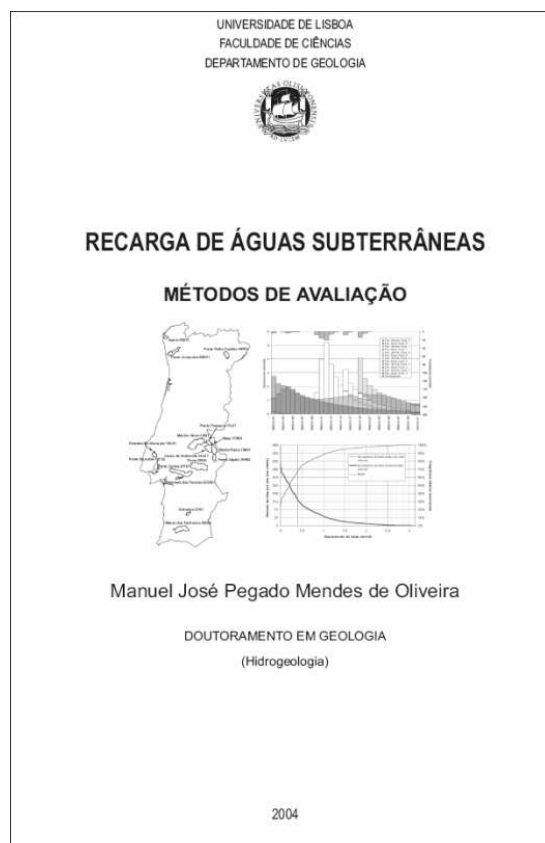


1. Preâmbulo

Este volume reproduz com alterações a Tese que foi defendida em 2 de Dezembro de 2004 a partir das 15h30 na Reitoria da Universidade de Lisboa. Fizeram parte do júri, os Professores Doutores Manuel Augusto Marques da Silva, da Universidade de Aveiro, José Virgílio de Matos Figueira Cruz, da Universidade dos Açores, João Paulo Cárcamo Lobo Ferreira, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Carlos Alberto Costa Almeida, Manuel Oliveira da Silva e João Lopo Mendonça da Universidade de Lisboa, e Luísa Abrantes, Presidente do Conselho Científico da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

A Tese foi orientada pelo Professor Doutor Carlos Alberto da Costa Almeida, do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, tendo sido elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, no âmbito do Plano de Investigação Programada do LNEC para 2001-2004, relativo ao PIP 12031: "Calibração de métodos de avaliação da recarga regional de aquíferos, ensaios de laboratório e modelação matemática da infiltração e do escoamento, na zona vadosa e na zona saturada", sob orientação do Investigador-Coordenador Doutor João Paulo de Cárcamo Lobo Ferreira.

As alterações introduzidas neste volume resultam de uma nova leitura da Tese, por parte do autor, e da discussão havida durante as Provas de Doutoramento, tendo-se integrado comentários do júri.



*Reprodução da
capa da Tese.*

2. Objectivos

Nesta Tese pretendeu-se desenvolver, caracterizar, e testar diversas metodologias para o cálculo da recarga de águas subterrâneas, comparando entre si, sempre que possível, os resultados por elas fornecidos. As referidas metodologias foram aplicadas, com dados reais, mas não se pretendeu com essa aplicação chegar a resultados definitivos, médios, desvios padrão, anos secos, etc., caracterizadores da recarga de uma determinada área. As aplicações visaram fundamentalmente testar os métodos.

Objectivos explícitos:

- 1 – apresentar um modelo global que permita deduzir todos os modelos de cálculo da recarga;
- 2 – apresentar diferentes modelos e caracterizar diferentes métodos que permitam o cálculo da recarga;
- 3 – criar novos métodos ou aprofundar os métodos de cálculo da recarga;
- 4 – demonstrar a aplicabilidade desses métodos com dados de casos de estudo reais;
- 5 – validar os resultados obtidos pela aplicação desses métodos;
- 6 – definir os modelos e os métodos mais adequados em função das configurações hidrogeológicas existentes.

3. Síntese

Definiu-se **recarga de águas subterrâneas** como a **quantidade de água que se acrescenta à zona saturada de água subterrânea**. Esta recarga vai provocar o aumento do armazenamento de água da zona saturada.

Nesta Tese "**Recarga de Águas Subterrâneas Métodos de Avaliação**" criaram-se novos métodos, caracterizaram-se métodos existentes, e testaram-se diversas metodologias para o cálculo da recarga de águas subterrâneas, comparando entre si, sempre que possível, os resultados por elas fornecidos.

Para desenvolver os modelos de recarga considerou-se uma secção do ciclo hidrológico que funciona como um **volume de controlo** (Fig. 1) onde se definem todas as formas de entrada e de saída de massa bem como do seu armazenamento.

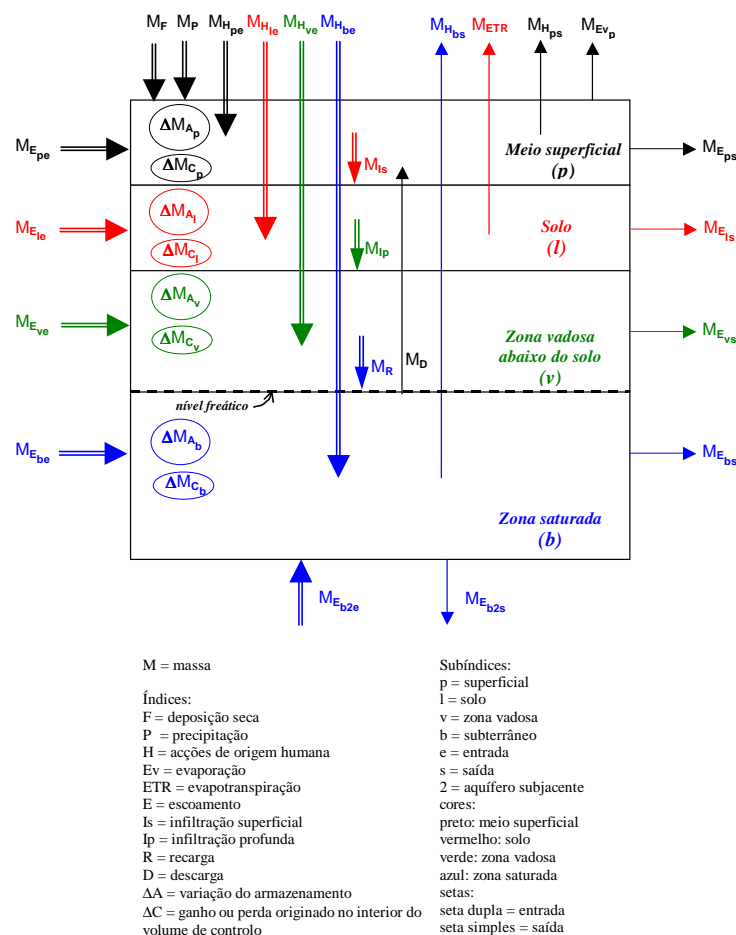


Fig. 1 - Variáveis presentes no balanço de massa do volume de controlo

Para esse volume de controlo escreveu-se a equação de conservação de massa e a seguinte equação de balanço hídrico:

$$P + E_{pe} + E_{le} + E_{ve} + E_{be} + E_{b2e} + H_{pe} + H_{le} + H_{ve} + H_{be} - ETR - E_{vp} - E_{ps} - E_{ls} - E_{vs} - E_{bs} - E_{b2s} - H_{ps} - H_{bs} - \Delta A_p - \Delta A_l - \Delta A_v - \Delta A_b = 0$$

sendo P a precipitação, E_{pe} o escoamento superficial de entrada, E_{le} o escoamento lateral de entrada no solo, E_{ve} o escoamento lateral de entrada através da zona vadosa, E_{be} o escoamento subterrâneo lateral de entrada, E_{b2e} o escoamento subterrâneo proveniente de uma formação subjacente, H_{pe} a água introduzida por acção humana no meio hídrico superficial, H_{le} a água introduzida por acção humana no solo (água de rega), H_{ve} a água introduzida por acção humana na zona vadosa, H_{be} a água introduzida por acção humana na zona saturada, correspondendo à recarga artificial dos aquíferos, ETR a evapotranspiração de água existente no solo, E_{vp} a evaporação dos corpos hídricos do meio superficial, E_{ps} o escoamento superficial de saída, E_{ls} o escoamento lateral de saída do solo, E_{vs} o escoamento lateral de saída através da zona vadosa, E_{bs} o escoamento subterrâneo lateral de saída, E_{b2s} o escoamento subterrâneo para uma formação subjacente, H_{ps} a captação de água do meio hídrico superficial por acção humana, H_{bs} a extracção das águas subterrâneas, ΔA_p a variação do armazenamento de água no meio superficial, ΔA_l a variação do armazenamento de água no solo, ΔA_v a variação do armazenamento de água na zona vadosa abaixo do solo, ΔA_b a variação do armazenamento de água na zona saturada.

