	04:00	20:00	09:00	03:00																										
		P _{tot}	195,8	122,6	m ³ /s	3,0	6,5	4,1	2,4	1,0	0,4																							
		P ₁₀₀	195,8	122,6	m ³ /s	14-nov	14-nov	15-nov	14-nov	15-nov	19-nov																							
		P ₅₀	129,0	95,9	m ³ /s	05:00	16:00	08:00	07:00	13:00	05:00	11	16	27	30	88	118					2	22	93										
		P ₁₀	59,2	25,0	m ³ /s	0:00	16:11	5:6	2,4	2,4	0,9																							
					22-nov	22-nov	23-nov	22-nov	23-nov	28-nov																								
					06:00	17:00	09:00	10:00	12:00	06:00		11	16	27	26	114	140					4	19	117										
					0:00	17:11	5:7	1,0	2,6	1,1																								
					Valor médio (horas)							10	13	23	23	81	104					4	18	95										
2010	DEZEMBRO	SL	05-dez	06-dez	06-dez	05-dez	06-dez							26	13	39	32	-	-	8	14	-												
		SE	07:00	08:00	21:00	19:00	23:00	-																										
		P _{tot}	298,6	372,4	m ³ /s	0:00	26:0	9:3	1,6	3,6																								
		P ₁₀₀	188,3	199,4	m ³ /s	07:00	07:00	08:00	07:00	08:00	20:00	4	12	16	14	285	299					1	13	286										
		P ₅₀	106,0	87,2	m ³ /s	17:00	21:00	09:00	18:00	10:00	18:00																							
		P ₁₀	97,6	41,2	m ³ /s	8:0	26:9	9:4	3,4	3,7	1,1																							
					01-dez	01-dez	08:00	07:00	08:00	20:00		5	8	12	46	182	228					12	42	216										
					00:00	06:00	13:00	12:00	23:00	13:00																								
					4:2	19:4	9:3	1,1	2,1	1,4		12	11	22	31	234	264					7	23	251										
					Valor médio (horas)																													
2011	JANEIRO	SL	06-jan	07-jan	07-jan	06-jan	08-jan	25-jan						10	12	22	32	411	443	2	22	236												
		SE	18:00	10:00	22:00	20:00	04:00	07:00																										
		P _{tot}	75,9	61,15	13,76	2,4	3,9	1,64																										
		P ₁₀₀	174,2	118,6	m ³ /s	15:00	00:00	13:00	19:00	16:00	-	9	85		21	-	-					4	16											
		P ₅₀	76,0	80,2	m ³ /s	4:6	41:6	18:5	1:89	3:77																								
		P ₁₀	75,6	79,6	m ³ /s	18:00	00:00	16:00	07:00	18:00	-	4	16	20	37	-	-																	
					23-jan	26-jan	24-jan																											
					17:00	0:00	11:00					7	11	18	-	-	-																	
					13:7	25,6	14,5																											
					04:00	15:00	20:00					11	29	40	-	-	-																	
			11:0	51,3	14,8					6	14	21	-	-	-																			
			27-jan	27-jan	29-jan																													
			15:00	21:00	11:00																													
			12:7	33,8	14,0					2,69																								
			Valor médio (horas)							7	31	25	29																					
2013	FEVEREIRO	SL	17-fev	17-fev	18-fev	17-fev	18-fev	22-fev						16	15	21	21	95	116	9	24	-												
		SE	05:00	11:00	02:00	14:00	11:00	00:00																										
		P _{tot}	83,9	8,6	4,1	2,75	3,66	3,1																										
		P ₁₀₀	83,9	25,9	23,5v	22-fev	24-fev																											
		P ₅₀	835,1	134,0	m ³ /s	11:00	21:00	21:00	17:00	14:00	-	9	24	33	45	-	-					5	17											
		P ₁₀	85,0	38,2	m ³ /s	1:4	22:2	6:2	3,2	4,49																								
					05-fev	25-fev	26-fev	25-fev	02-mar																									
					05:00	18:00	06:00	10:00	10:00	-	13	14	27	168	426	594						5	134											
					4:4	46,8	7,9	4,5	5,99																									
					07-fev	27-fev	28-fev																											
			02:00	12:00	07:00																													
			6:6	31,3	10,4																													
			28-fev	01-mar	01-mar																													
			19:00	02:00	23:00																													

(Continuação)

2011		FEVEREIRO		da	16-fev	16-fev	17-fev	16-fev	17-fev										
	SL	SE	hora		12:00	12:00	11:00	12:00	15:00		5	24	29	29	-	5	29	-	
P _{1h}	624,0	820,0	m³/s		10,2	30,1	12,3	3,1	4,1										
P _{3h}	94,2	152,6	hora		19-fev	19-fev	20-fev	19-fev	20-fev	03-mar									
P _{6h}	59,0	92,2	hora		21:00	11:00	08:00	09:00	13:00	15:00	10	21	31	28	240	298	8	26	192
P _{9h}	32,8	62,2	m³/s		8,0	42,0	19,8	3,9	4,3	2,5					(n 10 dias)	(n 8 dias)			
Valor médio (horas)											8	23	30	29	-	7	28	-	
2013		MARÇO		da	10-mar	11-mar	12-mar	10-mar	13,3										
	SL	SE	hora		15:00	04:00	20:00	18:00	03:00		13	40	23	57	-	3	47	-	
P _{1h}	782,4	958,8	hora		10,3	26,8	11,3	3,3	4,6										
P _{3h}	161,4	149,8	hora		25-mar	25-mar	25-mar	25-mar	29-mar										
P _{6h}	76,6	60,2	hora		11:00	07:00	-	16:00	08:00	-	20	-	-	64	-	5	49	-	
P _{9h}	69,0	59,6	m³/s		7,7	37,5	-	3,4	5,3										
Valor médio (horas)					14:00	20:00	-	14:00	20:00	-	6	-	-	-	-	-	-	-	
					26,6	43,2	-	Continuação de caudal próximo do caudal máximo horário (prolongamento da ponta de cheia)				5	31	36	-	-	-	-	
	SL	SE	hora		27-mar	27-mar	28-mar	29-mar	09:00										
P _{1h}	69,0	59,6	hora		12:00	07:00	-	12:00	07:00	-	15	21	36	-	89	-	-		
P _{3h}	36,4	36,3	hora		29-mar	29-mar	30-mar	29-mar	09:00										
P _{6h}	29,0	18,0	hora		12:00	05:00	-	12:00	05:00	-	15	21	36	-	89	-	-		
P _{9h}	12,6	65,0	m³/s		12,6	65,0	18,2	5,3											
	SL	SE	hora		31-mar	01-abr	04-abr	24-abr	05:00						596	-	24		
P _{1h}	69,0	59,6	hora		06:00	00:00	03:00	-	-	-	18	77	85	-	-	-	-		
P _{3h}	14,4	76,7	m³/s		14,4	76,7	19,1	3,3							(n 25 dias)				
Valor médio (horas)											13	42	48	-	-	-	-		
2012		ABRIL/MAIO		da	25-abr	26-abr	26-abr	26-abr	26-abr	28-abr									
	SL	SE	hora		19:00	05:00	13:00	02:00	13:00	19:00	10	8	28	11	54	65	7	8	54
P _{1h}	442,7	442,7	m³/s		5,7	4,5	3,5	2,3	1,2	0,4									
P _{3h}	64,9	97,8	hora		02-mai	03-mai	03-mai	03-mai	04-mai	07-mai									
P _{6h}	44,5	39,5	hora		15:00	14:00	22:00	06:00	10:00	15:00	23	8	31	28	77	105	15	20	89
P _{9h}	63,9	48,8	m³/s		3,0	8,9	3,1	2,4	1,4	1,1									
	SL	SE	hora		07-mai	08-mai	09-mai	08-mai	09-mai	17-mai									
P _{1h}	63,9	48,8	hora		21:00	07:00	03:00	01:00	03:00	23:00	10	20	30	26	212	238	4	20	114
P _{3h}	3,4	14,7	m³/s		3,4	14,7	4,8	1,1	2,7	0,7					(n 9 dias)	(n 10 dias)	(n 5 dias)		
Valor médio (horas)											14	12	30	22	114	136	9	16	86
Valor final (média)											11	22	30	37	175	209	6	29	154
											(n 7,5 dias) (n 12 dias)								

P_{1h} - Precipitação acumulada desde o início do ano hidrológico
 P_{3h} - Precipitação acumulada nos 30 dias anteriores
 P_{6h} - Precipitação acumulada nos 15 dias anteriores
 P_{9h} - Precipitação acumulada nos 8 dias anteriores
 Q_i - Caudal inicial (início da curva de crescimento)
 Q_m - Caudal máximo (ponta de cheia)
 Q_f - Caudal no final do decrescimento (antes da curva de esgotamento)
 SL - Santiago de Látex
 SE - Sra. da Estrela

rológico, em particular da precipitação acumulada até esse momento. Para além desta diferença temporal entre o momento da subida do caudal em cada um dos sectores (que vimos não ser muito distanciado), uma das principais diferenças reside na velocidade dessa subida, verificando-se um desfazamento temporal considerável entre o pico de caudal em cada um destes sectores, com os Olhos d'Água do Anços a atingirem esse pico, em média, cerca de 29 horas depois do rio Arunca.

Contudo, a maior diferença na hidrodinâmica destes sectores reside no tempo de decrescimento, uma vez que, em média, o rio Arunca leva cerca de 1 dia (22 horas) a escoar a maior parte da água proveniente do evento pluvioso (escoamento directo), regressando, assim, rapidamente a valores próximos dos registados antes do aumento do caudal (ou, noutros casos, o decrescimento é interrompido por uma nova subida do caudal em virtude de um novo episódio de precipitação); o tempo de base (tempo de crescimento + tempo de decrescimento) é de 30 horas. Em contrapartida, nos Olhos d'Água do Anços, o tempo de decrescimento ascende às 175 horas (superior a 7 dias), com algumas situações

(aquando da entrada de grande quantidade de precipitação no hidrossistema) a demorarem cerca de duas semanas ou ainda mais. Em termos comparativos, o final desta fase de decrescimento ocorre com uma diferença média de cerca de 6,5 dias entre o rio Arunca e a exsurgência, com o comportamento do rio a apresentar, uma vez mais, características de maior celeridade. Como vimos anteriormente, podem, inclusive, ocorrer várias subidas do nível da água no rio durante uma fase de caudal máximo e decrescimento na exsurgência.

Em síntese, a dinâmica hidrológica do rio Arunca caracteriza-se por uma resposta bastante rápida aos eventos pluviosos (uma subida muito acentuada), com o pico de caudal a ocorrer poucas horas depois do início da subida. A descida do caudal é igualmente rápida, reduzindo-se drasticamente a influência do escoamento directo ao fim de apenas 1 dia, regressando, por vezes, o caudal a valores próximos dos imediatamente anteriores ao momento da subida no prazo de 1 dia (hidrograma bastante pontiagudo). Por seu lado, a exsurgência dos Olhos d'Água do Anços responde com menor rapidez à ocorrência de precipitação e a subida até ao valor máximo demora mais de 1 dia, não sendo raro a curva de crescimento ser polifaseada, já que a cessação temporária de precipitação apenas reduz ligeiramente o caudal (que não diminui acentuadamente como no rio), o qual continua a subir se se verificar novo episódio de precipitação. O decrescimento é bastante mais lento, com a influência directa da precipitação a manter-se por vários dias (escoamento rápido), sendo o tempo de base de cerca de 12 dias⁸.

As diferenças na dinâmica de resposta destes sectores são de tal forma vincadas, que basta apenas uma simples observação da água drenada pelo rio Arunca e pelo rio Anços (proveniente na sua quase totalidade do sector cársico da bacia) para as identificar claramente – Figura III.1.6. A escassa turbidez da água do rio Anços contrasta com a enorme carga sólida transportada pelo rio Arunca, facto que revela que se trata, efectivamente, de hidrodinâmicas muito diferentes no tempo de resposta e no tipo de resposta perante o mesmo episódio pluvioso.

A finalizar a análise da resposta destes sectores da bacia do rio Arunca, considerámos, individualmente, alguns episódios de cheia juntamente com a precipitação que esteve na sua origem, em diferentes momentos do ano hidrológico, tentando, assim, determinar o tempo de resposta⁹ de cada sector da bacia.

⁸ O valor de 12 dias, indicando a duração da influência de um episódio pluvioso no caudal da exsurgência, é ligeiramente inferior ao valor obtido na Parte II deste trabalho, aquando do estudo pormenorizado do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó (13/14 dias). No entanto, para evitar qualquer tipo de incoerência que possa comprometer a análise, de salientar que esta pequena discrepância é justificada pelo facto de, no presente capítulo, apenas terem sido analisados os principais episódios de cheia, ao contrário do que sucedeu na parte do trabalho que precede este capítulo, onde foi considerada a série completa de dados.

⁹ O tempo de resposta corresponde ao intervalo de tempo entre o centro gravitacional da precipitação útil e a ponta do hidrograma (Lencastre e Franco, 1992). É ligeiramente inferior ao tempo de crescimento.



Rio Arunca (Sobral)
16/02/2011 16:44

Caudal instantâneo: 21 m³/s

Precipitação em Pombal*: 18,8 mm

*em Santiago de Litém (cabeceras da sub-bacia do rio Arunca) a precipitação foi escassa, tendo ocorrido, em contrapartida, uma intensa chuvada em Pombal (muito mais próximo deste local), responsável por esta resposta.



Rio Anços (Redinha, Pombal)
17/02/2011 15:43

Caudal instantâneo – Olhos d'Água do Anços: 4,06 m³/s*

* neste local, o rio Anços já comporta a água drenada pelas exsurgências do bordo oeste do hidrossistema cársico.



Confluência dos rios Arunca e Anços (vila de Soure)
17/02/2011 16:15

Caudal instantâneo (rio): 11 m³/s
Caudal instantâneo (exsurgência): 4,06 m³/s

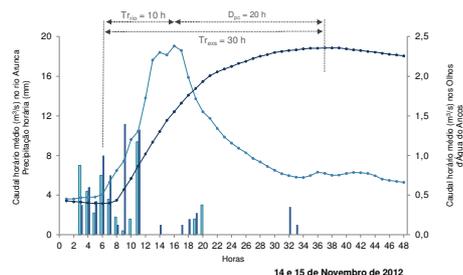
Figura III.1.6 – A resposta do rio Arunca (sub-bacia, sector não-cársico) e do rio Anços (sector cársico) à ocorrência de precipitação

395

No entanto, este exercício foi limitado em termos dos exemplos apresentados, uma vez que foi muito difícil encontrar situações de cheia que tivessem ocorrido em simultâneo nos dois sectores e que decorressem de episódios de precipitação de curta duração e bem individualizados, os preferíveis neste tipo de análise (Reis, 2006), já que o comum é a distribuição da precipitação diária ao longo de bastantes horas, normalmente descontínuas. Este tipo de distribuição horária da precipitação provoca vários picos de caudal menores, que precedem a principal, tornando muito difícil determinar o *tempo de resposta*. Nos casos que a seguir se apresentam (Figura III.1.7), a dificuldade em determinar o tempo de resposta devido a precipitação persistente está presente na representação gráfica de 4 a 8 de Dezembro de 2010.

De referir, ainda, em termos metodológicos o facto de, contrariamente ao procedimento no anterior ponto de análise, considerámos, agora, no cálculo do *tempo de resposta*, o centro gravítico do episódio pluvioso e não o "início" do episódio. Esta opção justifica-se pelo carácter de comparação inerente a esta análise, o que tornou imperioso utilizar o mesmo critério em ambas as dinâmicas hidrológicas (cársica e fluvial).

Os *tempos de resposta* obtidos para cada um dos sectores em questão (Figura III.1.7) completam a análise que vimos efectuando, com os valores do rio Arunca a oscilarem entre as 5 horas e as 10 horas e os tempos de resposta dos Olhos d'Água do Anços a prolongarem-se quase até às 30 horas. Em ambos os casos, os valores são ligeiramente inferiores ao *tempo de crescimento* médio já apresentado – 11 horas¹⁰ e 36 horas respectivamente (Quadro III.1.III).

