

## **AVALIAÇÃO DA RECARGA DO SISTEMA AQUIFERO DOS GABROS DE BEJA SEGUNDO CRITÉRIOS MÚLTIPLOS – DISPONIBILIDADES HÍDRICAS E IMPLICAÇÕES AGRO-AMBIENTAIS**

**Eduardo A. PARALTA**

Geólogo. Bolseiro de Doutoramento FCT. Departamento de Hidrogeologia do Instituto Geológico e Mineiro,  
Estrada da Portela, Ap. 7586, 2720-866 Alfragide, tel. 351.21.4705400  
*Email: eduardo.paralta@igm.pt*

**Manuel M. OLIVEIRA**

Geólogo. Assistente de Investigação do Núcleo de Águas Subterrâneas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC,  
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Tel. 21 844 34 36, Fax 21 844 30 16,  
*Email: moliveira@lnec.pt*

**Maciek W. LUBCZYNSKI**

Hidrogeólogo. ITC - International Institute for Aerospace Survey and Earth Science. Hengelosestraat 99,  
P.O.Box 6; 7500 AA Enschede; The Netherlands, Tel: +31-53-4874277; Fax: +31534874336;  
*Email: lubczynski@itc.nl*

**Luís F. RIBEIRO**

Engenheiro de Minas. Professor Auxiliar, CVRM-Centro de Geo-sistemas do IST,  
Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa, Tel. 351.21.841724  
*Email: nlrib@alfa.ist.utl.pt*

### **Resumo**

O Sistema Aquífero dos Gabros de Beja, ocupa uma área aproximada de 350 km<sup>2</sup> e constitui um dos mais importantes reservatórios de águas subterrâneas instalado em rochas cristalinas básicas na região semi-árida do Alentejo (Sul de Portugal).

Os recursos hídricos subterrâneos são usados no abastecimento público de três concelhos e regadio. Trata-se fundamentalmente de uma região rural, com solos de boa qualidade, onde se pratica a monocultura cerealífera extensiva.

A partir de informação histórica recolhida na CM de Beja sobre o volume de extracções anuais e registos obtidos nos últimos 5 anos sobre balanço de massa de cloretos na água subterrânea e de precipitação, modelos de balanço hídrico sequencial diário (Balseq e Earth), curvas piezométricas e distribuição anual da precipitação foi possível obter um intervalo de recarga ou precipitação eficaz para a área do Sistema Aquífero do Gabros de Beja.

Uma correcta avaliação dos recursos hídricos subterrâneos renováveis anualmente é fundamental na gestão dos recursos disponíveis para abastecimento público e agricultura, numa situação de conflito de interesses durante o período estival ou em anos consecutivos de seca.

Também do ponto de vista agro-ambiental é importante definir quais as épocas do ano em que o potencial de lixiviação de fertilizantes é maior, no sentido de contribuir para uma gestão mais racional dos agro-químicos e estimar o volume de perdas para as águas subterrâneas.

**Palavras-chave:** Recarga; sistema aquífero; balanço hídrico; balanço de cloretos; curvas piezométricas.

## 1. INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO HIDROGEOLÓGICO

Os estudos de recarga aquífera são fundamentais em Hidrogeologia para a estimação do volume de recursos hídricos subterrâneos anualmente renováveis e têm implicações directas no planeamento e gestão integrada dos recursos hídricos regionais, especialmente em climas secos, como o do Alentejo, em que a maioria dos concelhos depende dos recursos aquíferos durante o período estival e em épocas de seca prolongada.

De forma muito simples, pode definir-se recarga aquífera como a água que entra na zona saturada (aquífero), preferencialmente a partir da percolação vertical proveniente da zona vadosa, mas também do escoamento lateral a partir das fronteiras do sistema. Neste trabalho serão utilizadas 3 metodologias de avaliação da recarga directa ou seja com origem na precipitação e percolação vertical da água através da zona vadosa até à superfície freática.

Uma correcta avaliação da recarga aquífera é fundamental no cálculo das disponibilidades hídricas para abastecimento público e agricultura, em especial em zonas de conflito de interesses. A recarga tem também implicações no balanço hídrico geral dos sistemas aquíferos ao nível dos caudais ecológicos, em especial nos aquíferos freáticos pouco profundos, com comportamento sazonal efluente sobre as linhas de água e ribeiras.

Noutra perspectiva, a distribuição temporal da recarga tem impacto ao nível das fontes pontuais e difusas de poluição, em especial nos aquíferos vulneráveis, como é o caso do Sistema Aquífero (SA) dos Gabros de Beja, através da remobilização e lixiviação dos agro-químicos e fertilizantes em excesso no solo até à zona saturada, que se encontra normalmente a pouca profundidade.

De facto, este sistema constitui um importante reservatório aquífero em rochas básicas, vulnerável à poluição por nitratos de origem agrícola, que normalmente excedem o VMA para consumo humano (50 mg/L), com oscilações sazonais importantes, que podem ser relacionadas com as épocas de fertilização e com o decorrer do ano hidrológico, ou seja, com a distribuição da precipitação e por conseguinte dos episódios de recarga (Paralta, 2001; Paralta & Ribeiro, 2003).