Nesta equação não se considerou o processo de recarga, que ocorre dentro do volume de controlo. Para se poder considerar o processo de recarga, definiram-se dois volumes de controlo, um entre a zona de precipitação e a fronteira de recarga, e outro entre a fronteira da recarga e a base da zona saturada. Para cada um desses volumes de controlo escreveram-se as equações de balanço hídrico que consideram o processo de recarga:

- Volume de controlo acima da fronteira onde se define a recarga (R) - Fig. 2:

$$R = P + E_{pe} + E_{le} + E_{ve} + H_{ve} + H_{pe} + H_{le} + D - E_{vp} - E_{ps} - E_{ls} - E_{vs} - H_{ps} - ETR - \Delta A_p - \Delta A_l - \Delta A_v$$

- Volume de controlo abaixo da fronteira onde se define a recarga - Fig. 3:

$$R = E_{bs} + E_{b2s} + H_{bs} + D + \Delta A_b - E_{be} - E_{b2e} - H_{be}$$

Estas equações servem de base aos modelos que se desenvolveram para o cálculo da recarga. Consoante as características dos processos que fazem parte destas equações, há situações para as quais os seus valores são baixos ou desprezáveis, ou em que se cancelam mutuamente. Assim dependendo das características do meio hidrogeológico e da sua utilização, da sua extensão, do meio sobrejacente e da sua utilização e do intervalo de tempo considerado, é possível fazer simplificações nas referidas equações que levem à eliminação de alguns dos termos. Nesse caso é possível definir **modelos de recarga** baseados na caracterização de menos processos do que os apresentados nas equações anteriores e, muitas vezes, de apenas um parâmetro. Os modelos apresentados são (1) balanço hídrico acima da base do solo; (2) armazenamento da zona vadosa; (3) variação do armazenamento da zona saturada; (4) escoamento subterrâneo; (5) descarga das águas subterrâneas

para o meio hídrico superficial; (6) escoamento subterrâneo + variação do armazenamento da zona saturada; (7) descarga + variação do armazenamento da zona saturada; (8) os mesmos modelos considerando as intervenções humanas; (9) outros modelos, considerando por exemplo a posição do nível freático; (10) modelos de balanço de massa.

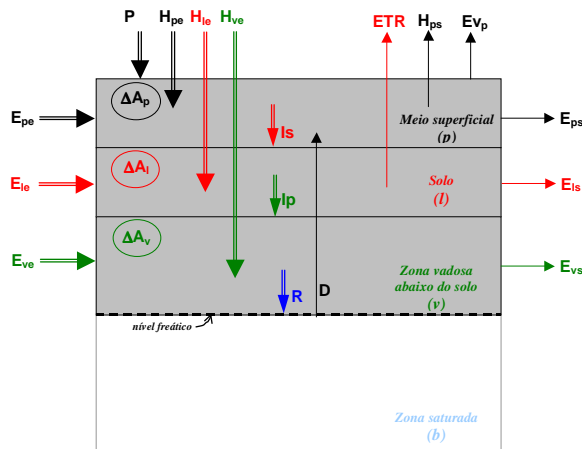


Fig. 2 - Recarga tomando o volume de controle acima da zona saturada

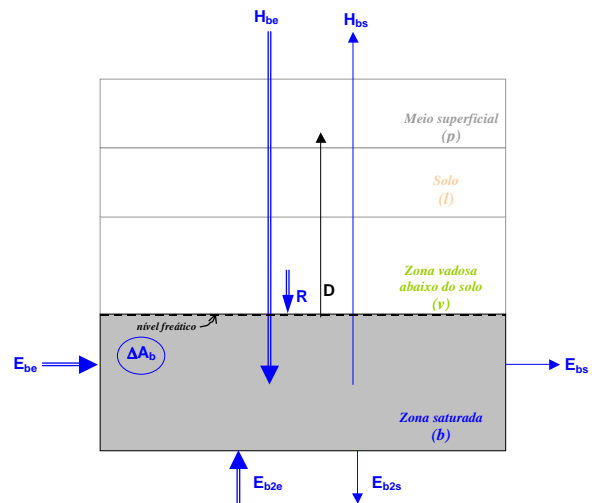


Fig. 3 - Recarga tomando o volume de controle abaixo da zona saturada

Para resolver estes modelos é necessário quantificar cada um dos **processos das equações de balanço**. Assim, para cada um dos processos intervenientes, fez-se a descrição dos processos e onde são referidos um ou mais métodos de cálculo já existentes. Os processos considerados são: precipitação (P); armazenamento do meio superficial (A_p); evaporação (E_{vp}); infiltração superficial (I_s); escoamento superficial (E_p); armazenamento no solo (A_l); evapotranspiração (ETR ou ET); escoamento lateral do solo (E_l); infiltração profunda (I_p); armazenamento de água na zona vadosa abaixo do solo (A_v); escoamento lateral da zona vadosa (E_v); armazenamento da zona saturada (A_b); escoamento lateral na zona saturada (E_b); descarga (D); factores humanos (H). No caso dos modelos de balanço de massa, é necessário determinar as concentrações de soluto na água envolvida nesses processos. Esta descrição foi essencialmente uma revisão dos métodos de cálculo referidos na Bibliografia.

Para além desta revisão foram desenvolvidas outras formas de cálculo de alguns dos processos do balanço hídrico que foram incluídas num modelo de balanço hídrico sequencial diário, que se designou de **BALSEQ_MOD**, e quase todas elas num **programa de computador** com o mesmo nome.

Criaram-se e integraram-se no programa de computador os seguintes procedimentos: (1) forma de calcular I_s utilizando informação relacionada com a porosidade do solo; (2) forma de calcular o escoamento directo (Ed) permitindo que o número característico de escoamento varie em função do teor de humidade no solo; (3) forma de calcular ETR utilizando a evapotranspiração de referência e o coeficiente cultural dual, com possibilidade de numa área existirem até dois tipos vegetais mais o terreno descoberto; (4) forma de calcular A_l e a I_p considerando a espessura do solo e a fracção de

terreno descoberto variáveis com o desenvolvimento do coberto vegetal; (5) possibilidade de considerar a posição do nível freático dentro ou fora da espessura de *solo* sujeita a ET.

Os desenvolvimentos realizados para a caracterização de parâmetros mas que não foram integrados num programa de computador foram: (1) forma de calcular a evaporação a partir da superfície das plantas; (2) forma de calcular a I_p em dois tipos de meios (arenoso e arenoso franco), com base nos resultados da modelação do escoamento na zona vadosa.

Dos desenvolvimentos referidos, destacam-se alguns. A utilização do **coeficiente cultural dual para o cálculo da ET** (Fig. 4) porque introduz um procedimento novo, pelo menos em Portugal, para o cálculo da ET nos modelos de balanço hídrico sequencial diário para o cálculo da recarga e porque se ajusta bem ao tipo de informação existente de ocupação do *solo*. [Esta metodologia é utilizada em agronomia para os balanços do *solo* tendo em vista a definição das necessidades de rega].

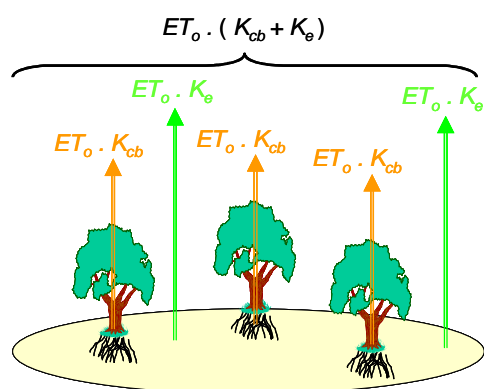


Fig. 4 – Coeficiente cultural dual no cálculo da evapotranspiração

A possibilidade de **consideração da posição do nível freático** (nf) dentro ou fora da espessura de *solo* sujeita a ET é um desenvolvimento muito interessante, e surgiu já na fase final da realização desta Tese quando se procurou estimar a recarga para o caso de estudo de **Estarreja**. Nesta situação os registos de nf mostravam que nalguns períodos do ano este se encontrava à superfície ou muito próximo (Fig. 5). Qualquer dos modelos de balanço hídrico desenvolvidos anteriormente obrigavam a que o nf se encontrasse sempre abaixo da espessura do *solo* sujeita a ET. Ou seja, não eram aplicáveis a esta situação. Desenvolveu-se por isso um novo modelo que considera a posição do nf no espaço e no tempo. Este modelo utiliza os registos de profundidade ao nf para calcular a ET, considerando que a água evapotranspirada provém da zona saturada quando as raízes das plantas alcançam o nf .

Um terceiro desenvolvimento consistiu em calcular I_p a partir do conhecimento de P , A_i , material do *solo* e espessura de *solo* sujeita a ET. Esse cálculo foi feito pela **modelação do escoamento na zona vadosa** utilizando o modelo Vs2dt. Apresentaram-se relações de I_p em função das variáveis referidas para as classes texturais dos *solos* arenoso e arenoso franco (exemplo na Fig. 6).

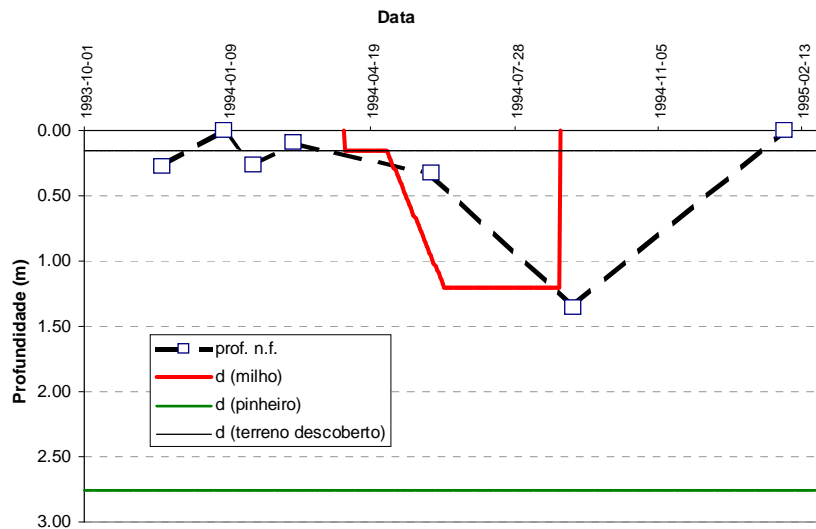


Fig. 5 – Comparação da profundidade ao nível freático, registada no furo 7 nos dias assinalados com □ e interpolada para os restantes dias, com as espessuras de *solo* sujeitas a evaporação para a ocupação do solo C11, caracterizada pela cultura de milho, pela floresta de pinheiro e por terreno descoberto (área de estudo de Estarreja).