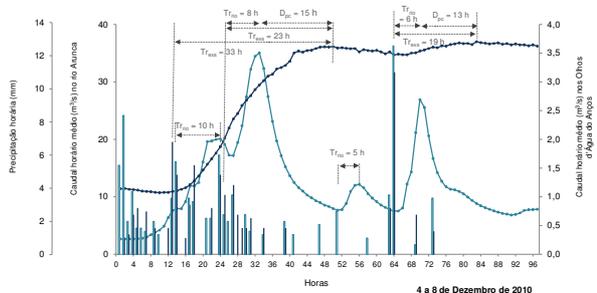


— Caudal horário médio (Rio Arunca, Sobral)
— Caudal horário médio (Olhos d'Água do Anços)
■ Precipitação horária (Santiago de Litém, Pombal)
■ Precipitação horária (Sra. da Estrela)

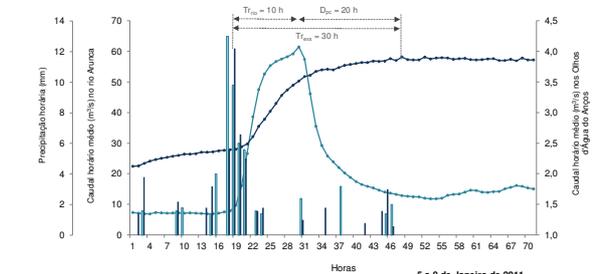
Tr_{ra} – tempo de resposta do rio Arunca (sub-bacia)
Tr_{oa} – tempo de resposta da exsurgência
D_{cs} – desfasamento entre pontas de cheia

Continua →

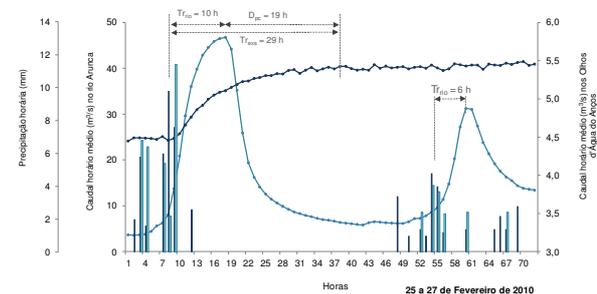
¹⁰ Valor muito semelhante ao obtido por Reis (2006) para a Ribeira de Grândola, com uma área semelhante à do sector não-cársico em estudo.



4 a 8 de Dezembro de 2010



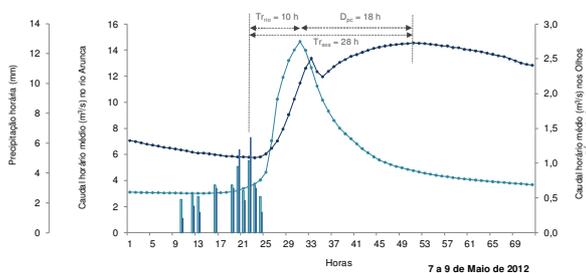
5 a 8 de Janeiro de 2011



25 a 27 de Fevereiro de 2010

Continua →

397



7 a 9 de Maio de 2012

- Caudal horário médio (Rio Arunca, Sobral)
- Caudal horário médio (Olhos d'Água do Anços)
- Precipitação horária (Santiago de Litém, Pombal)
- Precipitação horária (Sra. da Estrela)
- T_{run} – tempo de resposta do rio Arunca (sub-bacia)
- T_{exs} – tempo de resposta da exsurgência
- D_{pc} – desfazamento entre pontas de cheia

Figura III.1.7 – O tempo de resposta dos sectores cársico e não-cársico da bacia hidrográfica do rio Arunca a partir da representação de episódios de cheia em diferentes contextos hidrometeorológicos, com base no caudal horário médio (m^3/s) do rio Arunca (Sobral) e da exsurgência dos Olhos d'Água do Anços e na precipitação horária de Santiago de Litém (Pombal) e da Sra. da Estrela

O tempo de resposta de cerca de 30 horas (1,25 dias) para o sector cársico, obtido através da análise do hidrograma dos valores horários médios, confirma o tempo de resposta encontrado na análise da condutividade eléctrica e da temperatura da água drenada pelos Olhos d'Água do Anços (chegada de água recém-infiltrada à exsurgência – escoamento rápido), que foi de, exactamente, 30 horas.

A Figura III.1.7 completa, por isso, a análise anterior e coloca em evidência as profundas diferenças entre a hidrodinâmica não-cársica e a hidrodinâmica cársica, mostrando, por exemplo, que podem ocorrer vários picos de caudal sucessivos no rio Arunca enquanto nos Olhos d'Água do Anços o caudal se mantém praticamente estabilizado, mesmo que continue a ocorrer precipitação, o que prova, como vimos, a enorme capacidade filtrante do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó.

4.2. A curva de recessão e a diferença nas curvas de decrescimento

Se a resposta a um episódio pluvioso apresenta, como vimos, vincadas diferenças entre estes dois sectores da bacia hidrográfica do rio Arunca, a duração da cheia e, particularmente, a forma da curva de recessão (fase de decrescimento, em especial) revelam características profundamente desiguais. A enorme importância de que se reveste esta realidade prende-se com o facto de, ao contrário da curva de crescimento e do tempo de resposta dependerem, em grande parte, das características dos eventos pluviosos, a curva de recessão reflecte as características físicas dos hidrossistemas. Como sublinha Tallaksen (1995), a curva de recessão contém informação integrada de como diferentes factores influenciam o processo de escoamento.

Ao ser um reflexo dos meios que o escoamento percorre (meios superficial e subterrâneo), a forma da curva de recessão constitui, como referido anteriormente, uma prova irrefutável da profunda diferença entre a hidrodinâmica fluvial em bacia exorreica e a hidrodinâmica nos meios cársicos, comprovando, em definitivo, a especificidade do funcionamento destes últimos e, muito em particular, do hidrossistema cársico aqui em estudo, cujas características principais (designadamente o grande poder filtrante, a sua inércia e a sua enorme capacidade de armazenamento) fazem com que a forma da curva de recessão se afaste ainda mais da forma da curva de recessão do rio Arunca e, conseqüentemente, da dinâmica hidrológica de superfície.

A curva de recessão é, normalmente, composta por dois segmentos: o primeiro, imediatamente a seguir à ponta de cheia (curva de decrescimento), é influenciado, quase na totalidade, pela água infiltrada, predominando, por isso, o escoamento mais rápido (escoamento directo, no rio, e escoamento rápido, na exurgência); o segundo segmento (curva de esgotamento), passada a influência do episódio chuvoso, representa o contributo apenas da zona saturada (escoamento de base). Nos estudos de hidrologia, esta última componente da curva de recessão é a mais estudada, uma vez que fornece informação valiosa sobre a estrutura e o funcionamento de um hidrossistema, em particular sobre parâmetros hidrodinâmicos como a permeabilidade e a capacidade de armazenamento.

A análise quantitativa da curva de recessão é, geralmente, efectuada com métodos que derivam do trabalho de Maillet (1905), que mostrou que a recessão de um rio ou de uma surgência pode ser representada por uma função exponencial, a qual implica uma relação linear entre o nível piezométrico e o escoamento à superfície. A curva de recessão na sua totalidade (ou os vários segmentos em que pode ser decomposta) é normalmente considerada como uma função clássica de decaimento, que se pode escrever do seguinte modo:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

399

em que Q_t representa o caudal num tempo t , Q_0 o caudal no início da recessão (ou do segmento de recessão) e α a constante de decrescimento (também conhecida como *coeficiente de recessão* ou ainda *frequência de cut-off*).

No entanto, inúmeros estudos realizados desde então em regiões com diferentes características físicas (sintetizados e analisados em Tallaksen, 1995; Dewandel *et al.*, 2003; Brodie e Hostetler, 2005) revelaram que, raramente, uma única função pode ser ajustada a toda a curva de recessão, propondo várias soluções quantitativas baseadas sempre na sua divisão em diferentes segmentos.

No presente estudo, a diversidade de situações hidrometeorológicas ao longo do período analisado revela que a principal diferença durante a recessão se encontra no decrescimento, ou seja, no período imediatamente a seguir ao pico de caudal. Numa primeira abordagem constata-se que o decrescimento no rio Arunca é muito mais célere, verificando-se uma descida acentuada nas horas que se seguem ao caudal instantâneo máximo, enquanto nos Olhos d'Água do Anços, o decrescimento é predominantemente lento, chegando a ocorrer situações em que se prolonga por várias semanas (por exemplo, em períodos húmidos em que se registou uma enorme entrada de água no hidrossistema). Esta variação do comportamento do decrescimento, no caso dos cursos de água, justifica-se pela variabilidade em factores como a distribuição espacial da precipitação, o comportamento dos afluentes, a quantidade de água já existente no sistema-bacia e a espessura da zona saturada, entre outros; no caso do hidrossistema cársico explica-se pela quantidade de água existente no seu interior e pelas características físicas do próprio hidrossistema, como vimos ao longo deste estudo.

Assim sendo, o primeiro exercício a realizar é quantificar o tempo de influência de um episódio de precipitação no caudal do rio Arunca, identificando o *ponto de inflexão*, ou seja, o momento em que o escoamento directo praticamente desaparece e passa a ser o escoamento subterrâneo a assegurar o escoamento fluvial. Esse ponto é, por vezes, difícil de determinar, já que a transição entre a curva de decrescimento e a curva de esgotamento pode ser bastante suave. Na prática, como refere Reis (2006), é comum observar-se mais do que um ponto de inflexão, o que depende, para além das características dos eventos pluviosos (em especial a duração e distribuição espacial), das características físicas da bacia hidrográfica e da própria rede de drenagem. A existência de mais do que um ponto de inflexão pode revelar, por exemplo, o atraso no escoamento do volume de água acumulada nos afluentes durante o episódio de precipitação, daí que, em alguns casos, o primeiro ponto de inflexão possa não significar uma cessação completa do escoamento directo.

A estimação do *ponto de inflexão* da curva de decrescimento pode ser efectuada através da seguinte fórmula empírica:

$$D = 0,827A^{0,2}$$

em que D é o tempo (em dias) entre a ponta de cheia e o fim do escoamento directo e A a área da bacia em Km^2 . O valor obtido para a sub-bacia do rio Arunca é de quase 3 dias.

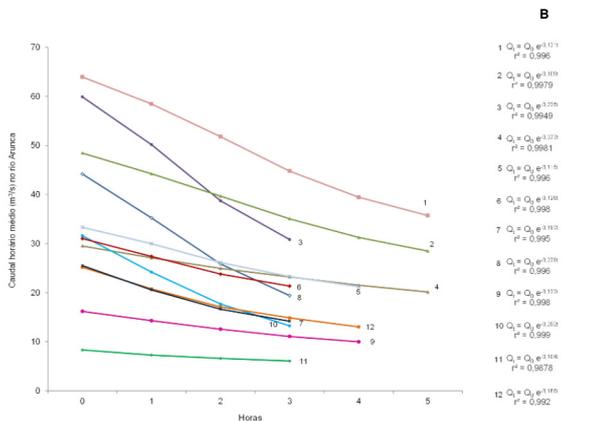
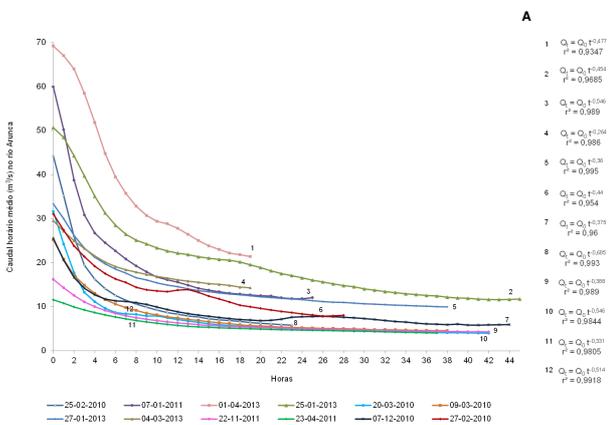
A determinação do ponto de inflexão permite, assim, comparar quantitativamente o ritmo da diminuição do caudal entre os dois sectores em análise, de modo a conhecer-se o modo como cada hidrossistema interfere nesse processo, mediante a duração da influência de um episódio de precipitação no caudal. No caso da hidrodinâmica cársica, tal como vimos ao longo deste trabalho, a influência é longa, só terminando após vários dias (cerca de 13/14 dias, em média, de escoamento directo e 54 dias de escoamento diferido).

Para determinar o ponto de cessação do escoamento directo no caudal do rio Arunca analisamos, ainda que de modo simples, uma sequência de 12 situações de decrescimento do caudal no rio Arunca nas 48h após o pico de caudal, em diferentes contextos hidrometeorológicos, com diferentes durações e com caudais máximos bastante desiguais, procurando as funções matemáticas que melhor se ajustam à curva de decrescimento. Para além disso, procedemos à decomposição da curva em segmentos com decrescimento homogéneo, de forma a compreendermos, um pouco melhor, os diferentes momentos da descida do caudal no rio Arunca. A finalizar, avaliámos também para o mesmo evento pluvioso, o decrescimento do caudal no rio Arunca e nos Olhos d'Água do Anços mediante o ajustamento da função matemática que melhor descreva esse decrescimento.

A representação das curvas de decrescimento correspondentes ao caudal horário médio no rio Arunca (no Sobral) nos dois dias subsequentes ao caudal horário máximo¹¹, mostra que a função que melhor se ajusta a todas as curvas, sem excepção, é a de potência – Figura III.1.8.A. Esta constatação significa uma descida bastante acentuada do caudal logo após o pico de cheia, independentemente do valor do caudal máximo registado, da época do ano hidrológico e das características pluviométricas desse ano hidrológico (ou do anterior, no caso de ocorrer no início do Outono). Todas as curvas seguem o mesmo padrão, apesar dos diferentes valores de caudal inicial, sendo, porém, o decrescimento mais acentuado nas situações de caudal horário máximo mais elevado.

O decrescimento nas primeiras horas é, de facto, muito acentuado, como provam a diminuição de 72% de caudal em apenas 19h (01/04/2013), de 80% em 24h (07/01/2011) ou de 84% em 24 horas (26/02/2011). Estes valores de descida revelam que mesmo com uma enorme entrada de água até ao momento da subida (primeiro exemplo, início de Abril de 2013) ou com um episódio bastante intenso (terceiro exemplo, Janeiro de 2011, em que

¹¹ Apesar de o ponto de inflexão indicar que o escoamento directo (e intermédio) se faz sentir durante 3 dias, apenas consideramos as 48 horas seguintes, uma vez que a maioria das situações em análise não chegava sequer a esse valor, sendo interrompidas por um novo episódio pluvioso que provocava nova subida do caudal (ainda que muitas vezes de pequena importância e curta duração). A propósito, ver Figura III.1.5.