Relativamente ao Sistema Aquífero dos Gabros de Beja, estão referenciados na bibliografia trabalhos de Oliveira & Lobo Ferreira (1994) que apontam para uma taxa de recarga de 30% da precipitação média anual. Em Duque (1997) admite-se uma taxa de recarga média de 4%, em resultado da calibração matemática do modelo de fluxo. Nas conclusões do projecto ERHSA (Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo) admite-se para o Sistema Aquífero dos Gabros de Beja uma recarga média de 10% (CCR Alentejo, 2003).

Em Paralta (2001) considera-se uma recarga média anual entre 10 e 20%, com base no balanço de cloretos e no balanço hídrico entre a precipitação e as extracções contabilizadas na bacia hidrográfica de Pisões, em Beja.

A primeira fase de avaliação da recarga aquífera depende de disponibilidade de informação relativa a diversos parâmetros do sistema como sejam dados climáticos, hidrológicos, geomorfológicos, geológicos e de ocupação do solo, uma vez que da cobertura vegetal depende a evapotranspiração que é um parâmetro fundamental do balanço hídrico.

A informação hidrogeológica pode fornecer elementos para a aplicação de metodologias baseadas em traçadores, análise das flutuações piezométricas e aplicação da Lei de Darcy ao escoamento em meio saturado.

A recarga aquífera pode ser abordada sob várias metodologias:

- I) Métodos Directos
  - Balanço hídrico (formulação empírica);
  - Modelos Físicos (balanço entre águas subterrâneas e superficiais);
  - Modelos de circulação da zona vadosa (modelos determinísticos);
  - Traçadores (químicos, bacteriológicos, orgânicos e isotópicos).
  
- II) Métodos Indirectos (zona saturada)
  - Oscilação Piezométrica;
  - Lei Darcy.

Os *métodos directos* descrevem a recarga como um mecanismo de percolação da água desde o solo até ao aquífero, entrando com parâmetros como a variação de humidade no solo, evapotranspiração (ET), caudal de escoamento superficial, etc., para obter uma estimativa da recarga.

Os *métodos indirectos* utilizam informação piezométrica como indicadores da recarga efectiva, ou seja, sempre que há variações positivas do nível piezométrico estamos perante um episódio de recarga possível de quantificar, desde que se conheçam alguns parâmetros básicos do sistema hidrogeológico, como o Coeficiente de armazenamento (S), o Coeficiente de recessão CR (período de tempo entre o episódio de precipitação e a resposta do aquífero), a Condutividade hidráulica (K), etc.

Recentemente, têm sido aplicadas com sucesso técnicas de Detecção Remota baseadas em micro-ondas para obter informação multitemporal sobre humidade do solo que é integrada nos modelos de balanço hídrico, obtendo-se desta forma uma estimativa da recarga (Gouweleeuw, 2000).

A área de estudo é constituída pelo SA dos Gabros de Beja, que ocupa uma extensão aproximada de 350 km<sup>2</sup> entre Ferreira do Alentejo (a W), Beja (ao centro) e Serpa (a E), conforme ilustrado na figura 1.

Os solos são conhecidos por Barros de Beja e possuem elevada aptidão agrícola. Trata-se de um aquífero freático, pouco profundo e de risco elevado de poluição por nitratos de origem agrícola, uma vez que a época de aplicação de fertilizantes nas culturas cerealíferas coincide com o semestre húmido e, por conseguinte, com a época de recarga do sistema.

Acrescem ainda outros factores de interesse, relacionados com a alteração da ocupação do solo e das práticas agrícolas tradicionais, como sejam a introdução de novas culturas e o desenvolvimento do regadio, que actualmente se faz maioritariamente à custa das águas subterrâneas, mas que de futuro se prevê estar integrado no plano de rega do empreendimento de Alqueva.

Segundo Duque (1997), a precipitação média obtida para as séries de 1955/56-1995/96 na área do SA dos Gabros de Beja varia entre 525 mm/ano em Ferreira do Alentejo, 578 mm/ano em Beja e 508 mm/ano em Serpa, no limite oriental do sistema.