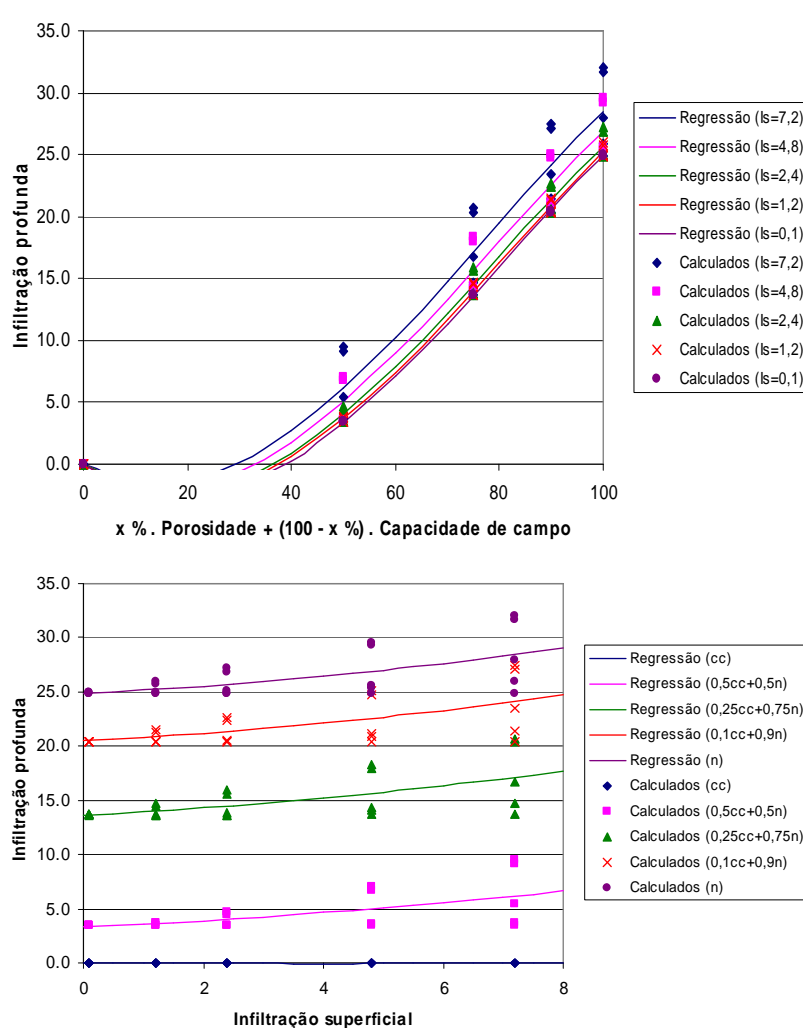


Fig. 6 – Ajuste de uma superfície polinomial de grau 3 aos valores de infiltração profunda calculada ao fim de 24 h à profundidade de 130 cm em função do teor de humidade inicial e da infiltração superficial (*solo* arenoso).

Além dos desenvolvimentos referidos, concebeu-se uma metodologia para fazer a **decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial** (Fig. 7), tendo em vista a determinação do escoamento de base dos cursos de água, isto é, da descarga da zona saturada, que corresponde, em determinadas circunstâncias, à recarga que ocorreu anteriormente na bacia a montante da secção de determinação do hidrograma (essas circunstâncias correspondem ao modelo de descarga referido anteriormente). Esta metodologia foi implementada no **programa de computador Dechidr_VB** que foi corrido para **16 bacias hidrográficas** com registos hidrométricos diários (Fig. 8).

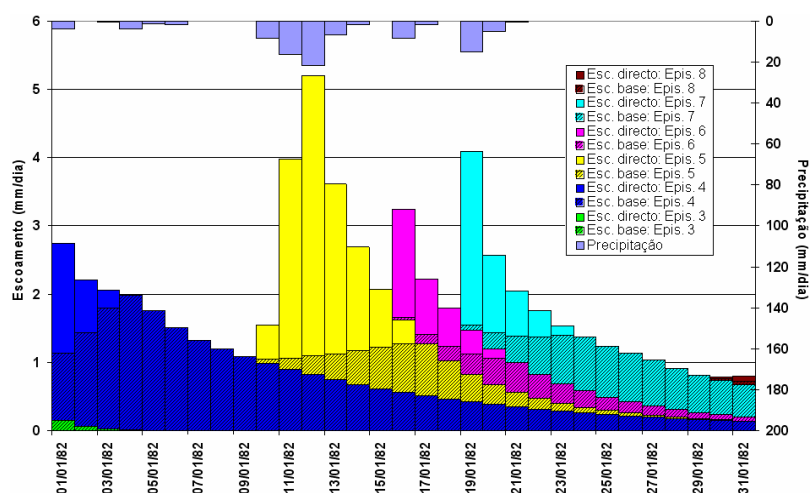


Fig. 7 – Decomposição por episódios do escoamento registado na estação hidrométrica de Ponte de Panasco em Janeiro de 1982.

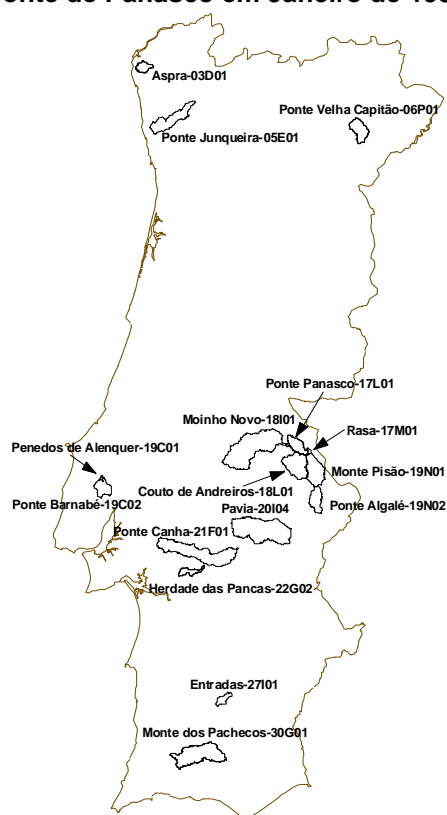


Fig. 8 – Localização das bacias hidrográficas estudadas pelo método da decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial

Alguns dos métodos utilizados para o cálculo dos termos do balanço hídrico requerem a caracterização de parâmetros do meio. Esta caracterização pode ser feita mediante medições locais no terreno, ou pode ser estimada a partir de cartografia de base, por exemplo cartas de solos ou de ocupação de solo. Os parâmetros enumerados a seguir foram estimados a partir da descrição da informação representada na cartografia de base, apresentando-se **tabelas de relacionamento** entre as entidades representadas na cartografia e os valores dos parâmetros: número característico de escoamento, tipo de *solo*, horizonte superior do *solo*, profundidade das raízes das plantas, parâmetros necessários à caracterização da evapotranspiração real utilizando a metodologia do coeficiente cultural dual, capacidade de campo, ponto de emurchecimento, porosidade e condutividade hidráulica vertical saturada.

Com esta informação e com a cartografia correspondente em sistema de informação geográfica, é possível fazer aplicações dos modelos de estimativa de recarga e calcular a distribuição espacial da recarga de uma forma (quase) automática.

Nesse sentido, apresentaram-se vários processos de fazer a **caracterização da precipitação** no espaço, utilizando a técnica dos polígonos de Thiessen e através da criação de novos polígonos de Thiessen, com base em postos udométricos virtuais. Tendo em vista a caracterização da precipitação no caso de estudo dos **sistemas aquíferos de Quarteira e de Albufeira-Ribeira de Quarteira**, onde existe uma direcção bem marcada de variação da precipitação na direcção perpendicular à da linha de costa, esta técnica dos polígonos de Thiessen foi aplicada num espaço transformado de acordo com essa direcção de variação da precipitação, o que resultou, após conversão para o espaço normal, numa melhor caracterização da precipitação na área em estudo (Fig. 9).

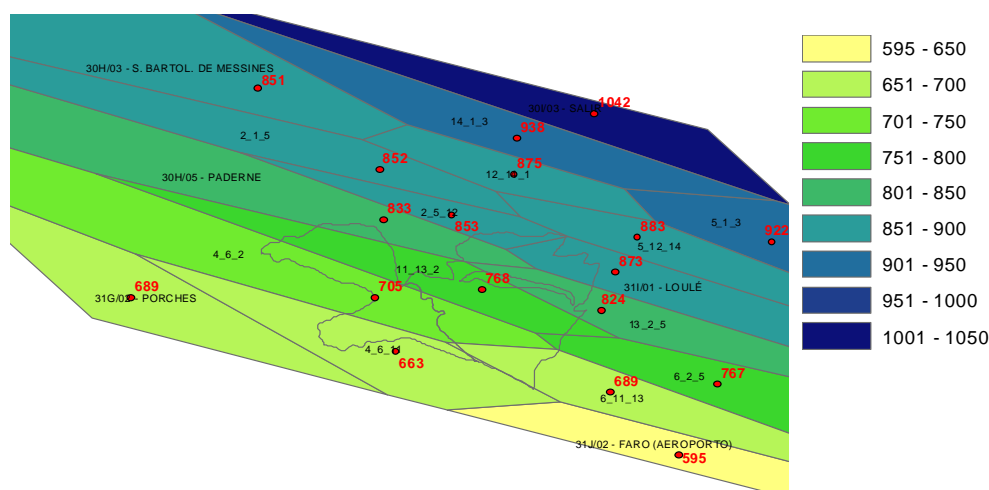


Fig. 9 – Precipitação anual média para o período de 1995/10/01 até 1999/09/30 na área de ocorrência dos sistemas aquíferos de Quarteira e de Albufeira-Ribeira de Quarteira, calculada utilizando polígonos de Thiessen, desenhados num sistema de coordenadas transformado, a partir dos postos udométricos e de postos virtuais de primeira e segunda geração.