Continua

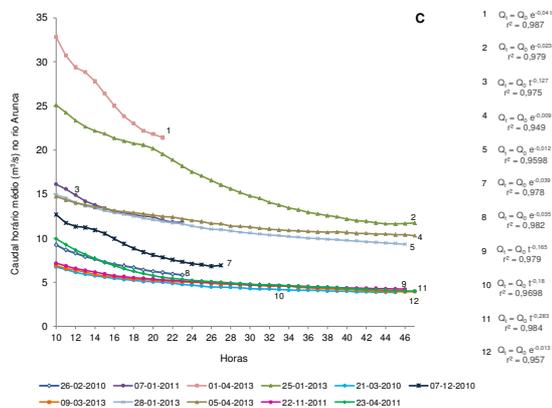


Figura III.1.8 – Decrescimento do caudal horário médio no rio Arunca (Sobral) após a ponta de cheia: nas 48 horas posteriores (A); nas primeiras 6 horas (B) e depois de 10 horas após a ponta de cheia (C)

ocorreram 35 mm em 4 horas), bastam algumas horas para o caudal do rio Arunca voltar a valores próximos dos que se verificavam antes da subida (Figura III.1.8 A). A curva-padrão foi, portanto, obtida a partir das doze curvas (todas apresentam o mesmo padrão), considerando como constante de decaimento o valor médio daí resultante, podendo expressar-se o decaimento do rio Arunca (sub-bacia) como uma função de potência, através da seguinte expressão:

$$Q_t = Q_0 t^{0,4483}$$

A variação da velocidade a que se processa a diminuição do caudal durante a fase de decréscimo (primeiramente de forma mais célere, a que se segue uma fase mais gradual) levou a que procedéssemos à divisão da curva de decréscimo em, pelo menos, dois segmentos correspondentes a esses dois tempos de descida.

Assim, verifica-se que o período de descida muito acentuada do caudal ocorre até às primeiras 4 a 5 horas após o pico de caudal, independentemente do caudal instantâneo máximo. Essa descida rápida apresenta um comportamento exponencial, com o coeficiente

403

de decréscimo a variar entre 0,07 e 0,292, embora a maior parte dos valores se situe entre 0,12 e 0,2 (Figura III.1.8 B). Estas primeiras horas, imediatamente a seguir ao pico de caudal, corresponderão somente ao escoamento directo que se processa imediatamente após a chuvada. A função exponencial que descreve o decréscimo nas primeiras 5 a 6 horas (com a constante a ser o valor médio obtido a partir dos 12 segmentos), pode ser transcrita da seguinte forma:

$$Q_t = Q_0 e^{-0,160t}$$

Após este primeiro momento de descida acentuada, e caso não ocorra precipitação que provoque uma nova subida, o decréscimo vai sendo mais gradual, com a maioria das curvas a ajustar-se melhor a uma função exponencial, embora a função de potência seja a que melhor descreve o decréscimo do caudal em alguns casos (Figura III.1.8 C). A partir de 8 a 10 h após o caudal máximo, o decréscimo torna-se bastante mais lento, correspondendo a uma situação em que ainda se verifica algum escoamento directo (proveniente de áreas mais afastadas, correspondendo à drenagem da água acumulada durante o evento pluvioso na rede de drenagem), juntamente com escoamento intermédio e algum escoamento de base. O coeficiente de decréscimo varia, neste segundo momento, entre 0,02 e 0,04, (decréscimo exponencial) e entre 0,12 e 0,28 (decréscimo potencial), o que torna muito difícil a definição de uma curva-padrão para este segmento da curva de decréscimo.

A análise efectuada ao longo deste capítulo (e depois do estudo pormenorizado da curva de recessão na hidrodinâmica cársica) leva-nos a concluir que a curva de decréscimo constitui, de facto, a principal diferença na hidrodinâmica pós-cheia entre estes dois sectores. Deste modo, se considerarmos a resposta a um mesmo episódio de precipitação, a descida muito rápida do caudal no rio Arunca (independentemente do valor do caudal instantâneo máximo), contrasta profundamente com o carácter paulatino da diminuição do caudal na exsurgência dos Olhos d'Água do Anços, testemunhando a forma como o hidrossistema cársico exerce um enorme poder regulador sobre o regime do caudal na exsurgência, o que não acontece com a hidrodinâmica fluvial.

No intuito de mostrarmos claramente essa realidade, profundamente desigual, a partir dos dados horários médios, seleccionámos várias situações de decréscimo praticamente simultâneo, que ocorreram em diferentes alturas do ano hidrológico, com quantitativos de água já entrada no hidrossistema substancialmente diferentes e com valores de caudal distintos, tanto no caso do rio como da exsurgência – Figura III.1.9.

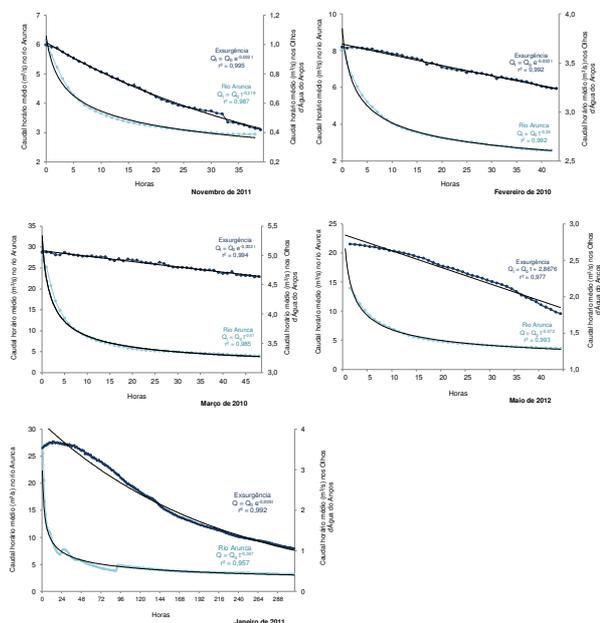


Figura III.1.9 – Decrescimento do caudal horário médio no rio Arunca (Sobral) e na exurgência dos Olhos d'Água do Anços no mesmo episódio hidrometeorológico

Os exemplos apresentados na Figura III.1.9 mostram que, mesmo em situações hidrometeorológicas diversas, a função de potência é a que melhor descreve a fase de decrescimento no rio Arunca, dada a descida acentuada após o pico de caudal; enquanto nos Olhos d'Água do Anços é a função exponencial, devido à forma mais gradual de descida do caudal, sendo que, em alguns casos, é a função linear a que melhor se ajusta à curva do decrescimento do caudal nesta exurgência, o que se explica pela manutenção durante vários dias de caudais muito próximos dos valores máximos.

405

Assim, enquanto a influência de um episódio pluvioso no rio Arunca termina passados 3 dias, com a drenagem da água da linha de água principal e de toda a densa rede de drenagem (escoamento directo e também intermédio); nos Olhos d'Água do Anços, essa influência dura no mínimo cerca de 13 dias (escoamento rápido), podendo estender-se bastante para além desse valor (escoamento diferido). Ademais, parece não existir no rio Arunca, relação entre a forma da curva de decrescimento e a quantidade de precipitação acumulada até essa data, o que se deduz do comportamento hidrodinâmico semelhante, por exemplo, nas descidas de caudal no ano de 2011/2012 (ano muito seco) e em 2012/2013 (ano húmido). Em contrapartida, como vimos anteriormente, essa relação existe no sector cársico, já que o decrescimento é muito mais rápido num ano seco do que num ano normal ou húmido.

Em **síntese**, a análise, em paralelo, das hidrodinâmicas cársica e fluvial permite concluir que:

(i) no que se refere às semelhanças da hidrodinâmica dos sectores cársico e não-cársico da bacia hidrográfica do rio Arunca, ambos se caracterizam por um funcionamento duplo, de grande contraste: um carácter de forte resposta perante episódios de precipitação (em particular do Outono à Primavera) e um carácter relativamente estável dos caudais (no conjunto da série, 90% dos dias registaram caudais inferiores a 3,3 m³/s e 5,4 m³/s na exurgência e no rio, respectivamente), revelando, em ambos os casos, que a água subterrânea acumulada em ambos os hidrossistemas é muito importante;

(ii) a variação do caudal é muito mais acentuada no rio Arunca do que nos Olhos d'Água do Anços. Em contrapartida, a exurgência apresenta um comportamento que, apesar de variável consoante a quantidade de precipitação e de recarga do hidrossistema cársico (e também da altura do ano hidrológico), é muito menos abrupto e contrastado do que o rio, não sendo, portanto, o hidrograma da exurgência tão pontiagudo;

(iii) o rio Arunca responde mais rapidamente à ocorrência de precipitação do que os Olhos d'Água do Anços (em média, menos 11 horas) o que em termos diários significa que o rio responde no próprio dia, enquanto a exurgência demora quase 2 dias. O *tempo de resposta*, com base em valores horários de caudal e de precipitação, confirma estes valores, com um atraso médio em relação ao centro de gravidade da precipitação de 10 horas no rio Arunca e de 30 horas nos Olhos d'Água do Anços. Para além de responder primeiro, o rio demora menos tempo a atingir o caudal de ponta de cheia: o *tempo de crescimento* é, em média, de 11 horas no rio Arunca e de 37 horas na exurgência;

(iv) o rio Arunca, perante um mesmo episódio pluvioso, atinge o pico de cheia cerca de 29 horas antes da exurgência, o que confirma a forma muito mais demorada da resposta do hidrossistema cársico. Uma vez registado o valor máximo de caudal, o rio Arunca

regressa rapidamente aos valores de caudal pré-evento (*tempo de decrescimento* médio de 22 horas), enquanto nos Olhos d'Água esse intervalo é de cerca de 7,5 dias, tempo que depende da quantidade de água acumulada no hidrossistema cársico, o que não sucede no rio, cujo comportamento é semelhante em qualquer altura do ano hidrológico;

(vi) a curva de decrescimento constitui, portanto, a diferença mais pronunciada entre estes dois sectores, com a curva do rio a ajustar-se a uma função de potência, o que indica a descida muito acentuada após o pico de caudal (em 4 a 5 horas, o caudal chega a diminuir 70 a 80%). A curva dos Olhos d'Água do Anços ajusta-se a uma função exponencial, devido à forma mais gradual de descida do caudal, em particular em situações de elevada quantidade de recarga;

(vii) a influência de um episódio pluvioso no rio Arunca prolonga-se apenas por 3 dias, durante os quais se processa a drenagem da linha de água principal e de toda a rede hidrográfica (escoamento directo e também intermédio), enquanto nos Olhos d'Água do Anços, essa influência dura cerca de 13/14 dias (escoamento rápido), podendo estender-se para além desse valor (até aos 54 dias - escoamento diferido).

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA

As exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão constituem os principais exutórios do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó, que corresponde à quase totalidade da metade setentrional do sistema aquífero de Sicó-Alvaiázere. Estas exsurgências permanentes são as mais importantes de um conjunto que se estende ao longo do vale do rio Anços, marginando o bordo ocidental deste hidrossistema, sendo todas elas (a jusante dos Olhos d'Água do Anços) também de carácter permanente.

A sua disposição longitudinal indica o condicionamento imposto por factores estruturais, em particular pelas grandes linhas de fracturação, responsáveis pelo soerguimento do Maciço de Sicó e pela deformação da sua frente ocidental (fracturação de direcção submeridiana). Para além da tectónica, a localização das exsurgências a cotas baixas (entre os 40 m da exsurgência do Ourão e os 80 m das exsurgências temporárias a montante dos Olhos d'Água do Anços) e o pendor marcadamente para oeste das camadas que compõem a estrutura do sistema cársico conferem a este conjunto de exsurgências uma importância central no funcionamento hidrológico do sistema aquífero de Sicó-Alvaiázere e, muito particularmente, da sua metade norte. Se considerarmos, para o mesmo período, o caudal das principais exsurgências que bordejam este sector setentrional (Arrifana, a norte; Legação, Alcamouque e Alvorge, a leste, e Olhos d'Água de Ansião, a sudeste), constatamos que os Olhos d'Água do Anços e do Ourão, em conjunto, drenam cerca de 75% a 80% da água que circula neste hidrossistema.

O funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico de Degraças-Sicó foi, ao longo deste trabalho, estudado e caracterizado segundo uma perspectiva funcional, considerando

409

as suas respostas naturais, neste caso o caudal das exsurgências e o comportamento da temperatura e da condutividade eléctrica da água por elas drenada. A aplicação combinada da análise de séries temporais, da análise da curva de recessão e do estudo das variações da temperatura e da condutividade eléctrica na água escoada pelos Olhos d'Água do Anços permitiu concretizar os objectos inicialmente propostos relativamente à compreensão da complexa relação hidrológica de *input-output*, que ocorre no interior deste hidrossistema.

Entendendo o hidrossistema cársico como uma 'caixa-negra', considerámos a precipitação registada na área de recarga (Planalto de Degraças-Alvorge e Serras de Sicó e do Rabaçal) como o *input* e o caudal das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão como o *output*, ao longo de quatro anos hidrológicos (2009/2010 – 2012/2013). As variações registadas no comportamento do caudal como resposta ao episódio pluvioso que as originou possibilitaram um maior conhecimento do funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico de Degraças-Sicó em diferentes contextos hidrometeorológicos.

Esta análise, baseada na reacção natural do hidrossistema a um episódio de recarga, forneceu informações preciosas sobre a forma como o sinal de *input* é transformado, durante o atravessamento do hidrossistema, num sinal de *output*. A partir do tipo e do grau de modificação sofrido pelo sinal de *input* foi possível retirar algumas ilações sobre algumas das suas características internas, como sejam a estruturação e a funcionalidade da rede de drenagem hipogea e, em última instância, o grau de carificação do próprio hidrossistema.

Um dos aspectos que mais sobressai neste estudo decorre do facto de, através de uma conjugação de métodos que se centram apenas nas respostas naturais das exsurgências e, portanto, considerando somente variáveis de fácil obtenção como a precipitação, o caudal, a temperatura e a condutividade eléctrica da água das exsurgências, se terem conseguido resultados muito satisfatórios sobre a hidrodinâmica subterrânea destes meios bem como sobre algumas características físicas gerais do próprio hidrossistema.

Os resultados obtidos mediante a análise correlatória e espectral das séries da precipitação e do caudal, a análise da curva de recessão e a interpretação da variação da temperatura e da condutividade eléctrica da água dos Olhos d'Água do Anços apresentam um elevado grau de concordância, provando que se trata, efectivamente, de uma combinação de métodos apropriada para o estudo dos hidrossistemas cársicos a partir das suas respostas naturais. A convergência dos resultados conseguidos nos três métodos utilizados confere, por isso, consistência e robustez à interpretação que foi sendo elaborada e às conclusões que foram sendo apresentadas ao longo deste trabalho.

A função de *input*: a recarga

O estudo relativo à função de entrada de água no hidrossistema mostrou que a recarga segue fielmente a distribuição inter e intranual da precipitação, apresentando, por isso, uma

elevada variabilidade dos seus quantitativos anuais, sazonais e diários. A determinação da recarga foi elaborada com base no método do balanço hidrológico (com cálculo da evapotranspiração segundo o método de Thornthwaite), no método de Kessler e no modelo espacial APLIS, estes dois últimos concebidos especificamente para regiões cársicas.

Em termos quantitativos, os valores de recarga obtidos pelos dois primeiros métodos não são muito diferentes: para a estação udográfica de Degracias, considerada como referência pela dimensão da sua série de registos (1979/1980 - 2006/2007), a recarga segundo o balanço hidrológico, é de 697,7 mm (56,8% da precipitação anual média) e de 647,1 mm de acordo com o método de Kessler (52,5% da precipitação anual média). Para o período 2009/2010-2012/2013 esses valores são de 689 mm (59,1% da precipitação anual média) segundo o balanço hidrológico e de 642,2 mm (55,1% segundo o método de Kessler). O modelo espacial APLIS, adaptado à área de estudo, forneceu como valor médio de recarga da área em estudo um valor de 52,2% da precipitação anual média (649,3 mm para a estação de Degracias e 608,4 mm para os quatro anos em análise). Estes valores encontram-se, portanto, perfeitamente enquadrados nos intervalos estimados para hidrossistemas em regiões cársicas de média montanha no Mediterrâneo com características próximas das da área em estudo.