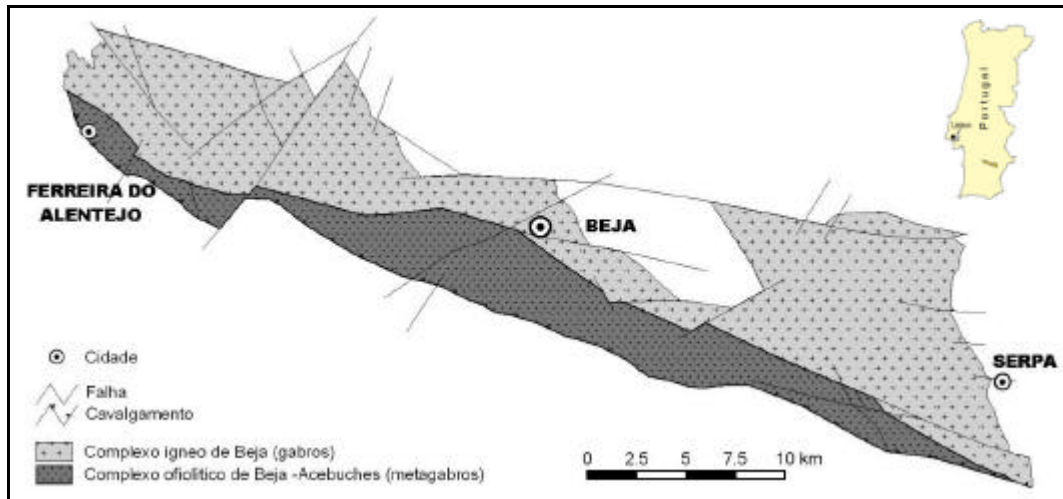


Figura 1 – Enquadramento geográfico dos Sistema Aquífero dos Gabros de Beja.

Uma caracterização hidrogeológica mais pormenorizada do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja e dos respectivos problemas agro-ambientais pode ser encontrada em Duque (1997), Paralta & Francês (2000) e Paralta (2001).

## 2. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA RECARGA

Estão referenciados na bibliografia inúmeros modelos matemáticos com aplicação no cálculo da recarga e modelação de fluxo e transporte de massa no solo e zona vadosa. No âmbito deste trabalho aplicaram-se 4 metodologias distintas e complementares de forma a efectuar um estudo comparativo dos resultados obtidos e a respectiva análise crítica:

1. Traçadores Químicos (Balanço de Cloretos);
2. Balanço Hídrico Sequencial Diário – Modelo EARTH;
3. Balanço Hídrico Sequencial Diário – Modelo BALSEQ;
4. Quantificação das Extrações.

Apresenta-se seguidamente uma breve introdução teórica a cada um dos métodos e os respectivos parâmetros utilizados no cálculo da recarga do SA dos Gabros de Beja.

### 2.1 Traçadores Químicos - Balanço de Cloretos

A recarga aquífera pode ser estimada a partir de traçadores químicos como o Cloreto, que são produzidos naturalmente na atmosfera terrestre.

A concentração de Cloreto no solo e até à profundidade radicular da vegetação dominante, aumenta em resultado da evapotranspiração. Para profundidades superiores, permanece aproximadamente constante, podendo ser usado como traçador químico.

A partir do valor das concentrações em cloreto da água da chuva e de amostras de água do aquífero é possível obter um balanço de massa do ião Cloreto de acordo com expressão simplificada [1],

conforme Custódio & Llamas (1996), assumindo que se trata de um elemento conservativo e que não existem fontes anómalas, naturais ou antrópicas de cloreto:

$$I_e = I / P \cong C_p / C_i \quad [1]$$

em que,

$I_e$  - infiltração eficaz ou recarga

$I$  - água de infiltração profunda (mm)

$P$  - precipitação média anual (mm)

$C_p$  - concentração em cloreto na água de precipitação

$C_i$  - concentração em cloreto na água de infiltração profunda

## 2.2 Balanço Hídrico Sequencial Diário – Modelo EARTH

O modelo EARTH é um modelo de avaliação da recarga aquífera e transporte de humidade no solo e zona vadosa que faz uma combinação dos métodos directos e indirectos de abordagem da recarga.

É um modelo de parâmetros hidrológicos usado na simulação da recarga e evolução piezométrica sazonal. O modelo foi desenvolvido em 1989 por Van der Lee, J. C. Gehrels e A. Gieske para o projecto GRES (Groundwater Recharge Evaluation Study). Está especialmente vocacionado para condições de clima semi-árido e permite simular igualmente o escoamento superficial e o caudal de escoamento de pequenas bacias hidrográficas.

O modelo EARTH pode ser aplicado na modelação de um vasto conjunto de variáveis agro-hidro-meteorológicas e hidrogeológicas essenciais para caracterizar o balanço hídrico de um sistema aquífero, nomeadamente no cálculo dos seguintes parâmetros.

- Superhavit hídrico;
- Escoamento superficial;
- Teor de humidade do solo e transporte na zona vadosa;
- Evapotranspiração real;
- Recarga de aquíferos;
- Evolução piezométrica.

O programa funciona em ambiente DOS e utiliza ficheiros de *input* e *output* ASCII. O modelo EARTH testado neste trabalho, é composto por 4 módulos principais e 1 módulo relativo ao escoamento superficial, segundo o fluxograma da figura 2 (Van der Lee & Gehrels, 1990).

As principais atribuições de cada módulo são as seguintes:

- o MAXIL (MAXimum Interception Loss) - Estima o superhavit hídrico;
- o SOMOS (SOil MOisture Storage) - Calcula o balanço de massa na zona vadosa e determina o fluxo de percolação profunda;
- o SUST (SURface STORAGE) - Calcula as perdas por escoamento superficial;
- o LINRES (LInear REServoir routing) - Distribui a percolação calculada no módulo SOMOS em função do tempo para a zona não saturada, entre as raízes das plantas e o nível freático;

- o SATFLOW (SATurated FLOW model) – modelo unidimensional para o meio saturado que converte a recarga proveniente do módulo LINRES em oscilação piezométrica, conhecido o Coeficiente de armazenamento e o Coeficiente de recessão.