Fez-se a apresentação de um método de cálculo da recarga anual, utilizando como informação de base a precipitação anual, o número característico de escoamento e a quantidade máxima de água disponível para evapotranspiração. Este método pode ser aplicado localmente ou, no caso destas variáveis estarem distribuídas no espaço, pode ser aplicado para calcular e mapear a recarga no espaço.

Verificou-se que a forma como os parâmetros derivados da ocupação do solo são considerados no modelo condiciona os valores finais de recarga. Por exemplo, numa área caracterizada por dois tipos de ocupação vegetal diferentes, se se utilizar a média das profundidades das raízes dos dois tipos de ocupação, os valores finais de recarga são diferentes daqueles que se obtêm se se considerar isoladamente cada um dos tipos de ocupação vegetal.

Foi apresentada uma metodologia para estimar os valores de recarga anual numa área de estudo, para o caso em que se pode assumir que a precipitação e a evapotranspiração potencial são constantes em toda a área, através da interpolação/extrapolação de valores de recarga estimados pelas corridas dos modelos de balanço hídrico sequencial diário para parâmetros fixos.

Ao longo desta Síntese foram referidas algumas **aplicações** a casos de estudo, feitas nesta Tese, das metodologias de cálculo da recarga. Estas aplicações permitem inferir acerca das potencialidades e limitações de cada um dos métodos. Basicamente estudaram-se quatro situações:

(1) área dos **sistemas aquíferos de Quarteira e de Albufeira-Ribeira de Quarteira** onde se utilizaram dois métodos de balanço hídrico sequencial diário acima do limite inferior do *solo* (zona sujeita a evapotranspiração), um utilizando o coeficiente cultural dual e a sua variabilidade ao longo do tempo, outro considerando um coeficiente cultural simples e constante; ambas as aplicações consideram a variabilidade da ocupação do solo e dos *solos*. O primeiro método considera o ciclo vegetativo das plantas (através do coeficiente cultural variável) ao contrário do segundo método que considera um coeficiente cultural constante. Por esse motivo, os dois métodos produziram estimativas de recarga diferentes. Estando o modelo conceptual do primeiro método mais próximo da realidade, aceita-se que este produz resultados mais correctos (Fig. 10);

(2) áreas de **16 bacias hidrográficas** onde se aplicou o método da decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial (exemplo dos resultados na bacia hidrográfica de Ponte de Panasco na Fig. 11) e se testaram opções diferentes de corrida do programa. Aos valores obtidos para as treze bacias hidrográficas que se desenvolvem total ou parcialmente em formações do Maciço Antigo fez-se o ajustamento de uma recta de **regressão linear** (Fig. 12), de equação

$$Eb = 0,5210 * P - 284 = 0,5210 * (P - 546) \quad (\text{mm/a})$$

que se propõe para a estimativa da recarga anual média de formações geológicas do Maciço Antigo afins de granitos e de xistos. O coeficiente de correlação (r) é de 0,989, influenciado pela presença de duas bacias com precipitação muito mais elevada que as restantes. Os desvios em relação aos valores

calculados para as bacias hidrográficas variam entre -44 mm/a e $+77$ mm/a, com média dos desvios absolutos de 24 mm/a.

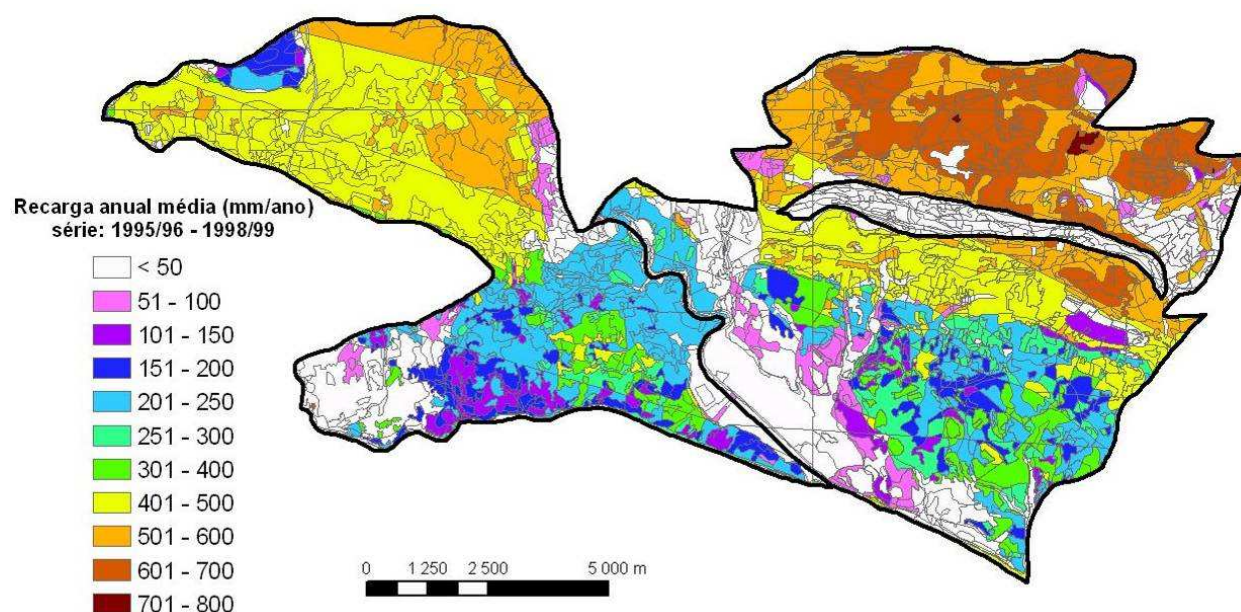


Fig. 10 - Recarga calculada para a área de estudo utilizando o Modelo BALSEQ_MOD

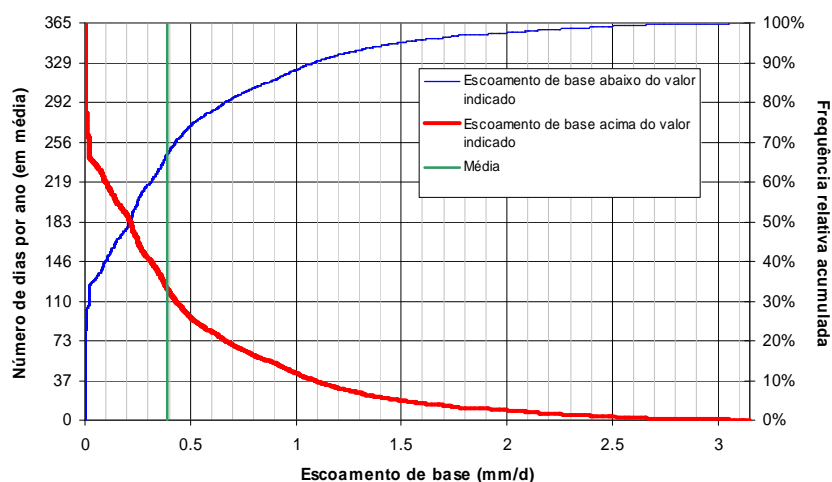


Fig. 11 – Frequências relativas acumuladas dos escoamentos de base calculados para a estação hidrométrica de Ponte de Panasco (período de 10/1981 até 09/1990)

Apresentou-se também uma recta de regressão do escoamento de base sobre a precipitação para o caso em que há uma redução da precipitação anual média em 20 %. Os valores utilizados foram os escoamentos de base estimados em cada bacia hidrográfica para o caso em que a precipitação é 80 % da precipitação anual média da bacia. Neste caso, estima-se a seguinte relação entre o escoamento de base e a precipitação ($r = 0,994$):

$$Eb = 0,4817 * P - 223 = 0,4817 * (P - 463) \text{ (mm/a)}$$

Este valor serve para estimar a recarga anual média nas formações geológicas do Maciço Antigo referidas, no caso de haver uma redução da precipitação anual média para 80 % do valor actual;

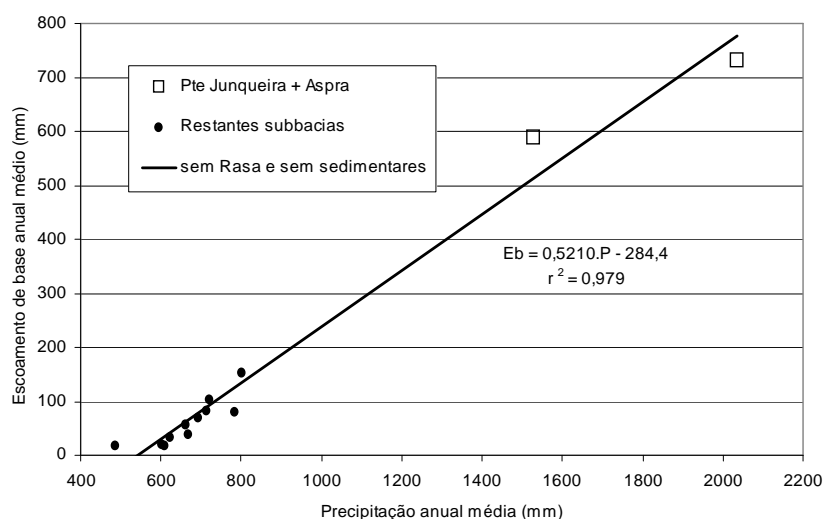


Fig. 12 – Regressões lineares do escoamento base anual médio sobre a precipitação anual média