O período que se estende de Novembro a Março é de crucial importância nos quantitativos e no comportamento da recarga. Ao longo deste período, a recarga mensal aproxima-se, e ultrapassa mesmo, os 80% da precipitação mensal registada, chegando quase aos 89% em Janeiro. Apesar de ser o período mais húmido do ano, as baixas temperaturas da área de recarga e a sua posição altitudinal (e na topografia regional), fazem com que os valores de evapotranspiração sejam muito baixos, pelo que a maior parte da precipitação acaba por se infiltrar. Este processo é igualmente favorecido 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 cársicas que promovem a infiltração (difusa através dos lapíais e pontualmente concentrada através da abertura superficial dos algares). A grande importância do final do Outono e do Inverno na recarga e no armazenamento no hidrossistema cársico de Degracias-Sicó é também sublinhada pela manutenção do carácter perene de várias exurgências, mesmo em anos muito secos com vários meses com quantitativos pluviométricos excepcionalmente baixos ou mesmo nulos.

Os meses de Março e Abril caracterizaram-se pela diminuição acentuada da recarga, justificada pela redução da precipitação e pelo aumento da evapotranspiração real (em função do aumento da temperatura e do desenvolvimento da vegetação que caracteriza o início da Primavera). Mesmo que ocorram picos de precipitação (picos secundários,

411

primaveris, característicos nesta região), a água infiltrada corresponde a menos de 40% do total da precipitação mensal.

O mês de Maio significa a cessação do processo de recarga em resultado da diminuição abrupta da precipitação e da subida destacada da evapotranspiração real, marcando, assim, o início do período de *déficit* hidrológico, independentemente da quantidade de precipitação acumulada durante o semestre húmido. Esta constituiu, aliás, a principal novidade no âmbito da recarga no quadriénio em estudo (face às três décadas anteriores), uma vez que Maio deixou de ser o último mês de recarga para passar a ser o primeiro mês de *déficit* hidrológico, o que significa a antecipação, em um mês, do período mais seco do ano, aumentando, assim, a duração desse período, em que não ocorre recarga. O encurtamento do período de recarga deve-se não só à antecipação do período de *déficit* hidrológico para o mês de Maio, mas também pelo seu prolongamento para o mês de Outubro que, apesar da variabilidade dos quantitativos registados, se caracterizou, predominantemente, por uma grande secura. O comportamento da recarga reflecte o carácter sazonal muito contrastado da precipitação, que aumenta no período Novembro-Março e diminui substancialmente na Primavera, no Verão e no princípio do Outono. O carácter contrastado da precipitação estendeu-se também aos valores diários, com a ocorrência de valores bastante elevados (acima de 40 e 50 mm diários), o que se reflectiu nos quantitativos de recarga e também no tipo de recarga (mais concentrada temporalmente).

Os resultados obtidos segundo o método de Kessler confirmaram as conclusões retiradas pelo método do balanço hidrológico. Assim, segundo este método, especialmente concebido para áreas cársicas, os valores máximo e mínimo de recarga verificaram-se em anos em que as características pluviométricas de Janeiro a Abril foram reforçadas por características idênticas nos meses precedentes (de Setembro a Dezembro). Assim, no caso dos valores mínimos de recarga (entre 30% e 40%) resultaram de um período Janeiro-Abril seco ou muito seco, que se seguiu a um período igualmente muito seco nos primeiros meses do ano hidrológico. Os valores intermédios de recarga (próximo dos 45%-50%) ocorreram em anos em que as características pluviométricas de Janeiro a Abril foram contrariadas pelas características opostas dos meses precedentes, ou seja, se a um período Janeiro-Abril seco ou muito seco preceder um quadrimestre húmido, os valores da recarga são consideravelmente superiores aos que decorreriam normalmente de um período com tais características pluviométricas.

A adaptação e a aplicação do modelo APLIS à área em estudo mostraram o carácter bastante irregular da distribuição espacial da recarga, aspecto crucial no entendimento do funcionamento hidrodinâmico das exurgências da bordadura oeste do hidrossistema em estudo. Os maiores quantitativos de recarga ocorrem nas Serras de Sicó e do Rabaçal e numa estreita faixa, de forma arqueada, que abrange a parte oeste da superfície de recarga,

decalcando os principais alinhamentos tectónicos da região e unindo aquelas duas serras. A infiltração encontra-se também favorecida pelas características físicas destas áreas, podendo, inclusive, apresentar um carácter pontualmente concentrado, devido à existência de algares com abertura à superfície (formas cársicas que apresentam aqui a maior densidade no conjunto da área de recarga).

Em contrapartida, é na parte centro-leste do Planalto de Degraças-Alvorge que se verificam os menores valores de recarga, em função da presença de vastas áreas com vegetação arbórea, correspondentes a depósitos gresosos, suficientemente espessos para permitirem o desenvolvimento deste tipo de vegetação e também de actividade agrícola. As características físicas deste sector não só não favorecem a infiltração como também lhe inculcem um carácter bastante mais lento.

Verificou-se, ainda, a existência de um sector intermédio, composto por uma faixa de terrenos que ocupa, longitudinalmente, parte da área central do Planalto de Degraças-Alvorge e praticamente toda a área a nordeste da Serra de Degraças. Neste sector coexistem pequenas áreas com taxas de recarga bastante diferenciadas, numa amálgama onde não se consegue vislumbrar o predomínio claro de uma determinada taxa de recarga.

A função de *output*: a descarga e o funcionamento hidrodinâmico

O estudo empreendido com base nas respostas naturais do hidrossistema registadas sobretudo na exurgência dos Olhos d'Água do Anços revelou características importantes do funcionamento hidrológico do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó.

Um dos principais aspectos dessa hidrodinâmica subterrânea é a **resposta rápida** do hidrossistema a episódios de recarga, revelada na análise correlatória e espectral das séries da precipitação e do caudal e provada pelas variações da condutividade eléctrica e da temperatura da água da exurgência. Assim, o tempo médio de resposta da exurgência (induzida pelo impulso de pressão) é de 7 horas, substancialmente inferior ao tempo que a água da recarga leva a atravessar o hidrossistema até ao exutório, que é de 30 horas.

Os menores atrasos recarga-descarga (atravessamento do hidrossistema) registaram-se em alturas que se seguiram a longos períodos de águas baixas/estiagem (caso dos episódios chuvosos outonais e em Maio de 2012, após um Inverno extremamente seco), quando a transmissividade dos canais preferenciais de drenagem subterrânea era máxima pelo facto de estarem vazios. Este tipo de resposta verificou-se, também, na sequência de eventos pluviosos concentrados, com picos horários bastante elevados. Contrariamente, os maiores atrasos ocorreram de Janeiro a Março de 2013 (período de abundante recarga num contexto de elevada quantidade de água já no interior do hidrossistema). Para além disso, de salientar a resposta da exurgência muito mais rápida e com maior expressão a

413

episódios de precipitação abundante e intensa do que a sequências de precipitação persistente e um pouco menos abundante.

A resposta rápida e bem definida que se observa na exurgência dos Olhos d'Água do Anços aquando de um episódio de recarga tem de ser decomposta em duas fases: num primeiro momento, essa resposta traduz a carga hidráulica sobre a zona saturada (impulso de pressão), detectada pela subida da condutividade eléctrica e da temperatura das primeiras águas drenadas pelos Olhos d'Água do Anços nessa resposta (efeito-pistão). Num segundo momento, algumas horas depois, a resposta corresponde à chegada ao exutório do fluxo proveniente da circulação rápida na zona não-saturada.

Durante a resposta a um episódio de recarga verifica-se a sobreposição de dois tipos de escoamento nos Olhos d'Água do Anços, podendo mesmo ser três, dependendo, entre outros, do momento do ano hidrológico, das características do episódio de recarga e do estado hidráulico do próprio hidrossistema. Trata-se, assim, por um lado, de escoamento rápido e de escoamento de base, resultantes do funcionamento, em simultâneo, de circulação na rede de condutas da zona não-saturada e da contribuição da zona saturada. Significa isto que, ao mesmo tempo que ocorre a saída de água mais mineralizada proveniente da zona saturada por acção da carga hidráulica exercida pela recarga, a água recentemente infiltrada, muito menos mineralizada, circula rapidamente pela rede de condutas da zona não-saturada atingindo a exurgência quase em simultâneo. Este funcionamento hidrodinâmico é muito frequente no início do ano hidrológico (ou após períodos secos), já que a velocidade de circulação na rede de condutas é máxima nesta altura e a chegada da água recentemente infiltrada ocorre ainda durante o *efeito-pistão*, hidrodinâmica constatada pelo comportamento contrário da temperatura e da condutividade eléctrica no caudal dos Olhos d'Água do Anços. Durante o período mais chuvoso, esta situação já não se verifica, com a água proveniente do escoamento rápido a atingir o exutório algumas horas após o *efeito-pistão*. Neste período húmido, tal como em alturas do ano hidrológico em que ocorram quantitativos de recarga consideráveis, na sequência de um novo episódio de recarga, para além do escoamento rápido e do escoamento de base (este último ainda que com fraca expressão) verifica-se a presença de escoamento diferido, ou seja, água recentemente infiltrada mas que demora bastante mais tempo a chegar à exurgência do que o escoamento rápido.

A existência de uma importante componente de escoamento diferido no caudal dos Olhos d'Água do Anços constitui uma das características do funcionamento hidrodinâmico que mais se evidencia neste trabalho, tendo sido detectada nos três métodos utilizados. A análise correlatória e espectral e a análise da curva de recessão demonstraram a sua existência e importância, bem como a sua duração - 54 dias depois do início da resposta. Este escoamento traduz, segundo o valor obtido para a função *i* (função de infiltração na

análise da curva de recessão), o predomínio de infiltração de carácter lento e diferido, o que origina um significativo atraso entre o momento em que a água se infiltra e o momento em que é drenada pela exsurgência dos Olhos d'Água do Anços. A forma alongada (pouco íngreme) da curva de decréscimo denuncia a sua presença, correspondendo, temporalmente, a um escoamento intermédio entre o escoamento rápido, que ocorre ao longo das condutas da zona não-saturada, e o escoamento de base, contribuído da zona saturada, que assegura a existência de drenagem nas exsurgências após a cessação dos anteriores.

Este escoamento deriva, em grande parte, da retenção temporária de água em diferentes sectores no interior do hidrossistema, sendo, por isso, considerado como uma mistura de água de diferentes proveniências no interior do hidrossistema, o que se reflecte nas oscilações da condutividade eléctrica e da temperatura das águas drenadas no seguimento de um pico de caudal. Embora sem análises químicas que o provem em definitivo, este escoamento parece provir de: (i) estruturas de menor condutividade hidráulica (matriz, fissuras e pequenas fracturas) que retiveram temporariamente água durante o período de recarga abundante; (ii) provável retenção temporária no solo/epicarso, relativamente desenvolvido no sector centro-leste do hidrossistema; (iii) zona epissaturada, que, devido ao abaixamento progressivo do nível piezométrico após um pico de caudal, vai cedendo gradualmente a água armazenada temporariamente em cavidades que existirão nesta área, decorrentes da elevada carsificação, favorecida pela flutuação periódica do nível piezométrico numa espessura que pode atingir os 70 m.

O hidrossistema de Degracias-Sicó é também caracterizado pelo esvaziamento lento e prolongado da zona saturada, com longos períodos de recessão (entre 5 e 6 meses), predominando, por isso, o escoamento de base no caudal das exsurgências em estudo, o qual assegura o seu carácter permanente, mesmo em anos de recarga excepcionalmente baixa. Este comportamento do hidrossistema ficou bem patente na análise das séries temporais da precipitação e do caudal (que mostraram um vincado ciclo anual no caudal) e pela análise da curva de recessão, com valores de coeficiente de recessão muito baixos no último tramo da curva (correspondente ao esgotamento). A estabilidade da temperatura e da condutividade eléctrica em períodos de águas baixas confirmaram este comportamento hidrogeológico que revela a existência de reservas consideráveis na zona saturada.

De uma forma resumida, conclui-se, a partir dos resultados obtidos nos três métodos de análise, que o hidrossistema em estudo apresenta um funcionamento hidrodinâmico marcadamente bimodal, comportando-se, por um lado, como um sistema cársico bem drenado, com uma rede subterrânea de condutas estruturada e funcional, que rapidamente encaminha a água desde a área de recarga até à zona saturada e à exsurgência. Por outro lado, o seu comportamento é o de um sistema com grande inércia, que exerce uma função

415

altamente reguladora a nível anual, actuando como um poderoso filtro para os episódios de precipitação de curta duração (inferiores a 5 dias). Esta capacidade de filtragem dos curtos episódios de precipitação e a transformação da informação transportada pela série de dados da precipitação num ciclo anual revela também a fortíssima não-linearidade que caracteriza o funcionamento do hidrossistema em estudo. Essa não-linearidade manifesta-se, igualmente, no facto de não reagir da mesma maneira a episódios de precipitação semelhantes (dependendo do estado hidráulico prévio do hidrossistema) e no facto de um determinado episódio de recarga poder não ter uma repercussão proporcional no caudal das exsurgências.

As conclusões agora apresentadas relativamente ao funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico de Degracias-Sicó, ainda que tocadas pontualmente por alguma incerteza, própria de um primeiro estudo em meios tão heterogéneos, cumprem quase integralmente os objectivos propostos no início deste trabalho. Consideramos que não se pode afirmar o cumprimento integral desses objectivos, uma vez que subsistem algumas incertezas em determinados pontos de análise, que apenas a continuação da investigação poderá dissipar. Do mesmo modo, as questões colocadas em alguns objectivos poderão e deverão ser muito mais aprofundadas, retirando mais informação sobre o modo de funcionamento deste hidrossistema.

A hidrodinâmica e as características físicas do hidrossistema

As conclusões que resultaram da análise do funcionamento do hidrossistema em estudo colocaram em evidência algumas das suas características gerais. O carácter global dessas conclusões decorre do entendimento que tivemos do objecto de estudo desde o início: uma perspectiva regional de análise, que compreende o hidrossistema no seu conjunto. O seu funcionamento é, assim, entendido como a conjugação de comportamentos de diferentes sectores do hidrossistema que numa 'anarquia organizada' se estruturam e contribuem para o caudal das exsurgências.

Os vários comportamentos hidrodinâmicos identificados e analisados ao longo deste estudo, mediante diferentes métodos, conduziram à conclusão nuclear deste trabalho no que se refere às características físicas do hidrossistema: a sua pronunciada dualidade. Esta propriedade física e, conseqüentemente, hidrodinâmica constitui a principal novidade nos resultados obtidos, colocando, por vezes, algumas situações de aparente contradição. Essa dualidade expressa-se nos tipos de infiltração, nas formas e nas velocidades de circulação, nas estruturas de drenagem e de armazenamento.

Essa dualidade mostra que uma parte do hidrossistema se encontrará bastante carsificada, o que se percebe, desde logo, pela existência de uma grande quantidade de formas

exocársicas e endocársicas que facilitam a infiltração (pontualmente com carácter concentrado) e o encaminhamento subterrâneo da água até às exurgências. Essa elevada carsificação estará presente sobretudo no sector oeste do hidrossistema devido à maior afectação da frente ocidental do Maciço de Sicó pela tectónica, testemunhada pela densa rede de falhas e de fracturas e elas associadas. A carsificação observada à superfície estende-se em profundidade através de uma rede organizada e funcional de canais preferenciais de drenagem (condutas e fracturas alargadas por dissolução) na zona não-saturada, ao longo da qual se verifica circulação rápida, por vezes de carácter turbulento.