A formulação matemática do modelo EARTH pode ser consultada em Van der Lee & Gehrels (1990), pelo que neste trabalho se descreve apenas a formulação referente ao módulo SATFLOW que calcula a curva piezométrica em função da recarga estimada pelo módulo LINRES, admitindo um determinado Coeficiente de armazenamento STo.

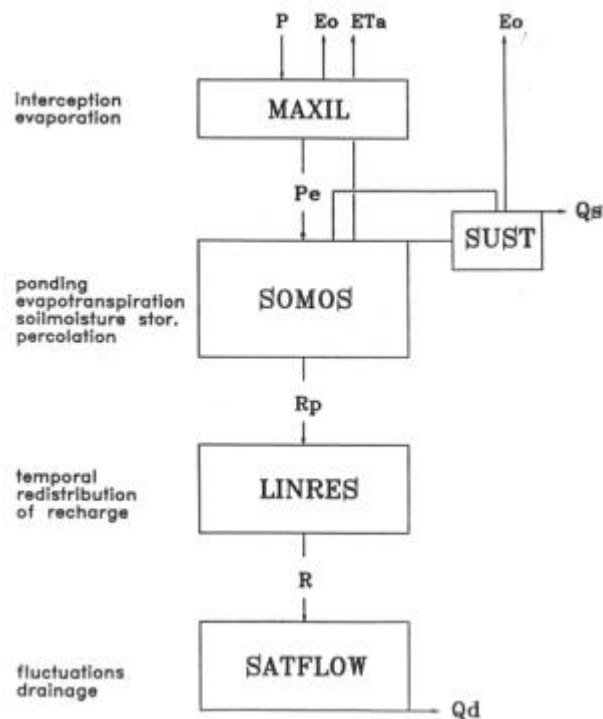


Figura 2 - Fluxograma de funcionamento do modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário EARTH.

O módulo SATFLOW funciona *per se* como um modelo hidrogeológico unidimensional determinístico que utiliza como *input* a recarga calculada nos módulos anteriores. A equação que traduz a oscilação piezométrica é a seguinte (Van der Lee & Gehrels, 1990):

$$h = RC \frac{R}{STo} - RC \cdot (h') \quad [2]$$

em que:

h – nível piezométrico [L]

h' - derivada de h em função do tempo [L.T<sup>-1</sup>]

RC – coeficiente de recessão [T]

R – recarga [L.T<sup>-1</sup>]

STo – coeficiente de Armazenamento

Esta equação é uma função linear que pode ser resolvida em função do tempo como se indica:

$$h_t = h_{t-1} - \frac{TS}{RC} h_k + TS \frac{R}{STo} \quad [3]$$

em que:

k = intervalo de tempo

TS – time step

método explícito (incrementos de tempo negativos): k = t-1

método implícito (incrementos de tempo positivos): k = t

O coeficiente de recessão RC é proporcional ao Coeficiente de armazenamento e à resistência à percolação (DR), podendo ser descrito pela fórmula (Van der Lee, 1989):

$$RC = B \cdot STo \cdot DR \quad [4]$$

em que:

B – coeficiente de proporcionalidade

A equação [3] foi largamente aplicada na Holanda como um modelo independente com resultados muito satisfatórios. O modelo utiliza a solução implícita (Van der Lee & Gehrels, 1990).

O modelo EARTH está vocacionado para climas secos com precipitações concentradas em determinados períodos e para aquíferos freáticos ou não confinados, com respostas rápidas aos episódios de recarga.

Os parâmetros necessários ao funcionamento do modelo foram obtidos da bibliografia existente sobre o Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Costa, 1987; Duque, 1997 e Paralta, 2001) e trabalhos de campo recentes do primeiro autor desta comunicação.

Utilizaram-se registos diários de precipitação e evapotranspiração potencial, determinada pelo método de Penman-Monteith da FAO (Allen et al., 1998), para os anos hidrológicos de 2001 a 2003

### 2.3 Balanço Hídrico Sequencial Diário – Modelo BALSEQ

O modelo BALSEQ (Lobo Ferreira, 1981) é um modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário a nível do solo, desenvolvido em 1981 por Lobo Ferreira para a estimativa da recarga de águas subterrâneas na ilha de Porto Santo. O fluxograma deste modelo apresenta-se na Figura 3. Este modelo já teve diversas aplicações a nível nacional (p. ex. na ilha de Porto Santo (Lobo Ferreira *et al.*, 1981), ou na península de Setúbal (Oliveira *et al.*, 1994)), e a nível internacional (p. ex. na Índia, no concelho de Bardez, estado de Goa (Chachadi *et al.*, 2001) ou em Kakinada (Chachadi *et al.*, 2002)). Apresentam-se resumidamente os fundamentos do método.