(3) área da **bacia hidrográfica a montante da estação hidrométrica 17L01 - Ponte de Panasco**; para esta área calcularam-se os parâmetros do meio que constituem a informação de base para se fazer corridas de um modelo de balanço hídrico sequencial diário (BALSEQ) acima do limite inferior do *solo*, utilizando várias opções de cálculo do escoamento directo. Os resultados destas corridas foram comparados com os resultados obtidos pelo método da decomposição dos hidrogramas de escoamento (DECHIDR), utilizando as equivalências representadas na Fig. 13. Este estudo permitiu comparar os valores de escoamento directo, evapotranspiração real e recarga obtidos pelas duas metodologias. Verificou-se uma razoável diferença entre os valores obtidos (Fig. 14), apontando-se dois aspectos principais que podem originar as diferenças observadas: (A) no modelo de balanço hídrico sequencial diário não se consideram os caminhos preferenciais, que fazem com que a água chegue à zona saturada sem passar pelo processo de escoamento através do *solo* contemplado por estes modelos; (B) ter-se utilizado séries de precipitação e de evapotranspiração potencial médias no MBHSD, e apenas um valor para cada parâmetro do meio, que pretende traduzir a situação média da bacia; este aspecto seria ultrapassável se se fizesse um modelo distribuído, que considerasse diferentes subáreas em função do *solo* e ocupação do solo, e para cada uma utilizasse um parâmetro do meio diferente;

(4) área de estudo em **Estarreja**; aplicaram-se quatro métodos diferentes de cálculo da recarga: o método de balanço hídrico abaixo da superfície freática (MBASF), o método de balanço hídrico sequencial diário acima do limite inferior do *solo* (MBHSD), e para cada um deles, considerando ou não a posição do nf dentro da espessura de *solo* sujeita a evapotranspiração. As diferenças observadas entre os resultados obtidos pela aplicação dos vários métodos são elevadas (Quadro 1) e podem justificar-se pela qualidade da informação utilizada, principalmente nos MBASF, o que reflecte, por seu lado, a maior dificuldade em aplicar este método. As diferenças podem dever-se principalmente a três

causas: (a) precipitação sub-avaliada; (b) recarga com água proveniente de outras origens que não apenas a precipitação; (c) deficiência na caracterização dos diversos parâmetros utilizados nas fórmulas de cálculo. Pelo tipo de informação utilizado pensa-se que a principal causa para estes resultados seja a terceira.

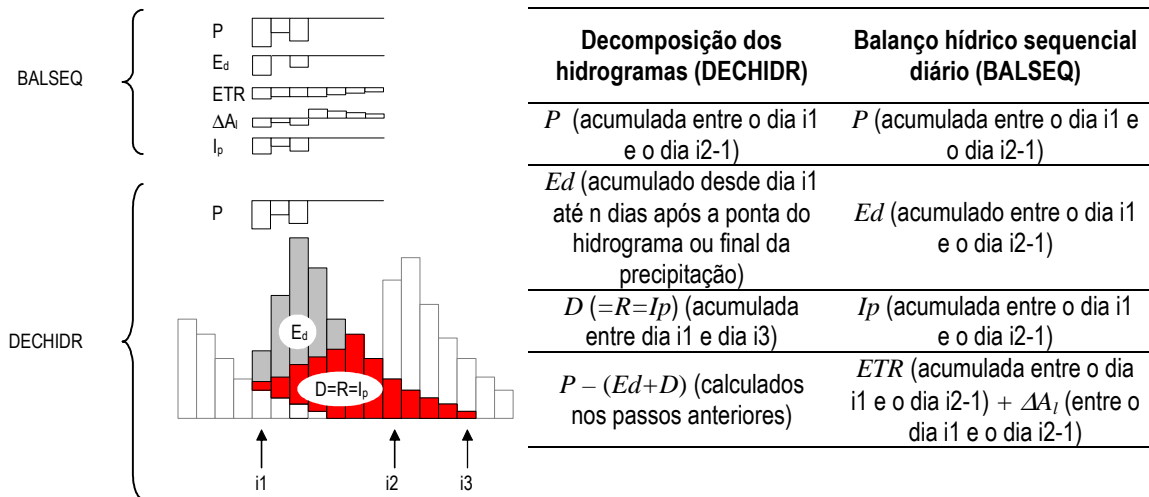


Fig. 13 – Comparação entre os resultados obtidos pelos métodos da decomposição dos hidrogramas (DECHIDR) e do balanço hídrico sequencial (BALSEQ)

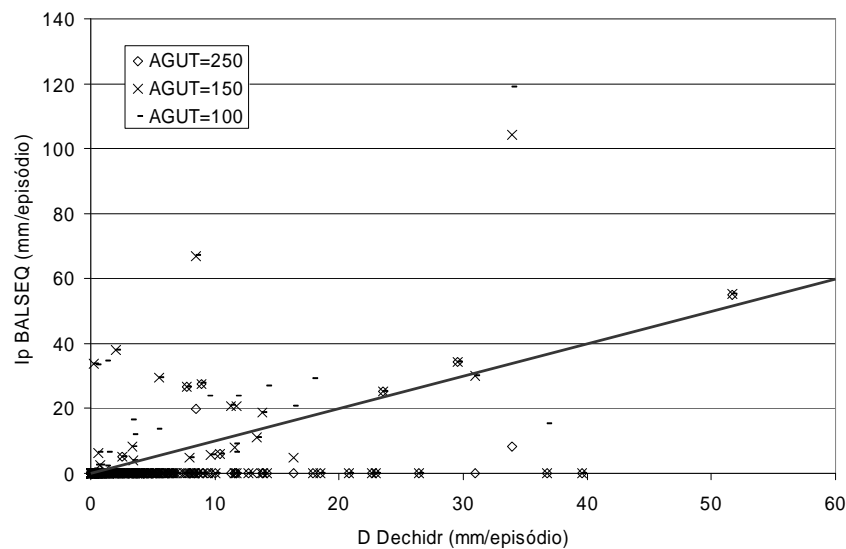


Fig. 14 – Comparação das descargas obtidas pelo método da decomposição do hidrograma ("E<P", "E/P", "nP") com as infiltrações profundas obtidas por três corridas do balanço hídrico sequencial diário que considera o horizonte superior do solo no cálculo do escoamento directo.

Calculada a recarga, é necessário referir que a nível da gestão das águas subterrâneas, o volume de recarga estimado pelos diversos métodos apresentados não corresponde ao recurso hídrico subterrâneo disponível (para extracção). Esta disponibilidade não é limitada somente pela capacidade de armazenamento da zona saturada, mas também por questões de ordem ambiental, que obrigam à manutenção de um caudal ecológico e por questões técnicas, relativamente à capacidade de extrair

água. Assim propôs-se a definição de recursos extraíveis de águas subterrâneas como uma percentagem do volume de recarga anual média, limitado pelo rebaixamento máximo que se pode provocar no armazenamento subterrâneo permanente da zona saturada.

Quadro 1 – Diferenças (mm) dos valores de recarga obtidos pelas quatro aplicações dos modelos de balanço hídrico, para cada período de análise e por subárea de cálculo (caso de estudo de Estarreja)

← Método	Método →	MBASF sem ETRb					MBHSD sem n.f.					MBHSD com n.f.				
	Subárea	(1,1) – (46,51)	(6,6) – (41,46)	(11,11) – (36,41)	(16,16) – (31,36)	(21,21) – (26,31)	(1,1) – (46,51)	(6,6) – (41,46)	(11,11) – (36,41)	(16,16) – (31,36)	(21,21) – (26,31)	(1,1) – (46,51)	(6,6) – (41,46)	(11,11) – (36,41)	(16,16) – (31,36)	(21,21) – (26,31)
Período																
MBHSD sem n.f.	1993-10-26 a 1993-11-24	67	52	47	85	-13	xxxx					xxxx				
	1993-11-24 a 1994-01-06	16	-20	-32	36	-109										
	1994-01-06 a 1994-01-27	99	86	90	135	62										
	1994-01-27 a 1994-02-24	64	43	39	87	-14										
	1994-02-24 a 1994-05-31	114	45	40	196	-142										
	1994-05-31 a 1994-09-07	106	65	67	195	-113										
	1994-09-07 a 1995-02-01	2	-95	-115	95	-393										
Total	468	174	135	830	-722											
MBHSD com n.f.	1993-10-26 a 1993-11-24	78	63	59	95	4	11	11	12	10	17	xxxx				
	1993-11-24 a 1994-01-06	34	-2	-14	53	-82	18	18	18	17	27					
	1994-01-06 a 1994-01-27	101	88	92	138	65	2	2	2	3	3					
	1994-01-27 a 1994-02-24	78	57	53	101	7	14	14	14	14	21					
	1994-02-24 a 1994-05-31	182	116	109	261	-40	68	71	69	65	102					
	1994-05-31 a 1994-09-07	112	72	74	202	-104	6	7	7	7	9					
	1994-09-07 a 1995-02-01	100	4	-18	183	-247	98	99	97	88	146					
Total	685	398	355	1032	-398	217	224	220	202	324						
MBASF com ETRb	1993-10-26 a 1993-11-24	12	14	12	11	17	-55	-38	-35	-74	30	-66	-49	-47	-84	13
	1993-11-24 a 1994-01-06	13	15	13	12	18	-3	35	45	-24	127	-21	17	27	-41	100
	1994-01-06 a 1994-01-27	6	8	6	6	9	-93	-78	-84	-129	-53	-95	-80	-86	-132	-56
	1994-01-27 a 1994-02-24	11	12	11	10	16	-53	-31	-28	-77	30	-67	-45	-42	-91	9
	1994-02-24 a 1994-05-31	82	87	83	79	121	-32	42	43	-117	263	-100	-29	-26	-182	161
	1994-05-31 a 1994-09-07	146	155	159	164	215	40	90	92	-31	328	34	83	85	-38	319
	1994-09-07 a 1995-02-01	64	69	63	56	94	62	164	178	-39	487	-36	65	81	-127	341
Total	333	360	347	337	491	-135	186	212	-493	1213	-352	-38	-8	-695	889	

Os valores das diferenças representados correspondem à diferença entre o método apresentado na horizontal (linha) e o método representado na vertical (coluna)

MBASF = modelo de balanço hídrico considerando os termos abaixo da superfície freática; MBHSD = modelo de balanço hídrico sequencial diário.