O lado oposto desta dualidade significa uma enorme capacidade de filtragem dos episódios de recarga e uma considerável capacidade de armazenamento, explicada pela existência de uma zona saturada extensa e bastante desenvolvida, em grande parte abaixo do nível do exutório (tipo vauclosiano), com uma elevada capacidade de armazenamento e um forte poder regulador sobre o caudal dos Olhos d'Água do Anços. E significará também a existência de sectores menos carsificados (em particular no sector centro-leste) onde ocorrerá retenção temporária da água e circulação lenta ao longo de fissuras e fracturas. Esta hipótese, várias vezes referida ao longo deste trabalho, não foi comprovada em definitivo (mediante análises químicas ou traçagens artificiais), ao contrário da anterior justificação que foi atestada por mergulho subterrâneo no sistema espeleológico dos Olhos d'Água do Anços. No entanto, esta constitui uma hipótese muito válida considerando: (i) os resultados obtidos, em particular na análise da curva de recessão e na análise de séries temporais acerca da existência de uma importante componente de escoamento diferido (em quantidade e extensão temporal – por exemplo até aos 92 dias na recessão de 2009/2010); (ii) a dimensão do hidrossistema (cerca de 120 Km²); (iii) a presença de muito menor número de formas cársicas em algumas áreas da parte centro-leste do hidrossistema; (iv) as características estruturais da parte leste (este sector encontra-se afastado das principais linhas de fracturação, apresentando apenas um rede de fracturas e diáclases de importância secundária). Para além disso, parece também inverosímil que na espessa zona não-saturada (cerca de 300 m) não existam sectores, ainda que de dimensões reduzidas à escala do hidrossistema, que apresentem um menor grau de carsificação e, como tal, ajudem a explicar a retenção temporária e a circulação mais lenta que caracteriza uma parte do funcionamento hidrodinâmico do sistema cársico em estudo. Ademais, e seguindo a literatura da especialidade, é difícil conceber que, numa zona não-saturada tão extensa seja apenas a sua zona epicársica (que se desenvolve apenas em parte da área de recarga) a exercer uma tão grande função de acumulação e de retardamento da infiltração que justifique por si só a existência e importância do escoamento diferido.

Em termos de classificação, de acordo com os resultados obtidos na análise da curva de recessão, o hidrossistema de Degracias-Sicó enquadra-se no domínio dos sistemas

417

cársicos complexos (Mangin, 1975), ou seja, sistemas de grandes dimensões, constituídos por vários sub-sistemas e 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.

A classificação estabelecida segundo a análise de séries temporais reitera a heterogeneidade e complexidade do hidrossistema em estudo, já que os resultados o enquadram em três dos quatro hidrossistemas-tipo. Deste modo, o enorme efeito de memória (85 dias) coloca-o numa das extremidades da classificação – tipo *Torcal* – que representa um hidrossistema inerte, pobremente drenado, com resposta demorada a episódios de recarga, correspondendo a sistemas pouco carsificados (muito mais próximos de aquíferos fissurados) ou um hidrossistema com considerável carsificação, mas com uma rede de drenagem pouco funcional. O prolongado tempo de regularização (38 a 54 dias que se faz sentir a influência de um episódio de recarga) inserem-no no tipo *Fontestorbes*, com características intermédias, próximo do tipo *Torcal*. Em oposição, o hidrograma unitário com uma forma pontiaguda bem definida e a larga banda espectral na análise bivariada (0,197, revelando a presença de uma importante componente de escoamento rápido no caudal dos Olhos d'Água do Anços) colocam o hidrossistema em estudo no tipo *Badget*. Este grupo, apesar de ser considerado intermédio, apresenta características muito próximas do tipo *Aliou*, ou seja, um hidrossistema extremamente bem drenado, de resposta muito rápida a episódios de recarga, característico de sistemas muito carsificados com uma rede de drenagem subterrânea estruturada e funcional.

A complexidade e a especificidade da hidrodinâmica cársica, em particular do hidrossistema de Degracias-Sicó aqui em estudo, ressaltaram por demais evidentes na análise comparativa entre as séries de caudal diário médio e horário médio da exurgência dos Olhos de Água do Anços e do rio Arunca (antes da confluência com o rio Anços e, portanto, com uma drenagem totalmente exorreica, sem qualquer interferência do sector cársico).

Em traços gerais, o hidrograma do rio Arunca é muito mais irregular e contrastado do que o da exurgência, mostrando uma resposta rápida e muito acentuada do caudal face à ocorrência de precipitação (em particular de precipitação intensa), rapidamente atingindo o pico de caudal (5 a 10 horas). O predomínio do escoamento directo e o funcionamento de superfície do rio fazem com que, perante o mesmo episódio pluvioso, o pico de caudal ocorra primeiramente no rio Arunca, com uma antecedência de cerca de 29 horas. Imediatamente após o pico verifica-se uma descida acentuada do caudal, voltando rapidamente para valores próximos dos do início da subida (apenas algumas horas ou alguns dias depois). Em contrapartida, o hidrograma dos Olhos d'Água do Anços é menos variável, verificando-se uma resposta mais lenta a um episódio pluvioso, demorando mais de 1 dia a atingir o pico de caudal (cerca de 30 horas), podendo, inclusive, a curva de crescimento ser

polifaseada, já que a cessação temporária de precipitação apenas reduz ligeiramente o caudal (que não diminui acentuadamente como no rio), o qual continua a subir se se verificar novo episódio de precipitação. Após o pico de caudal, a descida é muito mais lenta, verificando-se, em alguns casos, a permanência durante vários dias, ou até mesmo semanas, dos valores de caudal próximos do caudal instantâneo máximo.

Este comportamento hidrológico tão diferenciado leva à existência recorrente de situações de contraciclo entre estas duas hidrodinâmicas, ou seja, a ocorrência de situações de subida de caudal no rio ainda em fase de diminuição do caudal dos Olhos d'Água do Anços (resposta mais rápida do rio) e a descida do caudal pós-ponta de cheia no rio ainda em fase de subida do caudal na exsurgência (resposta mais demorada dos Olhos d'Água do Anços).

Contudo, a especificidade da hidrodinâmica cársica na área em estudo sobressai principalmente na curva recessão (em especial na fase de decréscimo), onde o contraste exsurgência – rio atinge a sua expressão máxima. A descida muito rápida do caudal no rio Arunca contrasta profundamente com o carácter paulatino da diminuição do caudal na exsurgência dos Olhos d'Água do Anços, evidenciando a forma como o hidrossistema cársico exerce um enorme poder regulador sobre o regime do caudal na exsurgência, o que não acontece com a hidrodinâmica fluvial. A influência de um episódio pluvioso no rio Arunca finda em apenas 3 dias, verificando-se a drenagem completa da água do curso principal e de toda a densa rede de drenagem da sub-bacia (predomínio absoluto do escoamento directo) enquanto que nos Olhos d'Água do Anços, essa influência dura cerca de 13 dias (escoamento rápido), podendo estender-se muito para além disso (54 dias, através do escoamento diferido).

Neste período de descida do caudal percebe-se ainda outra diferença entre estes dois sectores, em que a ocorrência de pequenos episódios de precipitação (quantitativa e temporalmente), a reflectir-se de imediato no hidrograma do rio Arunca, originando um novo pico de caudal (ainda que de menor expressão), podendo mesmo originar uma sucessão de pequenos picos ao longo da curva de decréscimo. Na exsurgência dos Olhos d'Água do Anços esses episódios praticamente não se reflectem no caudal, mostrando, uma vez mais, a capacidade filtrante do hidrossistema cársico de Degraças-Sicó.

Perspectivas de investigação futura

As ilações retiradas ao longo deste estudo, e agora apresentadas de forma resumida, revelaram, comprovadamente, a enorme complexidade e particularidade de que se reveste o funcionamento hidrológico dos sistemas cársicos. Deste modo, o escasso conhecimento sobre a hidrodinâmica do Maciço Cársico de Sicó existente até ao presente trabalho e os constrangimentos com que nos deparámos e que, em alguns casos, limitaram mesmo a

419

análise, deixam antever o enorme interesse em continuar o seu estudo, tentando aprofundar o conhecimento sobre alguns comportamentos hidrodinâmicos que precisam ser melhor compreendidos.

Assim, em relação às perspectivas de trabalho futuro, são inúmeras as análises que carecem ainda de ser efectuadas para continuar o processo de aprofundamento do conhecimento deste hidrossistema, as quais pretendemos ir realizando futuramente para desvanecer incertezas, tão comuns em hidrodinâmicas tão específicas como as dos sistemas cársicos.

Um dos aspectos que deve merecer especial atenção é o respeitante à *recarga* do hidrossistema. Assume um enorme interesse a quantificação, ainda que de forma relativa, do peso de diferentes variáveis (climatológicas, topográficas, litológicas, geomorfológicas, edáficas, vegetação, usos do solo) no processo de recarga. Ademais, deve-se desenvolver esforços no sentido de uma maior precisão na determinação dos quantitativos de recarga através da aplicação de outros métodos. Do mesmo modo, importa aperfeiçoar o modelo APLIS sobre a repartição espacial da recarga bem como a aplicação de outros métodos, como, por exemplo, o EPIK ou o COP.

Relativamente à análise da componente *descarga*, consideramos que um dos estudos a empreender futuramente é a utilização de dados horários na análise de séries temporais do caudal e da precipitação bem como da temperatura e da condutividade da água, de forma a conseguirmos resultados com uma definição temporal ainda mais precisa (nível horário). Este tipo de estudo poderá surtir resultados particularmente interessantes quando aplicado a diferentes contextos sazonais e a anos fortemente contrastados do ponto de vista hidrometeorológico. A conjugação deste tipo de análise (que fornece informação relativa às características da resposta das exsurgências) com a análise da curva de recessão e a decomposição do hidrograma de alguns episódios em diferentes cenários hidrometeorológicos revelaria informação preciosa sobre a duração e as características dessa resposta.

Contudo, em nosso entender, o estudo que deve ser preferencialmente desenvolvido é o referente à análise hidrogeoquímica porque só assim se saberá com total certeza a proveniência da água que chega aos Olhos d'Água do Anços, bem como o seu tempo e modo de circulação. Apenas este tipo de estudo ajudará a desvanecer algumas interrogações neste domínio, que subsistiram no final deste trabalho. A principal delas é a existência, ou não, de retenção epicársica (em particular no sector centro-leste da área de recarga), a que se junta a necessidade de definir e compreender melhor a importância e o papel desempenhado pela zona não-saturada nos episódios de recarga, uma vez que a infiltração é, na sua quase totalidade, de carácter difuso e esta zona é consideravelmente espessa e, provavelmente, bastante heterogénea. De salientar, ainda neste ponto, a realização de traçagens, para confirmar o trajecto subterrâneo da água e, sobretudo, para definir os tempos desse percurso bem como perceber os locais onde ocorrerá a retenção

temporária da água infiltrada, dada a heterogeneidade interna do Maciço revelada pela análise efectuada neste estudo.

Por fim, importa ainda referir o interesse em prosseguir os estudos de relação da hidrodinâmica cársica com a dinâmica fluvial, iniciados na última parte deste trabalho, aprofundando o conhecimento do funcionamento hidrológico em contextos hidrometeorológicos diferenciados. As conclusões, fundamentadas cientificamente, que daqui advierem devem ser enquadradas numa perspectiva de gestão de bacia hidrográfica e de planeamento dos usos do solo, dada a enorme susceptibilidade de qualquer um destes meios à poluição. Esta visão geográfica deverá, por isso, ser uma das tarefas a desenvolver futuramente.

BIBLIOGRAFIA

- Allocca, V.; Manna, F. e De Vita, P. (2014) – Estimating annual groundwater recharge coefficient for karst aquifers of the southern Apennines (Italy), *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 18, pp. 803-817.
- Almeida, C. A. C. (1985) – *Hidrogeologia do Algarve central*, Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, 333 p.
- Almeida, A. C.; Soares, A. F.; Cunha, L e Marques, J. F. (1990) – Proémio ao Estudo do Baixo Mondego, *Biblos*, vol. LXVI, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, pp. 17-47.
- Almeida, C.; Mendonça, J. J. L.; Jesus, M. R. e Gomes, A. J. (2000) – Sistema-aquífero Sicó-Alvaiázere (011), *Sistemas aquíferos de Portugal continental*, Instituto da Água, Lisboa, pp. 266-278.
- Almeida, C., Mendonça, J. J. L.; Duarte, R. S.; Quina, A. P. e Neves, J. R. (2000a) – *Glossário de Termos Hidrogeológicos*, Instituto da Água, Lisboa, 54 p.
- Amit, H.; Lyakhovskiy, V.; Katz, A.; Starinsky, A. e Burg, A. (2002) – Interpretation of spring recession curves, *Ground Water*, vol. 40, 5, pp. 543-551.
- Andreo, B.; Carrasco, F.; Bakalowicz, M.; Mudry, J.; Vadillo, I. (2002) – Use of hydrodynamic and hydrochemistry to characterise carbonate aquifers. Case study of the Blanca-Mijas unit (Málaga, southern Spain), *Environmental Geology*, 43 (1-2), pp. 108-119.
- Andreo, B.; Vías, J.; López-Geta, J.; Carrasco, F.; Durán, J. e Jiménez, P. (2004) – Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos, *Boletín Geológico y Minero*, 115, 2, pp. 177-186.
- Andreo, B.; Vías, J.M.; Mejías, M.; Ballesteros, B.J. e Marín, A.I. (2007) – Estimación de la recarga mediante el método APLIS en el acuífero jurásico de el Maestrazgo (Castellón, NE España). In Pulido Bosch, A.; López-Gueta, J.A. e González, G.R (Eds) – *Los acuíferos costeros: retos y soluciones*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y aguas subterráneas, nº 23, Vol.I, pp. 893-902
- Andreo, B.; Vías, J.; Durán, J.; Jiménez, P.; López-Geta, J. e Carrasco, F. (2008) – Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in Southern Spain, *Hydrogeology Journal*, 16, pp. 911-925.

423

- Andreo, B., Ravbar, N. e Vías, J.M. (2009) – Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites. *Hydrogeology Journal*, 17 (3), pp. 749-758
- Andreo, B.; Carrasco, F.; Durán, J. e LaMoreaux, J. W. (Eds.) (2010) – *Advances in Research in Karst Media*, Springer, 526 p.
- Andreu, J. M.; Alcalá, F. J.; Vallejos, A. e Pulido-Bosch, A. (2011) – Recharge to mountainous carbonated aquifers in SE Spain: different approaches and new challenges, *Journal of Arid Environments*, 1-9.
- Angelini, P. (1997) – Correlation and spectral analysis of two hydrogeological systems in central Italy, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 42(3), pp. 425-438.
- Antigüedad Auzmendi, I. (1988) – Estudio de acuíferos kársticos a partir de sus respuestas naturales. Aplicación a dos sistemas del País Vasco, *Rev. Soc. Geol. España*, 1, (1-2), pp. 211-227.
- Aquilina, L.; Ladouche, B. e Dorfliger, N. (2006) – Water storage and transfer in the epikarst of karst systems during high flow periods, *Journal of Hydrology*, 327, pp. 472-485.
- Azeredo, A. C.; Duarte, L. V.; Henriques, M. H. e Manupella, G. (2003) – *Da dinâmica continental no Triásico aos mares do Jurássico inferior e médio*. Cadernos de Geologia de Portugal, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 45.p.
- Baedke, S. J. e Krothe, N. C. (2001) – Derivation of effective hydraulic parameters of a karst aquifer from discharge hydrograph analysis. *Water Resources Research*, 37 (1), pp. 13-19.
- Bailly, D. (2009) – *Vers une modélisation des écoulements dans les massifs très fissurés de type karst: étude morphologique, hydraulique et changement d'échelle*. Tese de doutoramento, Université de Toulouse, 220 p.
- Bailly-Comte, V. (2008) – *Interactions hydrodynamiques surface/souterrain en milieu karstique*. Tese de doutoramento, Université de Montpellier II, Montpellier, 229 p.
- Bakalowicz, M. (1979) – *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification*. Tese de doutoramento, Université Pierre et Marie Curie, Paris-VI, 269 p.
- (1999) – *Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques*, Guia técnico n.º 3 – bassin rhone-mediterranee-corse, 42 p.