Para o caso de uma área onde não exista recarga artificial, não haja escoamento superficial a entrar na área e o nível freático se encontre sempre abaixo da profundidade do solo sujeita a evapotranspiração, a equação de balanço hídrico para o solo nessa área pode expressar-se por:

$$P - ETR - DA_f - E_d - I_p = e \quad [5]$$

onde P é a precipitação, ETR é a evapotranspiração, DA<sub>f</sub> é a variação (*final - inicial*) do armazenamento de água no solo, E<sub>d</sub> é o escoamento superficial, I<sub>p</sub> é a infiltração profunda (infiltração abaixo da espessura do solo) e e é o erro de cálculo do balanço.

O balanço hídrico sequencial mede ou estima os termos  $P$ ,  $ETR$ ,  $E_d$  e  $DA_i$ , calculando  $I_p$  pela resolução da Eq. 5 considerando  $e = 0$ .

Assume-se posteriormente que a recarga ( $R$ ) é igual à infiltração profunda ( $I_p$ ):

$$R = I_p = P - ETR - DA_i - E_d \quad [6]$$

Para a aplicação sequencial desta fórmula, é necessário conhecer os valores de  $P$  e da evapotranspiração potencial ( $ETP$ ) referidos a cada intervalo de tempo do balanço, assim como do valor da quantidade máxima de água no solo disponível para evapotranspiração ( $AGUT$ ):

$$AGUT = (c_c - p_e) \cdot r_p \quad [7]$$

onde  $c_c$  é a capacidade de campo do solo,  $p_e$  é o ponto de emurchecimento e  $r_p$  é a profundidade do solo sujeita a evapotranspiração (normalmente a profundidade das raízes das plantas).

Para estimar o escoamento superficial utiliza-se o método do United States Soil Conservation Service (USSCS), que define o número característico de escoamento ( $NC$ ) em função do tipo de solo e do uso do solo. Os valores de  $NC$  variam entre 0 (correspondendo a um solo de permeabilidade vertical infinita, em que toda a água se infiltra no solo), e 100 (que corresponde a uma zona completamente impermeável). Na Figura 3 apresenta-se a fórmula de cálculo do escoamento superficial.

Para a caracterização do tipo de solo consideram-se quatro classes (A a D):

Os solos tipo A apresentam baixo potencial de escoamento directo e elevadas intensidades de infiltração, mesmo quando completamente humedecidos. Incluem principalmente areias profundas com drenagem boa ou excessiva. Possuem uma elevada transmissividade.

Os solos do tipo B apresentam potencial de escoamento directo abaixo da média e intensidades de infiltração moderadas, quando completamente humedecidos. Incluem principalmente solos medianamente profundos, com textura moderadamente fina e moderadamente grosseira, e medianamente drenados. Possuem uma transmissividade média.

Os solos do Tipo C têm potencial de escoamento directo acima da média e baixas intensidades de infiltração, quando completamente humedecidos. Incluem principalmente solos com camadas impermeáveis subjacentes e solos com textura moderadamente fina. Estes solos possuem uma transmissividade baixa.

Os solos do tipo D apresentam um potencial de escoamento directo elevado e intensidades de infiltração muito baixas quando completamente humedecidos. Incluem essencialmente solos argilosos expansíveis, solos com o nível freático permanentemente próximo da superfície e solos com substratos impermeáveis a pouca profundidade. Estes solos possuem uma transmissividade muito baixa.

Oliveira *et al* (1997) caracterizaram os solos nas classes A a D em função das descrições dos solos representados nas cartas de solos de Portugal à escala 1:50 000. Utilizando as mesmas descrições os mesmos autores caracterizam os parâmetros  $c_c$  e  $p_e$  que são utilizados para o cálculo do  $AGUT$ .

Com base na cartografia Corine Land Cover e nas tabelas do USSCS, Vermeulen *et al.* (1993) apresentaram uma tabela do parâmetro  $NC$  em função da legenda dessa carta e do tipo de solo (A a D). Também com base na cartografia Corine Land Cover os mesmos autores apresentam os valores aproximados da profundidade do solo sujeita a evapotranspiração ( $r_p$ ).