4. Conclusões

4.1. Introdução

As Conclusões desenvolvem-se com base na apreciação do cumprimento dos objectivos explícitos definidos e termina com sugestões de acções para continuação dos estudos.

Objectivo 1 – apresentar um modelo global que permita deduzir todos os modelos de cálculo da recarga: estabeleceu-se um modelo global de balanço de massa, que serve de cobertura para a partir dele construir todos os modelos conceptuais que permitem a utilização dos diversos métodos de cálculo da recarga apresentados.

Objectivo 2 – apresentar diferentes modelos e caracterizar diferentes métodos que permitem o cálculo da recarga: apresentaram-se diferentes modelos e métodos de cálculo da recarga, em função das áreas de estudo, do horizonte temporal utilizado e do tipo de informação disponível: balanço hídrico sequencial a nível do *solo*, armazenamento na zona vadosa, variação do armazenamento na zona saturada, escoamento subterrâneo, descarga, combinação desses métodos, balanço de solutos na água subterrânea, decomposição de solutos do escoamento superficial;

Objectivo 3 – criar novos métodos ou aprofundar os métodos de cálculo da recarga: tomando como ponto de partida os modelos e/ou métodos de cálculo de recarga já existentes e as correspondentes aplicações, desenvolveram-se outras formas para estimar a recarga e que concretamente passaram por (1) novas formas de cálculo das parcelas do balanço hídrico sequencial diário, que tornam os modelos mais próximos da realidade, embora seja necessário caracterizar mais variáveis ou parâmetros intervenientes; (2) o desenvolvimento de métodos de decomposição de hidrogramas de escoamento superficial; (3) o estabelecimento de novos modelos conceptuais que consideram a posição do nível freático no balanço hídrico. Estes desenvolvimentos foram implementados em programas de computador.

Objectivo 4 - demonstrar a aplicabilidade desses métodos com dados de casos de estudo reais: os métodos desenvolvidos foram testados através da aplicação a quatro situações de estudo para quantificar a recarga: (1) sistemas aquíferos de Quarteira e de Albufeira-Ribeira de Quarteira, (2) Estarreja, (3) uma selecção de 16 bacias hidrográficas localizadas em Portugal, (4) área da bacia hidrográfica de Nisa a montante da estação hidrométrica de Ponte de Panasco. As aplicações foram bem sucedidas, tendo beneficiado da existência dos sistemas de informação geográfica para as aplicações distribuídas no espaço.

Objectivo 5 – validar os resultados obtidos pela aplicação desses métodos: ao fazer-se a aplicação de mais do que um método a cada situação de estudo, procurou-se a validação dos métodos através da comparação dos resultados obtidos por eles. As aplicações realizadas deram resultados diferentes. Contudo, esta diferença pode justificar-se ou por não se terem verificado os requisitos

necessários para a aplicação dos métodos ou por não se dispor a informação necessária para caracterizar todas as parcelas do balanço. Apesar destas razões é preciso ter presente que a informação que se utilizou nas aplicações realizadas é normalmente a informação que existe disponível.

Objectivo 6 – definir os modelos e os métodos mais adequados em função das configurações hidrogeológicas existentes: a compreensão da globalidade do balanço hídrico, baseada no ciclo da água, a aplicação dos modelos já existentes e dos modelos agora desenvolvidos, a percepção do que esses modelos representam e os resultados obtidos, permitem definir os modelos e os métodos mais adequados ao cálculo da recarga numa situação específica. Acabando este objectivo por resultar do cumprimento dos objectivos anteriores, os resultados a que se chegou são apresentados na secção seguinte.

4.2. Modelos de cálculo da Recarga

4.2.1. Introdução

A escolha do modelo e/ou do método de cálculo da recarga parte da conceptualização do processo de recarga na área de estudo. Esta conceptualização consiste, basicamente, na definição do modelo da realidade física: definição espaço-temporal das áreas de recarga, das áreas de descarga, das áreas onde pode ocorrer evapotranspiração a partir da zona saturada, dos limites do corpo hídrico subterrâneo, dos volumes de entrada de água no sistema em estudo, incluindo a precipitação, e das extracções e utilizações de água superficial e subterrânea e respectivas localizações.

As condições ideais para se fazer a estimativa da recarga, são portanto o conhecimento tanto exaustivo quanto possível dos níveis piezométricos, no tempo e no espaço; o conhecimento das propriedades hidráulicas do meio; o inventário de todas as saídas do meio, quer as naturais (descarga) como as artificiais (bombagem), ao longo do tempo; o conhecimento da precipitação; as medidas do teor de humidade no *solo* em vários locais (em área, em profundidade e no tempo); a quantificação dos volumes de água para rega ao longo do tempo e no espaço; o conhecimento da ocupação do solo, dos ciclos vegetativos das plantas, das propriedades do *solo* em termos de retenção de água; o conhecimento de teores de solutos tanto na água da chuva como na água subterrânea.

Se fosse possível ter esta informação toda, seria possível aplicar vários métodos distintos de cálculo da recarga. Uma vez que normalmente só existe uma parte desta informação, devem-se utilizar os modelos para os quais existe informação disponível. Assim, os modelos e os métodos são aplicáveis em função da configuração hidrogeológica, da informação disponível e da distribuição espaço-temporal pretendida da recarga.

Como metodologia de cálculo, a estimativa da recarga deve começar com uma boa conceptualização do processo de recarga na área em estudo; com essa conceptualização estabelecer o modelo de balanço hídrico; definir os métodos de cálculo que se adequam a esse modelo e para os quais existe informação disponível; caracterizar espacialmente as variáveis de estado que descrevem a área de estudo; aplicar os métodos e estimar a recarga; esta estimativa faz parte de um processo iterativo, que, à medida que se vai obtendo mais informação, pode ser actualizada.

Com base na descrição dos modelos, nas aplicações realizadas e nos resultados obtidos, sintetizam-se no Quadro 2 as propriedades, os parâmetros e os dados de entrada dos modelos e métodos de estimativa da recarga referidos ao longo da Tese. As subsecções seguintes caracterizam os modelos e os métodos mais adequados ao cálculo da recarga.

4.2.2. Modelos de balanço hídrico acima da zona saturada

Os modelos de balanço hídrico acima da zona saturada são **modelos de previsão** na medida em que estimam a recarga a partir da quantificação dos processos que a antecedem. Basicamente, referiram-se dois tipos de modelos: modelos de balanço hídrico sequencial diário e modelo de cálculo através do armazenamento na zona vadosa. Destes dois tipos, aquele que foi desenvolvido e aplicado foi o de balanço hídrico sequencial diário. O desenvolvimento restante desta secção refere-se somente aos modelos de balanço hídrico sequencial diário.

No caso de inexistência de informação acerca de níveis piezométricos ou de caudais escoados, os modelos de balanço hídrico sequencial diário podem ser os únicos modelos utilizáveis. Necessitam, no entanto, do conhecimento de dados climáticos para caracterizar a precipitação e a evapotranspiração potencial, e do conhecimento de parâmetros característicos do meio. Dependendo da complexidade do modelo utilizado, o número de parâmetros necessário pode ser elevado (ver Quadro 2). Estes modelos permitem obter estimativas de valores de infiltração profunda por incremento de tempo considerado no balanço. Pelo processo de escoamento na zona vadosa os impulsos de infiltração profunda estimados para cada incremento de tempo são atenuados devido à redistribuição da humidade na zona vadosa pelo que um valor de infiltração profunda não reflecte o mesmo valor de recarga um determinado tempo depois.

Quadro 2 – Características, parâmetros e dados de entrada dos modelos e métodos de cálculo da recarga

Modelos/métodos	Propriedades dos modelos				Parâmetros necessários à corrida dos modelos	Dados de entrada necessários											
	Previsão (P) / Resposta (R)	Distribuídos (D) / Integradores (I)	episódios (E)	Resultados afetados pelo escoamento horizontal na zona vadosa (Sim/Não) (Sim/Não)		Recarga média (M) / por episódios (E)	propriedades da zona vadosa	propriedades do solo	ocupação do solo ETP ou ETO	precipitação	níveis	propriedades da zona saturada	nascentes	caudais de superficiais	escoramentos superficiais	extrações físicas	análises de solutos ou medição de parâmetros
Modelos de balanço hídrico acima da zona saturada																	
BALSEQ	P	D	E	S	NC, AGUT	x	x	x	x								
BALSEQ_MOD :	P	D	E	S													
• intercepção pelas plantas (*)	P	D	--	--	AGp cv	x	x	x									
• infiltração superficial	P	D	--	--	Horizonte superior do solo	x		x	x								
• escoamento directo	P	D	--	--	NC	x		x	x								
• ETR dual	P	D	--	--	cc, wp, permeavel, calcula_Kcb_esp, dia_ini, L_ini, L_des, L_med, L_fim, Kcb_ini, Kcb_med, Kcb_fim, h_cult, rp_1, rp_0, sid_, Kc_min, Kcb_tot, fraccão, fraccão_0, fraccão_nada			x	x	x							
• ETR como no BALSEQ	P	D	--	--	wp, rp_1			x	x	x							
• infiltração profunda como no BALSEQ	P	D	--	--	AGUT				x	x							
• infiltração profunda considerando a condutividade hidráulica do solo	P	D	--	--	cc, Ks, rp_1				x	x							
• infiltração profunda considerando a condutividade hidráulica do solo e a porosidade do solo	P	D	--	--	cc, Ks, n, rp_1				x	x							
• infiltração profunda em função do escoamento no solo	P	D	--	--	material do solo					x							
• considerando a posição do nível freático	P/R	D	--	--				x	x			x					
armazenamento na zona vadosa	P	D	M	N	cc						x						
Modelos de balanço hídrico abaixo da zona saturada																	
variação do armazenamento na zona saturada	R	I	E	N	ne							x					
escoamento subterrâneo	R	I	E	N	K							x	x				
descarga de nascentes	R	I	E	S										x			
decomposição dos hidrogramas de escoamento	R	I	E	S	Ndias, Pmin	x								x			
qualquer modelo anterior mas considerando factores humanos (**)	R	I	E	N													x
Modelos de balanço de massa de soluto																	
balanço de massa (cloretos)	R	I	M	N		x											x
decomposição dos hidrogramas de escoamento a partir da massa de solutos	R	I	E	S		x								x			x