- (2004) – The epikarst. The skin of karst. In Jones, W. K., Culver, D. C. e Herman, J. S. (Eds.) – *Epikarst. Proceedings of 'Epikarst Symposium'*, Publicação especial, 9, Karst Waters Institute, Charles Town, West Virginia, pp. 16-22.
- (2005) – Karst groundwater: a challenge for new resources, *Hydrogeology Journal*, 13, pp. 148-160.
- Bakalowicz, M. e Mangin, A. (1980) – L'aquifère karstique. Sa définition, ses caractéristiques et son identification. *Mémoires de la Société Géologique de France*, 11, pp. 71-79.
- Bakalowicz, M.; El-Hakim e El-Hajj, A. (2008) – Karst groundwater resources in the countries of eastern Mediterranean: the example of Lebanon, *Environmental Geology*, 54, pp. 597-604.
- Barberá, J. A. e Andreo, B. (2010) – Duality of functioning in a karst system under mediterranean climate conditions deduced from hydrochemical characterization. In Andreo, B. et al. (Eds.) – *Advances in Research in Karst Media*, Springer, pp. 189-194.
- Batiot, C.; Emblanch, C. e Blavoux, B. (2003) – Carbone organique total (COT) et Magnésium (Mg²⁺): Deux traceur complémentaires du temps de séjours dans l'aquifère karstique, *C R Geoscience*, 335, pp. 205-214.
- Benderitter, Y.; Roy, B. e Tabbagh, A. (1993) – Flow characterization through heat transfer evidence in a carbonate fractured medium: First approach, *Water Resources Research* 29, 11, pp. 3741-3747.
- Bicalho, C.; Batiot-Guilhe, C.; Deidel, J. L.; Van Exter, S. e Jourde, H. (2012) – Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer, *Journal of Hydrology*, 450-451, pp. 206-218.
- Birk, S.; Liedl, R. e Sauter, M. (2006) – Karst spring responses examined by process-based modeling, *Ground Water*, vol. 44, 6, pp. 832-836.
- (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, pp. 179-193.
- Blavoux, B.; Mudry, J. e Puig, J. (1992) – Water-budget, functioning and protection of the fontaine-de-vacluse karst system (southeastern France), *Geodinamica Acta*, Vol. 5, 3, pp. 153-172.
- Bonacci, O. (1987) – *Karst hydrology*. Springer Verle, 184 p.
- (1993) – Karst spring hydrographs as indicators of karst aquifers, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 38 (1), pp. 51-62.

425

- (1999) – Water circulation in karst and determination of catchment areas: exemple of the River Zrmanja, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 44 (3), pp. 373-386.
- (2001) – Monthly and annual effective infiltration coefficients in Dinaric karst: example of the Gradole karst spring catchment, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 46 (2), pp. 287-299.
- Bouchaou, L.; Mangin, A. e Chauve, P. (2002) – Turbidity mechanism of water from a karstic spring: example of the Ain Asserdoune spring (Beni Mellal Atlas, Morocco). *Journal of Hydrology*, 265, pp. 34-42.
- Boussinesq, J. (1904) – Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources, *J. Math. Pure Appl.* 10, pp. 5-78.
- Box, G. E. P.; Jenkins, G. M. e Reinsel, G. C. (1994) – *Time series analysis: forecasting and control*, 3.^e ed., Prentice Hall Inc., NJ, USA.
- Brodie, R. S. e Hostetler, S. (2005) – A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. *Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 conference*, Auckland, New Zealand, 28 November – 2 December, 2005.
- Carreira, P. M. M. (1986) – *Estudo hidroquímico do Maciço Calcário Condeixa-Sicó*, Relatório de estágio científico, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 201 p.
- Carter, J. e Driscoll, D. (2006) – Estimating recharge using relations between precipitation and yield in a mountainous area with large variability in precipitation, *Journal of Hydrology*, 316, pp. 71-83
- Charlier, J. B.; Mudry, J. e Bertrand, C. (2010) – Use of Dissolved Organic Carbon to Characterize Infiltration in a Small Karst System in the French Jura Mountains (Fertans, France). In Andreo, B. et al. (Eds.) – *Advances in Research in Karst Media*, Springer, pp. 151-156.
- Chinarro, A.; Cuchi, J. A. e Villarroel, J. L. (2010) – Application of Wavelet Correlation Analysis to the Karst Spring of Fuenmayor. San Julián de Banzo, Huesca, Spain. In Andreo, B. et al. (Eds.) – *Advances in Research in Karst Media*, Springer, pp. 75-82.
- 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), pp. 855-869.

- Cornaton, F. (1999) – *Utilisation de modèles continu discret et a double continuum pour l'analyse des reponses globales de l'aquifère karstique*. Dissertação de mestrado, Universidade de Neuchâtel, Suíça, 83 p.
- COST 65 (1995) - *Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas. Final report (COST action 65)*. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Report EUR16547 EN, 446 p.
- Covington, M. D.; Luhmann, A. J.; Gabrovsek, F.; Saar, M. O. e Wicks, C. M. (2011) – Mechanisms of heat exchange between water and rock in karst conduits, *Water Resources Research*, 47 p.
- Crispim, J. A. (1986) – *Dinâmica cársica da região de Ancião*, Relatório, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- (1995) – *Dinâmica cársica e implicações ambientais nas depressões de Alvados e Minde*, Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- (2010a) – Panorama das Regiões Cársicas de Portugal. In *Geologia Clássica, Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História*, Volume V, pp. 469-478
- (2010b) – Aspetos relevantes do património cársico da Orla Ocidental, *Revista e-Terra*, 18 (4).
- Cunha, L. e Soares, A. F. (1987) – A carsificação no Maciço de Sicó. Principais fases de evolução, *Cadernos de Geografia*, 6, Coimbra, pp. 119-137
- Cunha, L. (1988) – *As serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere*. Tese de doutoramento, Coimbra, 329 p.
- (1996) – Les Karsts Portugais, Problèmes et Perspectives, *Karstologia*, 28(2), p. 41-48.
- (2003) – Estudos de geomorfologia Cársica em Portugal. Um ponto de situação relativo aos maciços do sector setentrional da Orla Mesocenozóica Ocidental Portuguesa (Outil, Boa Viagem e Sicó). In *Actas do IV CNEspeleo Congress*, Leiria.
- Cunha, L. e Dimuccio, L. (2014) – Formas e processos cársicos nos maciços calcários do centro de Portugal. O caso particular do Maciço de Sicó, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, nº 4, pp. 673-685
- Custodio, E. e Llamas, M. R. (1976) – *Hidrología subterránea*, Vol.I, Ed. Omega, Barcelona.
- Daveau, Suzanne (1977) – *Répartition et rythme des précipitations au Portugal*. Centro de Estudos Geográficos, Lisboa, 192 p.

427

- Denic-Jukic, V. e Jukic, D. (2003) – Composite transfer functions for karst aquifers, *Journal of Hydrology*, 274, pp. 80-94.
- Desmarais, K. e S. Rojstaczer. (2002) – Inferring source waters from measurements of carbonate spring response to storms, *Journal of Hydrology*, 260 (1-4), pp. 118-134.
- Dewandel, B.; Lachassagne, P.; Bakalowicz, M.; Weng, P. e 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), pp. 248-269.
- Dinis, J. L. (2000) – *Estratigrafia e sedimentologia da formação de Figueira da Foz: Aptiano a Cenomaniano do sector norte da Bacia Lusitânica*. Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Doctor, D. H.; Alexander, E. C. Jr.; Petric, M.; Kogovsek, J.; Urbanc, J.; Lojen, S. e Stichler, W. (2006) – Quantification of karst aquifer discharge components through end-member mixing analysis using natural chemistry and isotopes as tracers, *Hydrogeology Journal*, 14, pp. 1171-1191.
- Doerfliger, N. e Zwahlen, F. (1995) – EPIK: a new method for outlining of protection areas in karst environment. In Günay G. e Johnson, I. (Eds.) – *Proceedings of 5th International symposium and field seminar on karst waters and environmental impacts*. Antalya, Balkema, Rotterdam, pp. 117-123.
- Doerfliger, N.; Jeannin, P.-Y. e Zwahlen, F. (1999) – Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method), *Environmental Geology*, 39 (2), pp. 165-176.
- Doerfliger, N.; Pinault, J. N.; Petit, V. e Jauffret, D. (2004) – *Systèmes karstiques et crues du Doubs. Metodologie de determination de la contribution des systems karstiques aux écoulements de surface, hors crues et des étiages*. Rapport final. BRGM/RP, Montpellier, 183 p.
- Doerfliger, N. e Plagnes, V. (2009) – *Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques, guide méthodologique de la méthode PaPRIKa*, Rapport BRGM RP-57527-FR, 100 p.
- Dreiss, S. J. (1982) – Linear kernels for karst aquifers, *Water Resources Research*, 18 (4), pp. 865-876.
- (1983) – Linear unit-response functions as indicators of recharge areas for large karst springs, *Journal of Hydrology*, 61, pp. 31-44.

- Drogue, C. (1974) – Structure de certains aquifères karstiques d'après les résultats de travaux de forage. *Comptes Rendus Académie des sciences*, Paris, D, 278, pp. 2621-2624.
- Durán, J.J.; Andreo, B.; Vías, J.; López-Geta, J.A.; Carrasco, F. e Jiménez, P. (2004) – Clasificación de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética según la tasa de recarga, *Boletín Geológico y Minero*, 115, 2, Instituto Geológico y Minero de España, pp.199-212.
- Ebrahimi, B.; Pasandi, M. e Ahmadipour, M. (2007) – Hydrodynamic behaviour of karstic aquifers in Boroujerd, western Iran, *Hydrological Sciences–Journal–des–Sciences Hydrologiques*, 52(1), pp. 192-205.
- Eisenlohr, L. (1996) – *Variabilité des réponses naturelles des aquifères karstiques*. Tese de doutoramento, Université de Neuchâtel, Suïça, 121 p.
- Eisenlohr, L., Bouzelboudjen, M., Király, L. e Rossier, Y. (1997) – Numerical versus statistical modeling of natural response of a karst hydrogeological system, *Journal of Hydrology*, 202, pp. 244-262.
- El-Hakim, M. e 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, pp. 329-339.
- Emblanch, C.; Blavoux, B.; Puig, J. M. e Mudry, J. (1998) – Dissolved organic carbon of infiltration within the autogenic karst hydrosystem, *Geophysical Research Letters*, 25, pp. 1459-1462.
- European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development (1995) – COST 65: *Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas*, Final report (COST action 65). Report EUR 16547, Bruxelles/Luxemburgo, 446 p.
- Ferreira, D. B. (2005) – O ambiente climático. In Medeiros, C.A. (Coord.) – *Geografia de Portugal, Vol. 1: O Ambiente Físico*, Circulo de Leitores, Lisboa, pp. 305-385.
- Fiorillo, F. (2011) – The role of the evapotranspiration in the aquifer recharge processes of Mediterranean areas. In Gerosa, G. (Eds.) – *Evapotranspiration. From measurements to agricultural and environmental applications*, InTech, pp. 373-388.
- Fiorillo, F. e Doglioni, A. (2010) – The relation between karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis (Campania, southern Italy), *Hydrogeology Journal*, 18, pp. 1881-1895.

429

- Fleury, P.; Plagnes, V. e Bakalowicz, M. (2007) – Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France), *Journal of Hydrology*, 345 (1-2), pp. 38-49.
- Fleury, P.; Ladouche, B.; Conroux, Y.; Jourde, H. e Dorfliger, N. (2009) – Modelling the hydrologic functions of a karst aquifer under active water management – The Lez spring, *Journal of Hydrology*, 365, pp. 235-243.
- Ford, D. e Williams, P. (2007) – *Karst hydrogeology and geomorphology*, John Wiley & Sons, Reino Unido, 562 p.
- Forkasiewicz, J. e Paloc, H. (1967) – *Le régime de tarissement de la Foux-de-la-Vis. Etude préliminaire*. Chronique d'Hydrogéologie, BRGM, v. 3(10), pp. 61-73.
- Fournier, M. (2006) – *Identification des modalités de transport et de la vulnérabilité du karst de la craie. Application de nouveaux outils statistiques d'analyse des données au système du Hannetot (Seine-Maritime, France)*. Tese de doutoramento, Université de Rouen, 227 p.
- Gabrovsek, F. e Dreybrodt, W. (2001) – A model of the early evolution of karst aquifers in limestone in the dimensions of length and depth, *Journal of Hydrology*, 240, pp. 206-224.
- Gárfias-Soliz, J.; Llanos-Acebo, H. e Martel, R. (2010) – Time series and stochastic analysis to study the hydrodynamic characteristics of karst aquifers, *Hydrological Processes*, 24, pp. 300-316.
- Garry, B. (2007) – *Étude des processus d'écoulements de la zone non saturée pour la modélisation des aquifères karstiques. Hydrodynamique et hydrochimie sur les sites du Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) de Rustrel et de Fontaine de Vaucluse*, Tese de doutoramento, Université de Avignon, 218 p.
- Genthon, P.; Bataille, A.; Fromant, A.; D'Hulst, D. e Bourges, F. (2005) – Temperature as a marker for karstic waters hydrodynamics. Inferences from 1 year recording at La Peyrere cave (Ariege, France), *Journal of Hydrology*, 311, pp. 157-171.
- Geyer, T. (2008) – *Process-based characterisation of flow and transport in karst aquifers at catchment scale*, Tese de doutoramento, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, 103 p.
- Geyer, T.; Birk, S.; Liedl, R. e Sauter, M. (2008) – Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs, *Journal of Hydrology*, 348, pp. 452-463.

- Goldscheider, N. (2002) – *Hydrogeology and vulnerability of karst systems: examples from the Northern Alps and Swabian Alb*. Tese de doutoramento, Schr Angew Geol Karlsruhe, Karlsruhe, 236 p.
- Goldscheider, N.; Klute, M.; Sturm, S. e Hotzl, H. (2000) – The PI method: a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers, *Z Angew Geol*, 463, pp.157–166.
- Goldscheider, N. e Drew, D. (Eds.) (2007) – *Methods in Karst Hydrogeology*. International contributions to hydrogeology, 26, International Association of Hydrologist, Taylor & Francis Group, Londres, 264 p.
- 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, Université de Neuchâtel, Suíça, 135 p.
- Grasso, D. A. e Jeannin, P.-Y. (1998) – Statistical approach to the impact of climatic variations on karst spring chemical responses, *Bulletin d'Hydrogéologie*, 16, pp. 59-74.
- (2002) – A global experimental system approach of karst springs' hydrographs and chemographs, *Ground Water*, vol. 40, 6, pp. 608-617.
- Grasso, D. A.; Jeannin, P.-Y. e Zwahlen, F. (2003) – A deterministic approach to the coupled analysis of karst springs' hydrographs and chemographs, *Journal of Hydrology*, 271, 1-4, pp. 65-76.
- Gunn, J. (1983) – Point recharge of limestone aquifers: a model from New Zealand karst, *Journal of Hydrology*, 61, pp. 19-29.
- (1986) – A conceptual model for conduit flow dominated karst aquifers. In Gunay, G. e Johnson, A. I. (Eds.) – *Karst water resources*, Proceedings of the International Symposium, Ankara, Turkey, July 1985. International Association of Hydrological Sciences Publication 161, pp. 587-596.
- (2010) – Is the Term 'Karst Aquifer' Misleading? In Andreo, B.; Carrasco, F.; Durán, J. J. e LaMoreaux, J. W. (Eds.) – *Advances in Research in Karst Media*, Springer, pp. 57-62.
- Hao, Y.; Liu, G.; Li, H.; Li, Z.; Zhao, J. e Yeh, T.-C. (2012) – Investigation of karstic hydrological processes of Niangziguan Springs (North China) using wavelet analysis, *Hydrological Processes*, 26, pp. 3062-3069.
- Hartmann, A.; Lange, J.; Weiler, M.; Arbel, Y. e Greenbaum, N. (2012) – A new approach to model the variability of karstic recharge, *Hydrology and Earth Systems Science Discussion*, 9, pp. 2443-2473.