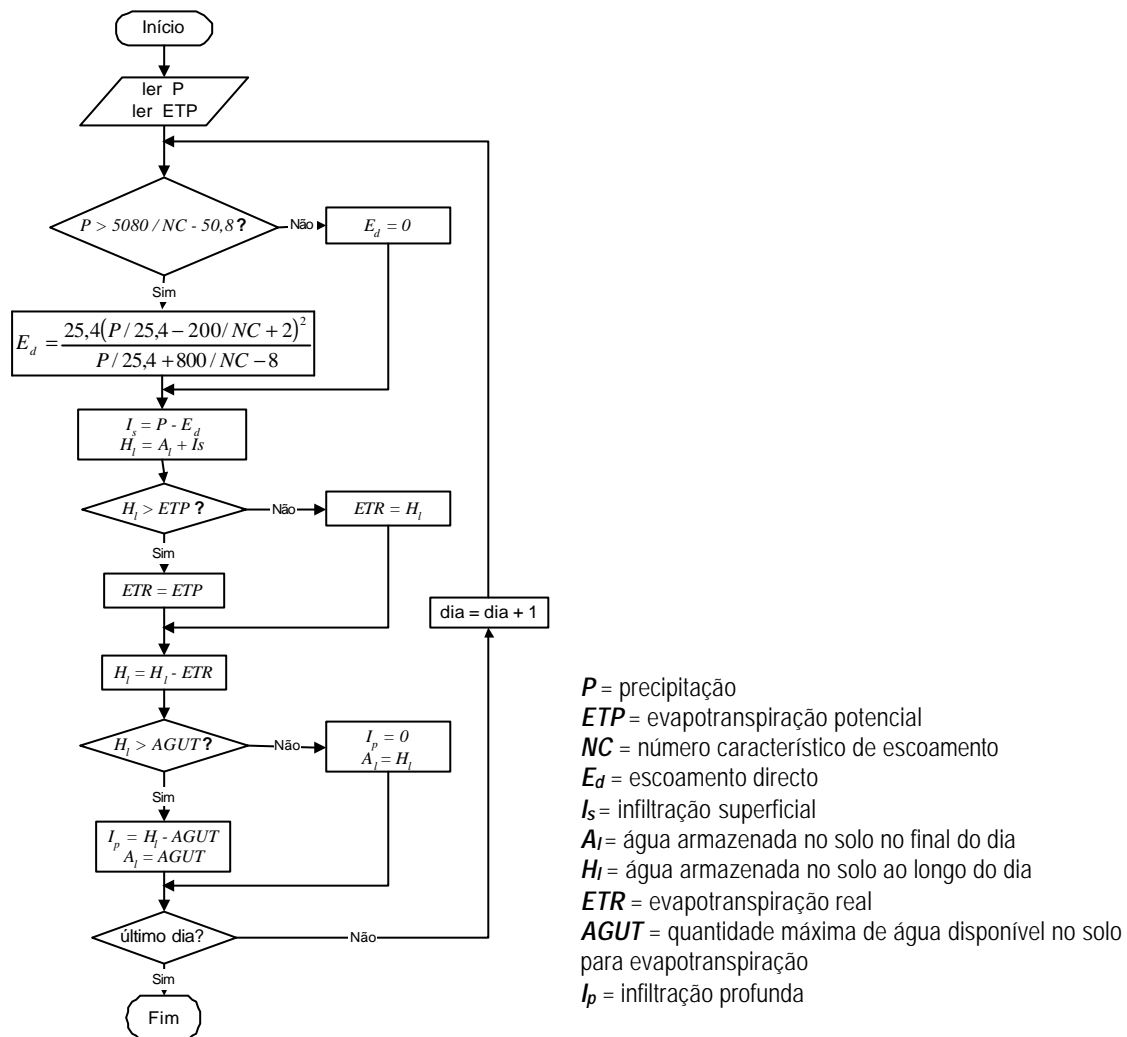


Figura 3 - Fluxograma de funcionamento do modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ.

O modelo BALSEQ permite estimar a infiltração profunda diária. Assumindo que não há camadas menos permeáveis na zona vadosa abaixo do solo, o valor da infiltração profunda calculado para cada dia traduzirá o valor de recarga que ocorrerá mais tarde.

As variáveis  $c_c$ ,  $p_e$ ,  $r_p$  e tipo de solo, definidas a partir das tabelas referidas anteriormente em função dos solos existentes na área de estudo e da ocupação do solo assumem os valores apresentados no Quadro I. A ocupação do solo na área de estudo é feita pela cultura de cereais (trigo).

Quadro I – Caracterização das variáveis  $c_c$ ,  $p_e$ ,  $r_p$  tipo de solo e AGUT.

Solo	cc (-)	pe (-)	rp (mm)	AGUT	tipo de solo
Bp	0,307	0,140	500 - 600	83 - 100	D
Bpc	0,398	0,195		101 - 122	D
Cp	0,415	0,204		105 - 127	D

Dado o intervalo de valores apresentados, optou-se por correr o modelo BALSEQ para valores de AGUT de 100 e 120 mm (capacidade de campo). A cultura de cereais num solo do tipo D permite caracterizar o NC com o valor de 85.

Utilizaram-se registos diários de precipitação e evapotranspiração potencial, considerada igual à evapotranspiração de referência, determinada pelo método de Penman-Monteith da FAO (Allen et al., 1998) para o período entre Setembro de 2001 e Julho de 2003 na região de Beja.

## 2.4 Quantificação das Extracções.

A longo prazo, num sistema em equilíbrio, as extracções de águas subterrâneas equivalem à recarga que ocorre na zona de influência das captações. Por esse motivo, o somatório das extracções é um bom estimador da recarga que ocorreu, com a vantagem de ter um grau elevado de exactidão por ser uma variável mensurável, com possibilidade de não comportar erros de medição.