(*) - opção não contemplada no programa de computador

(**) – indica-se o dado de entrada que é necessário acrescentar aos modelos anteriores

Com estes modelos podem-se ter estimativas da **recarga distribuída** (ou mais correctamente, da infiltração profunda distribuída) por uma região de estudo. No caso de se caracterizar uma região em estudo pelas suas séries médias de precipitação e evapotranspiração potencial e pelos parâmetros médios característicos dessa região, pode-se obter uma estimativa da recarga média; no entanto este procedimento não é recomendado porque o processo de recarga distribuída não é linear. Neste caso recomenda-se o cálculo da recarga distribuída dessa região, dividindo a região em áreas homogéneas onde se possa considerar que as séries utilizadas e os parâmetros caracterizadores do meio sejam constantes.

A aplicação dos modelos de balanço hídrico sequencial diário acima da zona saturada requer a definição das áreas (a) de recarga, (b) de evapotranspiração a partir do nível freático e (c) de descarga, devendo-se aplicar o método “geral” nas áreas (a), o método que considera a posição do nível freático nas áreas (b), e considerar recarga nula nas áreas (c). É preciso ter em atenção que estas áreas variam temporalmente e que esta situação deve ser considerada.

Estes modelos podem ser utilizados para estimar a recarga em qualquer meio geológico, quer seja de **porosidade intergranular**, de **porosidade por fissuras**, um **meio cársico** ou um **meio de porosidade mista**.

Há um aspecto importante a ter em atenção, que foi parcialmente considerado nas aplicações realizadas mas que não foi incluído nos métodos de cálculo da recarga acima da zona saturada e que é a *existência de caminhos preferenciais*, que fazem com que uma parte da água de precipitação passe directamente para baixo da espessura de *solo* sujeita a evapotranspiração. Esta situação pode ser introduzida nos modelos de balanço hídrico sequencial diário considerando que uma parte do escoamento directo calculado por esses modelos se infiltra. Neste caso é necessário definir qual é essa fracção do escoamento directo. Esta aproximação é totalmente diferente de se considerar (a) que uma parte do volume de precipitação é encaminhado para esses caminhos preferenciais e (b) que o restante vai seguir o processo normal de escoamento no *solo* sendo modelado pelo balanço hídrico sequencial. Porque nesse caso (a) o volume de água restante podia-se infiltrar superficialmente, não ocorrendo por isso escoamento directo, e (b) toda a água de infiltração superficial poderia ser utilizada para o processo de evapotranspiração, não ocorrendo, por isso infiltração profunda. Os meios cársicos e fissurados podem ser considerados como casos particulares de meios em que existem caminhos preferenciais. No caso do meio cársico desenvolvido superficialmente, em muitos casos, pode-se assumir que a totalidade do escoamento directo constitui infiltração profunda.

4.2.3. Modelos de balanço hídrico da zona saturada

Em oposição aos modelos anteriores, há um conjunto de modelos de balanço hídrico que permitem a estimativa da recarga a partir da reacção do meio subterrâneo ao processo de recarga,

sendo por isso **modelos de resposta**. Os métodos apresentados são a decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial, a variação do armazenamento da zona saturada (variação de níveis piezométricos), a quantificação dos escoamentos em secções da zona saturada, a quantificação dos caudais de nascentes, ou as combinações de alguns destes métodos. Os métodos podem ainda considerar as extracções por parte do homem. Estes métodos são **integradores** para uma área de estudo e podem fornecer estimativas de valores de **recarga por episódios**.

Para resolver o modelo que calcula a recarga em função da descarga do meio, apresentaram-se dois métodos, o da decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial e o da quantificação dos caudais de nascentes.

No caso do **método da decomposição dos hidrogramas de escoamento**, no volume de água quantificado como descarga pode estar incluído escoamento proveniente de zonas saturadas de pequena espessura que se formam entre o *solo* e a zona saturada, pelo que neste caso, a descarga estimada é superior à recarga. O escoamento de base resultante da decomposição do hidrograma é uma estimativa da recarga que ocorre na área definida por uma bacia hidrográfica nos casos em que todo o escoamento subterrâneo dessa bacia hidrográfica convirja para os cursos de água superficial da bacia hidrográfica em análise (ou seja a bacia hidrográfica seja coincidente com a bacia hidrogeológica).

As situações hidrogeológicas mais favoráveis para a observação desse requisito correspondem às áreas de ocorrência de rochas ígneas e metamórficas, com **porosidade intergranular** ou por **fissuras (rochas cristalinas do Maciço Antigo)**. No caso de ocorrência de **rochas sedimentares de porosidade intergranular**, mesmo que estratificadas, esse requisito ainda se pode observar em muitas situações. Somente no caso de ocorrência de **rochas carsificadas** é que o escoamento subterrâneo da área definida por uma bacia hidrográfica pode ser feito para fora dos limites dessa bacia. Neste caso a aplicação do método não seria suficiente uma vez que seria também necessário quantificar os escoamentos subterrâneos laterais de entrada e de saída em relação aos limites da bacia hidrográfica.

De todos os métodos que permitem o cálculo da recarga, provavelmente o método da decomposição dos hidrogramas é o de mais fácil aplicação. Apresenta a vantagem sobre todos os restantes métodos de não precisar da caracterização de parâmetros do meio (somente a área), sendo apenas necessário para a sua aplicação as séries de precipitação e de escoamento, que são processos normalmente monitorizados em Portugal.

A aplicação do método de cálculo da recarga a partir das **descargas de nascentes** apresenta a dificuldade de saber qual a bacia drenante de cada nascente. Por outro lado, no caso de se estar a considerar a totalidade de um corpo hídrico subterrâneo, não se sabe se toda a água subterrânea é canalizada para essas nascentes ou se há outros locais de descarga do sistema, pelo que nesta

situação este método pode estimar um valor de recarga por defeito. A exemplo do método anterior, no volume de água das nascentes pode também estar incluído escoamento proveniente de zonas saturadas de pequena espessura que se formam entre o *solo* e a zona saturada, pelo que por esta situação, a descarga estimada seria superior à recarga. Devido à hierarquização do escoamento subterrâneo e aos volumes de água mais significativos que convergem para as nascentes este método é aplicável principalmente em **meios cársicos**. Nos restantes meios, apesar de poderem ocorrer nascentes com caudais apreciáveis, é natural que haja muita descarga difusa de águas subterrâneas pelo que não é possível quantificar os seus caudais ao longo de superfícies de exsudação.

O modelo que dá a recarga em função do **escoamento em secções da zona saturada**, pode ser aplicado em **qualquer tipo de meio** mas requer o conhecimento da área de recarga a montante da secção da zona saturada e a monitorização constante de níveis piezométricos ao longo da secção da zona saturada bem como o conhecimento da transmissividade na direcção perpendicular à secção em análise. A necessidade do conhecimento destas variáveis dificulta a aplicação deste método.

O modelo que traduz mais fielmente o processo de recarga é o que dá a recarga em função da **variação positiva do armazenamento subterrâneo** (subida do nível freático) uma vez que esta variação é consequência directa da recarga. O período de tempo para a aplicação deste método é muito curto. Contudo para que este modelo fosse aplicável seria necessária a ocorrência de uma situação em que a diferença entre o escoamento subterrâneo lateral de entrada e de saída fosse insignificante relativamente à subida do nível freático. A maior dificuldade na aplicação deste modelo deve-se à necessidade de caracterizar a porosidade eficaz na zona de oscilação dos níveis. Apesar de não se ter conseguido utilizar este modelo com dados reais prevê-se que, se não for utilizado em conjunto com outros métodos, só muito dificilmente originará resultados fiáveis.

Nas aplicações efectuadas utilizou-se um modelo de cálculo da recarga com base na **variação do armazenamento subterrâneo**, nas **extracções** e no **escoamento subterrâneo lateral de entrada e de saída**. Este método também é aplicável em **qualquer tipo de meio** mas os resultados obtidos mostraram a dificuldade que existe na sua aplicação devido à necessidade de caracterizar espacialmente uma série de parâmetros do meio (fundamentalmente a porosidade eficaz e a transmissividade).

4.2.4. Modelos de balanço de massa de soluto

Para além dos modelos de balanço hídrico há a considerar os modelos de balanço de massa de soluto. O modelo de balanço de massa, considerando ou não escoamento superficial, do tipo **balanço de cloretos**, é simples e é adequado para dar estimativas de valores de **recarga anual média**, para as situações em que se pode assumir que ao longo do tempo (pelo menos do tempo que demora desde a infiltração superficial até à recarga) as características de precipitação e de ocupação do solo se

mantêm. Tem também a vantagem de ser um modelo que dá a **resposta** do meio hídrico à ocorrência de recarga, sendo por isso um modelo **integrador**.

O outro tipo de modelo de balanço de massa apresentado, que faz a **decomposição do hidrograma de escoamento superficial** em escoamento directo e em escoamento de base, a partir da **concentração de soluto** na água de escoamento superficial é também um modelo de **resposta, integrador** da bacia e que permite fazer a estimativa da recarga por **episódios**, parecendo ser de aplicação simples.