431

- Horvat, B. e Rubinic, J. (2006) – Annual runoff estimation – an example of karstic aquifers in the transboundary region of Croatia and Slovenia, *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 51 (2), pp. 314-324.
- Instituto de Meteorologia (2012) – *Boletim Climatológico Sazonal – Inverno 2011/12*, Lisboa, 13 p.
- Jeannin, P.-Y. (2013) – Modeling flow in phreatic and epiphreatic karst conduits in the Hölloch Cave (Muotatal, Switzerland), *Water Resources Research*, 37 (2), pp. 191-200.
- Jeannin, P.-Y. e Grasso, D. A. (1995) – Estimation des infiltrations efficaces journalières sur le bassin karstique de la Milandrine (Ajoie, JU, Suisse), *Bulletin d'Hydrogéologie*, 14, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Suíça, pp. 83-93.
- (1997) – Permeability and hydrodynamic behaviour of a karstic environment. In Gunay & Johnson (Eds.) – *Karst waters and environmental impacts*, Balkema, Roterdão, pp. 335-342.
- Jeannin, P.-Y. e Sauter, M. (1998) – Analysis of karst hydrodynamic behavior using global approaches: a review, *Bulletin d'Hydrogéologie*, 16, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Suíça, pp. 31-48.
- Jemcov, I. e Petric, M. (2009) – Measured precipitation vs. effective infiltration and their influence on the assessment of karst system based on results of time series analysis, *Journal of Hydrology*, 379, pp. 304-314.
- Jocson, J. M. U.; Jenson, J. W. e Contractor, D. N. (2002) – Recharge and aquifer response: Northern Guam Lens Aquifer, Guam, Mariana Islands, *Journal of Hydrology*, 260, pp. 231-254.
- Jones, W. K.; Culver, D. C. e Herman, J. S. (Eds.) (2004) – *Epikarst*. Proceedings of 'Epikarst Symposium', Special Publication, 9, Karst Waters Institute. Charles Town. West Virginia. 160 p.
- Jukic, D. e Denic-Jukic, V. (2006) – Nonlinear kernel functions for karst aquifers. *Journal of Hydrology*, 328, pp. 360-374.
- (2009) – Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model, *Journal of Hydrology*, 373, 302-315.
- (2011) – Partial spectral analysis of hydrological time series, *Journal of Hydrology*, 400, 223-233.
- Kessler, H. (1957) – Estimation of subsurface water resources in karstic regions, *General Assembly of Toronto*, tomo II, Publicação n.º 44, Red Book, IAHS/UNESCO, pp. 199-206.

- (1967) – Water Balance Investigations in the Karstic Regions of Hungary, *Hydrology of fractured rocks*, Symposium of Dubrovnik, Publicação n.º 73, Red Book, IAHS/UNESCO, pp. 91-105.
- Kiraly, L. (1975) – Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caracteres physique des roches karstique. In: Burger, A. & Dubertet, L. (Eds.) – *Hydrogeology of karstic terrains*, Int. Union of Geol. Sciences, B, 3, pp. 53-67.
- (1985) – *FEM-301: A three dimensional model for groundwater flow simulation*. NAGRA Technical Report 84-49, 96 p.
- (2002) – Karstification and groundwater flow. In Gabrovsek, F. (Ed.) – *Evolution of karst: from prekarst to cessation*. ZRC, Postojna, pp. 155-190.
- Kiraly, L. e Morel, G. (1976) – Remarques sur l'hydrogramme des sources karstiques simule par modèles mathématiques. Bulletin d'Hydrogéologie, 1, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Suíça, pp. 37-60.
- Kiraly, L.; Perrochet, P. e Rossier, Y. (1995) – Effect of the epikarst on the hydrograph of karst springs: a numerical approach. *Bulletin d'Hydrogéologie*, 14, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Suíça, pp. 199-220.
- Kimchouck, A. B. (2004) – Toward defining, delimiting and classifying epikarst: its origin, processes and variants of geomorphic evolution, *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 2 (1), 13 p.
- Kogovsek, J. (2010) – *Characteristics of percolation through the karst vadose zone*. Karst Research Institute, Postojna, 168 p.
- Kogovsek, J. e Petric, M. (2010) – Water temperature as a natural tracer, a case study of the Malenščica karst spring (SW Slovenia), *Geologia Croatica*, 63/2, pp. 171-177.
- Kovacic, G. (2010) – Hydrogeological study of the Malenscica karst spring (SW Slovenia) by means of a time series analysis, *Acta Carsologica*, 39/2, pp. 201-215.
- Kovacic, G. e Petric, M. (2010) – Contribution of time series analysis to the study o the Malenscica karst spring, Slovenia. In Bonacci, O. (Ed.) – *Sustainability of the karst environment. Dinaric karst and other karst regions*, Proceedings of the International interdisciplinary scientific conference, Croácia.
- Kovács, A. (2003) – *Geometry and hydraulic parameters of karst aquifers: a hydrodynamic modeling approach*, Tese de doutoramento, Université de Neuchâtel, Suíça, 131 p.
- Kovács, A. e Perrochet, P. (2008) – A quantitative approach to spring hydrograph decomposition, *Journal of Hydrology*, 352, pp. 16-29.

433

- Kovács, A. e Sauter, M. (2008) – Modeling karst hydrodynamics. In Martin, J e White, W. (Eds.) – *Frontiers of karst research*, Special Publication 13, Karst Waters Institute, Leesburg, Virginia, pp. 13-26.
- Kovács, A.; Perrochet, P.; Király, K. e Jeannin, P.-Y. (2005) – A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis, *Journal of Hydrology*, 303, pp. 152-164.
- Kresic, N. (1997) – *Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling*. Boca Raton, CRC Lewis Publishers, 461 p.
- Labat, D.; Ababou, R. e Mangin, A. (1999) – Linear and non-linear input/output models for karstic springflow and flood prediction at different time-scales. *Stochastic Environmental Research Risk Assessment*, 13 (5), pp. 337-364.
- Labat, D.; Ababou, R. e Mangin, A. (2000) – Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: convolution and spectral analysis, *Journal of Hydrology*, 238, pp. 123-148.
- LaMoreaux, Philip E.; Wilson, B. M. e Menon, B. A. (Eds.) (1984) – *Guide to the hydrology of carbonate rocks*, Unesco Studies and Reports, n.º 41, Paris, 343 p.
- Larocque, M.; Mangin, A.; Razack, M. e Banton, O. (1998) – Contribution of correlation and spectral analysis to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France), *Journal of Hydrology*, 205, pp. 217-231.
- Lencastre, A. (1996) – *Hidráulica geral*. Edição do autor, Lisboa, 651 p.
- Lencastre, A. e Franco, F. M. (1992) – *Lições de Hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa, 2ª edição, Lisboa, 453 p.
- Liedl, R.; Renner, S. e Sauter, M. (1998) – Obtaining information about fracture geometry from heat flow data in karst systems, *Bulletin d'Hydrogéologie*, 16, pp. 143-153.
- Liñan Baena, C. (2005) – Hydrogeología de acuíferos carbonatados en la unidad de Yunquera-Nieves (Málaga), *Serie Hidrogeología y Aguas subterráneas*, Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, 16, Madrid, 322 p.
- Liñan Baena, C.; Andreo, B.; Mudry, J. e Carrasco Santos, F. (2009) – Groundwater temperature and electrical conductivity as tools to characterize flow patterns in carbonate aquifers: The Sierra de las Nieves karst aquifer, southern Spain, *Hydrogeology Journal*, 17, pp. 843-853
- Liu, L.; Shu, L.; Chen, X. e Oromo, T. (2010) – The hydrologic function and behavior of the Houzhai underground river basin, Guizhou Province, southwestern China, *Hydrogeology Journal*, 18, pp. 509-518.

- Long, A. J. (2009) – Hydrograph separation for karst watersheds using a two-domain rainfall-discharge model, *Journal of Hydrology*, 364, pp. 249-256.
- Long, A. J. e Derickson, R. G. (1999) – Linear systems analysis in a karst aquifer, *Journal of Hydrology*, 219, pp. 206-217.
- Long, A. J. e Gilcrease, P. C. (2009) – A one-dimensional heat-transport model for conduit flow in karst aquifers, *Journal of Hydrology*, 378, pp. 230-239.
- Long, A. J. e Mahler, B. J. (2013) – Prediction, time variance, and classification of hydraulic response to recharge in two karst aquifers, *Hydrology and Earth System Science*, 17, pp. 281-294.
- López-Chicano, M.; Bouamama, M.; Vallejos, A e Pulido-Bosch, A. (2001) – Factors which determine the hydrogeochemical behaviour of karstic springs. A case study from the Betic Cordilleras, Spain, *Applied Geochemistry*, 16, pp. 1179-1192.
- Lu, J.; Sun, G.; McNulty, S. e Armatya, D. M. (2005) – A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States, *Journal of the American Water Resources Association*, pp. 621-633.
- Luetscher, M. e Jeannin, P.-Y. (2004) – Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes, *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 2 (2) December 2004, 9 p.
- Luhmann, A. J. (2011) – *Water Temperature as a Tracer in Karst Aquifers*, Tese de doutoramento, Universidade do Minnesota, 164 p.
- Luhmann, A. J.; Covington, M. D.; Peters, A. J.; Alexander, S. C.; Anger, C. T.; Green, J. A.; Runkel, A. C. e Alexander Jr., E. C. (2011) – Classification of thermal patterns at karst springs and cave streams. *Ground Water*, 49 (3), pp. 324-335.
- Luhmann, A. J.; Covington, M. D.; Alexander, S. C.; Chai S. Y.; Schwartz, B. F.; Groten, J. T. e Alexander, E. C. Jr. (2012) – Comparing natural and artificial tracers in karst and using them to estimate flow path geometry. *Journal of Hydrology*, 448-449, pp. 201-211.
- Maillet, E. (1905) – *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale*, Hermann, Paris
- Majone, B.; Bellin, A. e Borsato, A. (2004) – Runoff generation in karst catchments: multifractal analysis, *Journal of Hydrology*, 294 (1-3), pp. 176-195.
- Malik, P. e 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), pp. 2245-2257.

435

- Mangin, A. (1971) – Étude des débits classes d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique, *Annales de spéléologie*, 28/1, pp. 21-40.
- (1975) – Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, *Annales de Spéléologie*, 30 (1), pp. 21-124.
- (1981) – Utilisation des analyses corrélatoires et spectrales dans l'approche des systèmes hydrologiques. Comptes Rendus de l'Académie de Sciences, Série III, tome 293, Paris pp. 401-401 e pp. 1011-1014.
- (1984) – Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales, *Journal of Hydrology*, 67, pp. 25-43.
- (1994) – Karst hydrogeology. In Gilbert, J.; Danielopol, D. L. e Stanford, J. A. (Eds.) – *Groundwater ecology*. Academic Press, pp. 43-67.
- (2008) – Caractérisation des propriétés des systèmes karstiques d'après l'étude des écoulements, *Actes du Colloque Hydrogéologie et karst au travers des travaux de Michel Lepiller*.
- Manupella, G.; Zbyszewski, G. e Ferreira, O. (1978) – *Notícia explicativa da folha 23-A (Pombal)*, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 62 p.
- Maqsoud, A. (1996) – *Approche hydrologique et hydrochimique du caractère karstique éventuel d'hydrosystèmes souterrains de la craie du bassin de Paris*. Tese de doutoramento, Université de Lille I.
- Marín, A. I.; Doerfliger, N. e Andreo, A. (2009) – Comparative application of two Methods (COP and PaPRIKa) for groundwater vulnerability mapping in the Lez Karst System (Montpellier, South France). In Andreo, B. et al. (Eds.) – *Advances in Research in Karst Media*, Springer, pp. 329-335
- Marsaud, B. (1996) – *Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux*, Tese de doutoramento, BGRM, Paris, 268 p.
- Martin, J. B. e Dean, R. W. (2001) – Exchange of water between conduits and matrix in the Floridan Aquifer. *Chemical Geology*, 179, 1-4, pp. 145-165.
- Martins, J. M. F. (2007) – *Séries de meio marinho interno do Jurássico médio de Condeixa-Sicó-Alvaiázere: sedimentologia, micropaleontologia e correlação com o Maciço Calcário Estremenho*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Vols. I e II, Lisboa.
- Massei, N.; Mahler, B. J.; Bakalowicz, M.; Fournier, M. e DuPont, J. P. (2007) Quantitative interpretation of conductivity frequency distributions in karst. *Ground Water*, 45 (3), pp. 288-293.

- Mathevet, T. (2002) – *Analyse du fonctionnement du système karstique de Bange-L'eau-Morte* (Bauges, Savoie & Haute-Savoie, France), Paris, 59 p.
- Mathevet, T.; Lepiller, M. e Mangin, A. (2004) – Application of time series analysis to the hydrological functioning of an alpine karstic system: the case of Bang-L'Eau-Mort, *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6), pp. 1051-1064.
- Mendes, D. L. (2010) – *Recarga do aquífero de Querença-Silves. Aplicabilidade do Modelo SWAT a Bacias Hidrográficas sobre Aquíferos Cársicos*. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 91 p.
- Mohammadi, Z. e Field, M. (2009) – On the temporal behavior of karst aquifers, Zagros Region, Iran: a geostatistical approach, *Journal of Cave and Karst Studies*, 71 (3), pp. 210-226.
- Mohrlok, U. e Sauter, M. (1999) – Groundwater recharge and storage processes in karst aquifers. In: *XXVIII IAHR congress proceedings: Hydraulic engineering for sustainable water resources management at the turn of the millennium*, 28, pp. 1-37.
- Morales-Juberías, T.; Cruz-Sanjulian, J. J.; Zafra, P.; Olazar, M. e Arandes, J. M. (1996) – Etudes des réponses naturelles du système karstique d'Olaide (Pays Basque): Approche de la reconnaissance de sa structure interne, *Hydrogéologie*, 1, pp. 39-51.
- Mudarra, M. e 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, pp. 261-270.
- (2011) – Relative importance of the saturated and the unsaturated zones in the hydrogeological functioning of karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain), *Journal of Hydrology*, 397 (3), pp. 263-280.
- Mudarra, M.; Andreo, B. e Mudry, J. (2011) – TOC and NO₃⁻, two natural tracers of infiltration with different hydrochemical behaviour in karst aquifers, 9, *Proceedings of 9th conference on limestone hydrogeology*, Besançon, France.
- NE AEUA - Núcleo de Espeleologia da Associação de Estudantes da Universidade de Aveiro (1984) – *Espeleo-divulgação*, 3, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- (1985) – *Espeleo-divulgação*, 4, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- (1986) – *Espeleo-divulgação*, 5, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Ozyurt, N. e Bayari, C. (2008) – Temporal variation of chemical and isotopic signals in major discharges of an alpine karst aquifer in Turkey: implications with respect to response of karst aquifers to recharge, *Hydrogeology Journal*, 16, pp. 297-309.

437

- Padilla, A. e Pulido-Bosch, A. (1995) – Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis, *Journal of Hydrology*, 168 (73-79), pp. 73-89.
- (2008) – Simple procedure to simulate karstic aquifers, *Hydrological Processes*, 22 (12), pp. 1876-1884.
- Padilla, A.; Pulido-Bosch, A. e Mangin, A. (1994) – Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring, *Ground Water*, 32 (2), pp. 267-277.
- Paiva, I.; Ramos, C. e 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), *Revista Geonorte*, Edição Especial, Vol.3, n^o4, Manaus, pp. 350-364
- Palmer A. N. (2004) – Growth and modification of epikarst. In Jones, W. K., Culver, D. C. e Herman, J. S. (Eds.) – *Epikarst*. Proceedings of 'Epikarst Symposium', Special Publication, 9, Karst Waters Institute. Charles Town, West Virginia, pp. 56-61.
- Palmer, A. N.; Palmer, M. V. e Sasowsky, I. D. (1999) – *Karst modeling*, Charles Town, W.Va., Karst Waters Institute, Special Publication 5, 265 p.
- Pardo-Igúzquiza, E.; Durán-Valseo, J. J.; Dowd, P. A.; Guardiola-Albert, C.; Liñan-Baena, C. e Robledo-Ardila, P. A. (2012) – Estimation of spatio-temporal recharge of aquifers in mountainous karst terrains: Application to Sierra de las Nieves (Spain). *Journal of Hydrology*, 470-471, pp. 124-137.
- Panagopoulos, G. e 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, pp. 368-376.
- Peixinho de Cristo, F. (1997) – Águas subterrâneas no Baixo Mondego. *Seminário O Baixo Mondego*, Projecto Praxis XXI - 2/21/CTA/156/94, Universidade de Coimbra, pp. 105-123.
- Perrin, J. (2003) – *A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers*. Tese de doutoramento, Université de Neuchâtel, Suiça, 187 p.
- Perrin, J.; Jeannin, P.-Y. e Zwahlen, F. (2003) – Implications of the spatial variability of infiltration-water chemistry for the investigation of a karst aquifer: a field study at Milandre test site, Swiss Jura. *Hydrogeology Journal*, 11, pp. 673-686.
- (2003) – Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. *Journal of Hydrology*, 279 (1-4), pp. 106-124.