## 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 3.1 Traçadores Químicos - Balanço de Cloretos.

Para a aplicação desta metodologia dispõe-se de um conjunto total que é constituído por 66 amostras de Duque (1997), colhidas no Verão de 1995 e por 35 amostras provenientes da área de Beja, entre 1997 e 1998 (Paralta, 2001). Acrescem ainda 54 determinações efectuadas no sector Serpa-Brinches, entre 1997 e 2002 (Serra, 2002), perfazendo um total de 155 determinações do ião cloreto em mais de uma centena de origens de água subterrânea.

O Quadro II indica a distribuição estatística do teor em cloreto das amostras consideradas.

Quadro II  
Estatística do teor em Cloreto no SA dos Gabros de Beja (mg/L)

Amostras	Mínimo	Q <sub>1</sub>	Mediana	Média	Q <sub>3</sub>	Máximo	Desv. Padrão
155	13.0	22.0	32.5	48.2	59.4	235.0	39.8

Relativamente à ocorrência de cloretos na água da chuva dispõem-se de 25 amostras colhidas entre 1997 e 2003 nas localidades de Beja (7 amostras), Serpa (5 amostras) e Ferreira do Alentejo (13 amostras).

O Quadro III indica a distribuição estatística do teor em Cloreto na água da chuva.

Quadro III  
Estatística do teor em Cloreto na água da chuva do SA dos Gabros de Beja (mg/L)

Amostras	Mínimo	Q <sub>1</sub>	Mediana	Média	Q <sub>3</sub>	Máximo	Desv. Padrão
25	0.4	2.2	3.4	4.2	5.5	13.4	3.3

Não considerando os valores extremos, resulta da aplicação da expressão [1] para o intervalo inter-quartil, Q<sub>1</sub> a Q<sub>3</sub>, uma infiltração eficaz na ordem dos 10% da precipitação média anual.

### 3.2 Balanço Hídrico Sequencial Diário – Modelo EARTH

Os valores obtidos pelo modelo EARTH encontram-se ainda em processo de calibração com as observações piezométricas disponíveis de 3 piezómetros, monitorizados regularmente pelo IGM desde 2001. Os resultados preliminares apontam, no entanto, para valores de recarga bastante superiores aos dos restantes métodos e serão apresentados oralmente durante o 6º SILUSBA.

### 3.3 Balanço Hídrico Sequencial Diário – Modelo BALSEQ

De acordo com as características hidráulicas dos Barros de Beja, optou-se por correr o modelo BALSEQ para valores de AGUT (capacidade de campo) de 100 e 120 mm. A cultura de cereais num solo do tipo D permite caracterizar o NC com o valor de 85.

Utilizaram-se registos diários de precipitação e a evapotranspiração potencial, considerada igual à evapotranspiração de referência determinada pelo método de Penman-Monteith da FAO (Allen et al., 1998), para o período entre Setembro de 2001 e Julho de 2003 na região de Beja. Desta forma foi possível calcular a recarga para os anos hidrológicos de 2001/2002 e 2002/2003.

Os resultados obtidos do balanço hídrico sequencial diário estão resumidos nos Quadros IV e V que indicam os valores anuais e mensais respectivamente, considerando uma capacidade de campo de 100 e 120 mm.

Quadro IV  
Recarga anual na região de Beja para os anos hidrológicos de 2001/2002 e 2002/2003

Ano Hidrológico (cc = 100 mm)	Prec. (mm)	Recarga (mm)	Recarga (%)	Ano Hidrológico (cc = 120 mm)	Prec. (mm)	Recarga (mm)	Recarga (%)
2001/2002	651,8	36,4	5,6	2001/2002	651,8	16,5	2,5
2002/2003	537,1	82,2	15,3	2002/2003	537,1	62,2	11,6
<b>Média</b>	594,5	59,3	10,5	<b>Média</b>	594,5	39,4	7,1

Quadro V  
Recarga mensal na região de Beja para os anos hidrológicos de 2001/2002 e 2002/2003

MÊS	Out-01	Nov-01	Dez-01	Jan-02	Fev-02	Mar-02	Abr-02	Mai-02	Jun-02	Jul-02	Ago-02	Set-02	TOTAL
Recarga (cc = 100 mm)	0	0	0,06	14,0	0	22,5	0	0	0	0	0	0	36,4
Recarga (cc = 120 mm)	0	0	0	0	0	16,5	0	0	0	0	0	0	16,5
MÊS	Out-02	Nov-02	Dez-02	Jan-03	Fev-03	Mar-03	Abr-03	Mai-03	Jun-03	Jul-03	Ago-03	Set-03	TOTAL
Recarga (cc = 100 mm)	0	0	35,7	40,9	5,6	0	0	0	0	0	0	0	82,2
Recarga (cc = 120 mm)	0	0	15,7	40,9	5,6	0	0	0	0	0	0	0	62,2

Uma análise expedita dos resultados obtidos com o modelo BALSEQ, indica que apesar do ano hidrológico de 2001/2002 ter uma precipitação cerca de 20% superior ao ano hidrológico de 2002/2003, a recarga correspondente é muito inferior à do actual ano hidrológico, em virtude da distribuição sazonal da precipitação e, em especial dos episódios torrenciais.