4.2.5. Comparação entre os modelos de balanço hídrico acima e da zona saturada

Entre todos os modelos abordados nesta Tese (e excluindo o modelo de cálculo através do armazenamento na zona vadosa, que é de aplicação difícil), os modelos de balanço hídrico sequencial diário são os únicos modelos com características de previsão. Por serem modelos de previsão, permitem a estimativa da recarga distribuída, tendo como consequência a vantagem de permitirem, por exemplo, o estudo do impacto das alterações climáticas na recarga das águas subterrâneas. Os modelos apresentados nesta Tese incorporam, fundamentalmente, a recarga devida à infiltração da água da chuva; contudo apresentam a desvantagem de os seus resultados estarem dependentes da inexistência de caminhos preferenciais para a infiltração e a recarga.

Ao contrário, os modelos de balanço hídrico da zona saturada têm a vantagem de serem modelos de resposta, integradores do meio subterrâneo e, por isso, serem independentes da existência de caminhos preferenciais para a ocorrência de recarga, que nalguns casos pode ser um factor limitativo à utilização dos modelos acima da zona saturada. Apresentam também a vantagem sobre os modelos anteriores de integrarem todas as formas de recarga (infiltração de água da chuva, de cursos de água superficial, de excesso de água de rega ou de recarga artificial).

Há uma situação de fronteira, que constitui um processo comum à aplicação dos dois tipos de modelos e que ocorre quando o nível freático está dentro da espessura de terreno sujeita a evapotranspiração. Neste caso se originalmente se estiver a utilizar o modelo de balanço hídrico abaixo da zona saturada, é necessário quantificar a evapotranspiração (que à priori não era um parâmetro necessário de conhecer). Se originalmente se estava a utilizar o modelo de balanço hídrico acima da zona saturada, então a recarga deve ser quantificada utilizando a posição do nível freático (que era também à priori uma variável que não seria necessária conhecer para a aplicação do modelo).

4.3. Desenvolvimentos futuros

4.3.1. A nível do aprofundamento dos métodos

Nesta Tese desenvolveram-se e aprofundaram-se métodos de cálculo da recarga e de processos que permitem o seu cálculo. Seguidamente indicam-se algumas tarefas suplementares às que foram desenvolvidas nesta Tese:

(1) integrar o processo de intercepção por parte das plantas no modelo de balanço hídrico sequencial diário. Uma abordagem possível seria estimar a intercepção separadamente e descontá-la ao valor da precipitação, utilizando-se neste caso um valor de precipitação disponível para escoamento directo ou infiltração superficial. Contudo, qualquer que seja o método utilizado, é preciso ter em atenção que o processo de evapotranspiração a partir das plantas e do *solo*, por um lado, e de evaporação da água interceptada pelas plantas, por outro, é limitado pelo poder evaporante da atmosfera. Isto significa que se há evaporação da água que foi retida nas folhas das plantas, a energia utilizada para este processo já não existe disponível para a evapotranspiração;

(2) definir os ciclos vegetativos e caracterizar os coeficientes culturais basais das plantas, para a globalidade dos cobertos vegetais existentes em Portugal. Os resultados desta tarefa, a desenvolver fundamentalmente por agrónomos, seriam utilizados nos modelos de balanço hídrico sequencial diário que estimam a evapotranspiração utilizando o coeficiente cultural dual;

(3) fazer o estudo da infiltração profunda e da variação do armazenamento no *solo* a partir da modelação do escoamento na zona vadosa das classes texturais de *solos* que não foram apresentadas nesta Tese: franco arenoso, franco, limoso, franco argilo-arenoso, franco limoso, franco argiloso, franco argilo-limoso, argilo-arenoso, argilo-limoso e argiloso. Este estudo serviria para definir qual a quantidade de água que o *solo* poderia drenar em função do material do *solo* e do seu teor de humidade inicial.

(4) aprofundar o(s) processo(s) para fazer a decomposição do hidrograma de escoamento. Foram apresentadas várias formas de traçar a divisão entre o escoamento directo e o de base no hidrograma de escoamento superficial, tendo-se optado pela que liga o escoamento registado no dia anterior ao início da subida do hidrograma ao escoamento registado N dias após o pico do hidrograma ou a paragem da precipitação. Seria bom compreender exactamente qual seria a melhor forma de traçar a divisão e para isso poder-se-ia aplicar um modelo de balanço de massa para a decomposição do hidrograma.

4.3.2. A nível da aplicação dos métodos

A nível da aplicação dos métodos de cálculo da recarga, indicam-se algumas actividades de desenvolvimento futuro:

(1) verificar como a variação dos diversos parâmetros do modelo de balanço hídrico sequencial diário (por exemplo, a variação da profundidade das raízes das plantas, ou da área ocupada por um coberto vegetal vs. área descoberta), condicionam os valores de recarga obtidos. Esta tarefa, importante para se saber quais são os parâmetros cuja variação condiciona mais os resultados de recarga, pode ser muito trabalhosa se se utilizarem os modelos mais complexos (por exemplo aquele que utiliza o coeficiente cultural dual com duas espécies vegetais, considerando profundidade de raízes e fracções de terreno ocupadas, variáveis no tempo);

(2) aplicar simultaneamente vários métodos a uma bacia hidrogeológica de estudo para a qual exista monitorização espacial e/ou temporal da precipitação, dos níveis piezométricos, do escoamento superficial e das extracções, para além do conhecimento das propriedades hidráulicas das formações geológicas bem como das características físicas dos solos, teores de humidade e da ocupação do terreno. A aplicação simultânea de métodos diferentes a uma área de estudo serviria para aferir mais profundamente as potencialidades dos diversos métodos ou, eventualmente, encaminhar o desenvolvimento de aspectos necessários a esses métodos de forma a que todos eles possam reproduzir os valores de recarga.

(3) estudar o impacto das alterações climáticas e da alteração do uso do solo na recarga. O estudo do impacto das alterações climáticas consiste na utilização de modelos de previsão (balanço hídrico sequencial diário) introduzindo séries de precipitação e de evapotranspiração simuladas, com distribuições diferentes das actuais, podendo também introduzir-se parâmetros característicos do meio (relativos à ocupação do solo) diferentes dos actuais. Eventualmente, no caso de se considerar que as alterações climáticas só ocorrem a nível da quantidade de precipitação e não a nível da sua distribuição, nem da quantidade de evapotranspiração ou da distribuição dos seus valores, também se poderão utilizar os resultados dos métodos de decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial para caracterizar uma situação de escassez de água. A alteração da ocupação do solo traduz-se numa mudança da área impermeabilizada e condiciona a quantidade máxima de água utilizável para evapotranspiração. Exemplos de alteração do uso do solo são: desflorestação/florestação, incêndios, construção de infra-estruturas (por exemplo auto-estradas, zonas urbanas, etc.), mudança de práticas agrícolas;

(4) aplicar o método de balanço de massa que faz a decomposição do hidrograma de escoamento superficial em escoamento directo e em escoamento de base a partir da concentração de soluto na água de escoamento superficial. Verificar a possibilidade de aplicação do método utilizando, em vez da concentração de um soluto, um indicador dessa concentração de mais fácil medição e registo ao longo do tempo, como por exemplo, a condutividade eléctrica.

(5) produzir modelos de recarga vs. precipitação ou outras variáveis descritíveis do meio, tendo em vista a caracterização da recarga em áreas onde não são corridos os métodos de cálculo da

recarga. Como exemplos de modelos deste tipo refira-se o apresentado com base em corridas do modelo BALSEQ e o desenvolvido a partir do estudo dos resultados da decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial:

(5a) seria útil correr os modelos de balanço hídrico sequencial BALSEQ ou BALSEQ_MOD para desenvolver um modelo que permita calcular a recarga anual média distribuída no espaço em função de informação de base já existente para muitas séries de precipitação e de evapotranspiração potencial, distribuídas uniformemente pelo País. Com os resultados destas corridas procurar-se-iam novas relações, eventualmente com a necessidade de recorrer a outros parâmetros e outras variáveis, por exemplo para considerar a evapotranspiração potencial específica de cada coberto vegetal presente. Esta situação faria com que, associada a uma série de precipitação, existissem várias séries de evapotranspiração potencial. O resultado seriam equações de recarga em função da precipitação, da evapotranspiração potencial, da ocupação do solo e dos parâmetros do *solo*, que poderiam ser aplicadas para qualquer local onde se tivesse essa informação;

(5b) para tornar o modelo resultante da decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial mais abrangente, seria desejável aplicar a técnica da decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial a bacias hidrográficas com precipitações anuais médias acima dos 810 mm/a, uma vez que, das 13 bacias utilizadas para a elaboração do modelo de Recarga vs. Precipitação, apenas duas apresentam precipitações anuais médias superiores;

(6) com o conhecimento adquirido ao longo da Tese, com a experiência adquirida relativamente à aplicabilidade dos métodos, os resultados obtidos pela sua aplicação, o estudo desenvolvido com base nos resultados da decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial, e o desenvolvimento de novos modelos que permitam estimar a recarga em função da precipitação ou de outras variáveis descritíveis do meio, **realizar um mapa da recarga (natural) anual média das águas subterrâneas de Portugal Continental.**

(7) encarando o recurso hídrico **como um todo e aprofundando a abordagem** que entra em linha de conta com a interligação das águas subterrâneas e das águas superficiais, incluindo a manutenção de caudais ecológicos e os condicionamentos, por questões técnicas de exploração, dos rebaixamentos máximos admissíveis nos níveis piezométricos dos corpos hídricos subterrâneos, utilizar esse mapa de recarga anual média das águas subterrâneas para **cartografar o volume extraível anual médio de águas subterrâneas de Portugal Continental**, podendo esta cartografia ser utilizada no planeamento da ocupação do território e para a gestão dos recursos hídricos.