- Perrin, J.; Jeannin, P.-Y. e F. Cornaton (2007) – The role of tributary mixing in chemical variations at a karst spring, Milandre, Switzerland. *Journal of Hydrology* 332, 1-2, pp. 158-173.
- Petric, M. (2002) – *Characteristics of recharge – discharge relations in karst aquifer*, Karst Research Institute, Postojna, Slovenia.
- Pinault, J. L.; Plagnes, V.; Aquilina, L. e Bakalowicz, M. (2001) – Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: characterization of karst system functioning, *Water Resources Research*, 37, pp. 2191-2204.
- Plagnes, V. (1997) – Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la chimie des eaux. In *Géofluides Bassins Eau*, Université Montpellier II, Montpellier, 372 p.
- Portela, M. M. e Santos, J. F. (2006) – Estimaco de escoamentos superficiais mensais em Portugal continental baseada na evapotranspiraco potencial de Thornthwaite, *Recursos hídricos*, 27 (2), APRH, Lisboa.
- Pronk M.; Goldscheider, N. e Zopfi, J. (2006) – Dynamics and interaction of organic carbon, turbidity and bacteria in a karst aquifer system. *Hydrogeology Journal*, 14, pp. 473-484.
- Pulido-Bosch, A. (1987) – Aproximaciones metodológicas al estudio del funcionamiento hidrogeológico des karst, *Geolis*, vol. I, pp. 18-23.
- Pulido-Bosch, A.; de Marsily, G. e Benavente, J. (1987) – Análisis de la descarga del Torcal de Antequera mediante deconvolucin, *Hidrogeologia*, 2, pp. 17-28.
- Pulido-Bosh, A.; Padilla, A.; Dimitrov, D. e Machkova, M. (1995) – The discharge of some karst springs in Bulgaria studied by time series analysis, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 40 (4).
- Quintela, A. C. (1998) – *Hidrlica*. 6.ª edico, Fundaco Calouste Gulbenkian, Lisboa, 539 p.
- Raeisi, E. (2008) – Ground-water storage calculation in karst aquifers with alluvium or no-flow boundaries, *Journal of Cave and Karst Studies*, 70 (1), pp. 62-70.
- Raeisi, E. 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.
- Rahnemaei, M.; Zare, M., Nematollahi, A. R. e Sedghi, H. (2005) – Application of spectral analysis of daily water level and spring discharge hydrographs data comparing physical characteristics of karstic aquifers, *Journal of Hydrology*, 311, pp. 106-116.

439

- Ramos, M. C. M. (1994) – *Condioes geomorfológicas e climáticas das cheias da Ribeira de Tera e do Rio Maior*. Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa, 520 p.
- Rashed, K. (2012) – Assessing degree of karstification: a new method of classifying karst aquifers, *Sixteenth International Water Technology Conference, IWTC*, Istanbul, Turkey.
- Ravbar, N.; Engelhardt, I. e Goldscheider, N. (2011) – Anomalous behaviour of specific electrical conductivity at a karst spring induced by variable catchment boundaries: the case of the Podstenjek spring, Slovenia, *Hydrological Processes*, 25, pp. 2130-2140.
- Rebelo, M. P. (1987) – *Hidrogeologia da região de Condeixa-Sic*. Relatório de estágio, Universidade de Lisboa, 206 p.
- Rehrl, C. e Birk, S. (2010) – Hydrogeological Characterisation and Modelling of Spring Catchments in a Changing Environment, *Austrian Journal of Earth Sciences*, Vol. 103 (2), Viena, pp. 106-117.
- Reis, E. J. M. (2006) – *As bacias hidrográficas das ribeiras da Serra de Grândola. Dinâmica hidrologica e factores condicionantes*. Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa, 736 p.
- Renner, S. e Sauter, M. (1997) – Heat as a natural tracer: Characterisation of a conduit network in a karst aquifer using temperature measurements of the spring water. In Gunay, G. & Johnson, I. (Eds.) – *Karst Waters & Environmental Impacts*, Balkema, pp. 423-431.
- Ribeiro, A., Antunes, M.; Ferreira, M.; Rocha, R.; Soares, A.; Zbyszewski, G.; Moitinho de Almeida, F.; Carvalho, D. e Monteiro, J. (1979) – *Introduction à la Geologie Generale du Portugal*, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 114 p.
- Ribeiro, O. et al. (1999) – *Geografia de Portugal, Vol. II: O ritmo climático e a paisagem*, 4.ª edico, Edioes João S da Costa, Lisboa, 623 p.
- Ryan, M. e Meiman, J. (1996) – An examination of short-term variations in water quality at a karst spring in Kentucky. *Ground Water*, 34 (1), pp. 23-30.
- Salomon, J.-N. (2006) – *Précis de karstologie*, Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux, 289 p.
- Robledo, P. A. e Durán, J. J. (2006) – Aplicación del análisis fractal a la distribución temporal de caudales en manantiales kársticos de macizos carbonáticos del sur de España, Andalucía. In Durán, J. J., Andreo, B. e Carrasco, F. (Eds.) – *Karst, cambio climático y aguas subterrneas*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de Espaa. Seria: Hidrogeologia y Aguas Subterrâneas, 18, Madrid, pp. 125-134.

- Rodrigues, M. L. E. (1998) – *Evolução geomorfológica quaternária e dinâmica actual. Aplicações ao ordenamento do território – exemplos no Maciço Calcário Estremenho*. Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, 862 p.
- Samani, N. (2001) – Response of karst aquifers to rainfall and evaporation, Maharlou, Iran, *Journal of Cave and Karst Studies*, 61(1), pp. 33-40.
- Samper, J. (1998) – Evaluation of recharge from rainfall using water balances: utilization, calibration and uncertainties (in Spanish). *Boletín Geológico y Minero*, 109, pp. 347-370.
- Santos, F. D. e Miranda, P. (Eds.) (2006) – *Alterações climáticas em Portugal. Cenários, impactos e medidas de adaptação – Projecto SIAM II*. Gradiva, Lisboa, 505 p.
- Santos, P. M. P. (2009) – *Cartografia de áreas inundáveis a partir do método de reconstrução hidrogeomorfológica e do método hidrológico-hidráulico. Estudo comparativo na bacia hidrográfica do rio Arunca*. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, 145 p.
- 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.
- Scanlon, B R; Healy, RW e Cook, PG (2002) - Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10: 18-39
- Screaton, E.; Martin, J. B.; Ginn, B. e Smith, L. (2004) – Conduit properties and karstification in the unconfined Floridan Aquifer. *Ground Water*, 42, 3, pp. 338-346.
- Shaw, E. (1988) – *Hydrology in practice*, Van Nostrand Reinhold (International), London.
- Sheffer, N. A.; Cohen, M.; Morin, E.; Grodek, T.; Gimburg, A.; Magal, E.; Gvirtzman, H.; Nied, M.; Isele, D. e Frumkin, A. (2011) – Integrated cave drip monitoring for epikarst recharge estimation in a dry Mediterranean area, Sif Cave, Israel, *Hydrological Processes*, 25, 18, pp. 2837-2845.
- Smart, P. L. e Hobbs, S. L. (1986) – Characterization of carbonate aquifers: a conceptual base. In: Graves, B. J.; Lehr, J. H.; Butcher, K. e Crawford, N. C. (Eds.) – *Proceedings of the Environmental Problems in Karst Terranes and their Solutions Conference*. Kentucky, pp. 1-14.
- Soares, A. F. (2001) – Reflexões sobre os tempos de carsificação dos Maciços Calcários de Sicó, Alvaíazere e Estremenho. In *Livro de Homenagem ao Professor Doutor Gaspar Soares de Carvalho*, Braga, pp. 103-128.

441

- Soares, A. F. (2008) – Um fragmento curioso. A Serra de Sicó. *Cadernos de Geografia*, 26/27, Coimbra, pp. 19-24
- Soulios, G. (1991) – Contribution a l'étude des courbes de recession des sources karstiques: exemples du pays hellénique, *Journal of Hydrology*, 124, pp. 29-42.
- Tallaksen, L. M. (1995) – A review of baseflow recession analysis, *Journal of Hydrology*, 165, pp. 349-370.
- Taylor, C. J. e Greene, E. A. (2001) – Quantitative Approaches in characterizing Karst Aquifers, In Kuniandy, E. L. (Ed.) – *Water-Resources Investigations Report 01-4011*, U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, pp. 164-166.
- (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, pp. 75-114.
- Teixeira, C. e Zbyszewski, G. (1968) – *Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal (1:50 000), folha 23-C (Leiria)*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 99 p.
- Teutsch, G. (1993) – An extended double-porosity concept as a practical modelling approach for a karstified terrain, in *Hydrogeological Processes in Karst Terranes* (Proceedings of the Antalya Symposium and Field Seminar, October 1990), IAHS, 207, 281 p.
- Teutsch G. e Sauter, M. (1991) – Groundwater modeling in karst terranes – Scale effects, data acquisition, and field verification, *Proceedings of the Third Conference on Hydrogeology, Ecology, Monitoring, and Management of Ground Water in Karst Terranes*, Nashville, Tennessee, December 4-6, National Ground Water Association, pp. 17-54.
- Thornthwaite, C. W. (1948) – An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38 (1), pp. 55-94.
- Toran, L.; Tancredi, J.H.; Herman, E.K. e White, W.B. (2006) – Conductivity and sediment variation during storms as evidence of pathways to karst springs. In Harmon, R.S. e Wicks, C. (Eds.) – *Perspectives on karst geomorphology, hydrology, and geochemistry – A tribute volume to Derek C. Ford and William B. White*, Special Paper 404, Geological Society of America, pp. 169–176.
- Troek, B. (2003) – *Epikarst zone and the karst aquifer behavior: a case study of the Hubelj catchment, Slovenia*. Geological Survey of Slovenia, Ljubljana, 100 p.
- (2007) – How can the epikarst zone influence the karst aquifer hydraulic behaviour?, *Environmental Geology*, 51, pp. 761-765.

- (2008) – Flow and solute transport monitoring in the karst aquifer in SW Slovenia, *Environmental Geology*, 55, pp. 269-276.
- Trcek, B. e Krothe, N. C. (2002) – The role of the epikarst zone in karst aquifer recharge processes, *Geologija*, 45, 2, pp. 579-584.
- Tritz, S.; Guinot, V. e Jourde, H. (2011) – Modelling the behaviour of a karst system catchment using non-linear hysteretic conceptual model, *Journal of Hydrology*, 397, pp. 250-262.
- Velho, J. A. G. L. (1989) – *Hidrogeologia do Anticlinal de Verride*. Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 163 p.
- Ventura, J. E. S. (1994) – *As precipitações no Sul de Portugal (ritmo e distribuição espacial)*. Tese de doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 438 p.
- Vias, J.M.; Andreo, B.; Perles, J.M.; Carrasco, F. e Vadillo, I. (2006) – Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method: application in two pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 14 (6), pp. 912–925.
- Vieira, A. e Cunha, L. (2006) – Património geomorfológico: de conceito a projecto. O Maciço de Sicó. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Vol. 3, pp. 147-153.
- Villarroel, J. L. e Cuchi, J. A. (2004) – Estudio cualitativo de la respuesta, de mayo 2002 a abril 2003, del manantial kárstico de Fuenmayor (San Julián de Banzo, Huesca) a la lluvia y a la temperatura atmosférica. *Boletín Geológico y Minero*, 115 (2), pp. 237-246.
- Williams, P. W. (2004) – The epikarst: evolution of understanding. In Jones, W. K.; Culver, D. C. e Herman, J. S. (Eds.) – *Epikarst*. Proceedings of 'Epikarst Symposium', Special Publication, 9, Karst Waters Institute. Charles Town. West Virginia, pp. 11-15.
- Williams, P. (2008) – The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review, *International Journal of Speleology*, 37 (1), pp. 1-10.
- White, W. (1988) – *Geomorphology and hydrology of karst terrains*, Oxford University Press, Nova Iorque, 464 p.
- (1993) – Analysis of karst aquifers. In Alley, W. M. (Ed.) – *Regional ground-water quality*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 471-489.
- (1999) – Groundwater flow in karstic aquifers. In Delleur, J. W. (Ed.) – *The Handbook of Groundwater Engineering*, CRC Press, 36 p.
- (2002) – Karst hydrology: recent developments and open questions, *Engineering Geology*, 65, pp. 85-105.

443

- (2007) – A brief history of karst hydrogeology: contributions of the NSS, *Journal of Cave and Karst Studies*, 69 (1), pp. 13-26.
- White, W. e White, E. (2005) – Ground water flux distribution between matrix, fractures and conduits: constraints on modeling, *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 3 (2), pp. 1-6.
- Wong, C. I.; Mahler, B. J.; Musgrove, M. e Banner, J. L. (2012) – Changes in sources and storage in a karst aquifer during a transition from drought to wet conditions, *Journal of Hydrology*, 468-469, pp. 159-172.
- Worthington, S. R. H. (1999) – A comprehensive strategy for understanding flow in carbonate aquifers. *Karst Waters Institute Special Publication*, vol. 5, pp. 30-37.
- Worthington, S. R. H. e Ford, D. (2009) – Self-Organized Permeability in Carbonate Aquifers, *Ground Water*, 47 (3), pp. 326-336.

Fontes cartográficas

- Instituto Geográfico do Exército (2002) – *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 240 (Montemor-o-Velho)*, Série M888. Lisboa.
- *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 249 (Marinha das Ondas – Figueira da Foz)*. Série M888. Lisboa.
- *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 250 (Soure)*. Série M888. Lisboa.
- *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 251 (Condeixa-a-Nova)*. Série M888. Lisboa.
- *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 262 (Redinha – Pombal)*. Série M888. Lisboa.
- *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 263 (Espinhal – Penela)*. Série M888. Lisboa.
- *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 273 (Monte Redondo – Leiria)*. Série M888. Lisboa.
- *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 274 (Pombal)*. Série M888. Lisboa.
- *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 275 (Ansião)*, Série M888. Lisboa.
- *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 285 (Marrazes – Leiria)*. Série M888, Ed.3, Lisboa.
- *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 286 (Albergaria-dos-Doze – Pombal)*. Série M888. Lisboa.
- *Carta Militar de Portugal (1:25 000), folha 287 (Alvaiázere)*. Série M888. Lisboa.

Serviços Geológicos de Portugal (1966) – *Carta Geológica de Portugal (1:50 000), folha 23-C (Leiria)*. Lisboa.

— (1974) – *Carta Geológica de Portugal (1:50 000), folha 23-A (Pombal)*. Lisboa.

— (1976) – *Carta Geológica de Portugal (1:50 000), folha 19-C (Figueira da Foz)*. Lisboa.

— (1992) – *Carta Geológica de Portugal (1:500 000)*. Lisboa.

Cartografia digital

Agência Portuguesa do Ambiente – *Atlas do Ambiente* (consultada em 2014).

Direção Geral do Território – *Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal Continental para 2007 – COS2007*, Portugal (consultada em 2014).

Direção Geral do Território – *Corine Land Cover 2006, Portugal* (consultada em 2014).

Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (consultada em 2014).