Para efeitos de gestão de recursos hídricos numa base anual ou de ano hidrológico, o balanço hídrico sequencial diário é a única forma rigorosa de avaliar as disponibilidades aquíferas.

Admitindo uma capacidade de campo entre 120 e 100 mm, obtém-se uma recarga média anual que pode variar entre os 3 e os 15%, com valores médios para os 2 últimos anos hidrológicos entre 7 e 11%.

A figura 4 indica a distribuição diária da recarga na região de Beja para os anos hidrológicos de 2001/2002 e 2002/2003, considerando uma capacidade de campo de 100 mm.

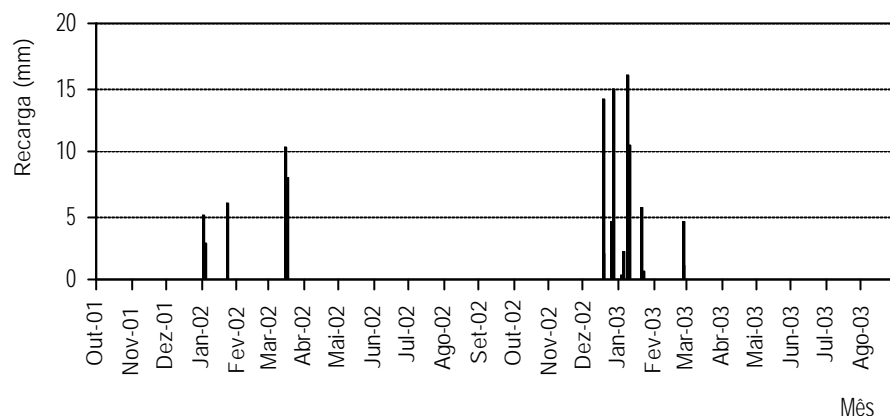


Figura 4 – Distribuição da recarga em Beja nos anos hidrológicos de 2001/2002 e 2002/2003.

Uma análise mais atenta do gráfico obtido com o modelo BALSEQ para uma capacidade de campo de 100 mm indica que nos últimos dois anos hidrológicos ocorreram apenas 20 dias de recarga, o que em termos médios significa 59.3 mm/ano (10.5%). O Quadro VI indica a distribuição dos episódios de recarga.

Quadro VI

Dias com eventos de recarga na região de Beja nos anos hidrológicos de 2001/2002 e 2002/2003

	Recarga (< 5 mm)	Recarga (5 mm – 10 mm)	Recarga (10 mm – 15 mm)	Recarga (> 15 mm)	Total
Episódios de Recarga (dias)	10	5	4	1	20

Admitindo uma capacidade de campo de 120 mm, o número de dias de recarga nos dois últimos anos diminui para 13, correspondente a uma recarga média anual de 39.4 mm (7.1%)

### 3.4 Quantificação das Extracções

Nas 16 captações municipais de Beja eram captados entre 4 000 a 5 000 m<sup>3</sup> de água subterrânea diariamente, antes da entrada em funcionamento da adução a partir da albufeira do Rôxo em 1985, o que representa em termos médios, a extracção de 1 650 000 m<sup>3</sup> de água subterrânea por ano, mesmo em épocas de estiagem.

A área de recarga ou zona de afluência das captações representa no total 20 km<sup>2</sup>, o que significa, em termos médios, que 1 km<sup>2</sup> do aquífero gabro-diorítico pode fornecer cerca de 80 000 m<sup>3</sup> de água subterrânea por ano, embora este valor seja difícil de manter durante os meses de Verão e mais ainda após períodos plurianuais de seca (Paralta, 2000).

Fazendo o balanço entre as extracções anuais de água subterrânea (1 650 000 m<sup>3</sup>) e a precipitação média anual (584 mm) na área considerada (20 km<sup>2</sup>) que terá sido de 11.7 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (Estação Meteorológica de Beja, séries 1958-88, AGRIBASE, Ministério da Agricultura), verifica-se que as extracções representavam 14% da precipitação média anual. Não foram, no entanto, contabilizados os

consumos para agricultura, pelo que os valores de produtividade aquífera apontados serão seguramente superiores, bem como a recarga (Paralta, 2001).

A consulta de um relatório dos serviços de prospecção geofísica do exército alemão estacionado em Beja indica igualmente valores de recarga do sistema entre 10 e 20%.

#### 4. DISPONIBILIDADES HÍDRICAS E IMPLICAÇÕES AGRO-AMBIENTAIS

Com base no mapa de polígonos de Thiessen de Duque (1997), que considera a precipitação média anual de 6 estações que enquadram o SA dos Gabros de Beja (séries de precipitação entre 1955/56 e 1995/96) e admitindo uma taxa de recarga anual entre 10 e 20 %, obtém-se para o aquífero, em termos médios, recursos hídricos subterrâneos renováveis anualmente entre  $18.8 \times 10^6 \text{ m}^3$  e  $37.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Constata-se, em termos gerais, que a recarga deverá situar-se entre um mínimo de  $50 \text{ L/m}^2/\text{ano}$  e um máximo na ordem dos  $115 \text{ L/m}^2/\text{ano}$  (Figura 5).

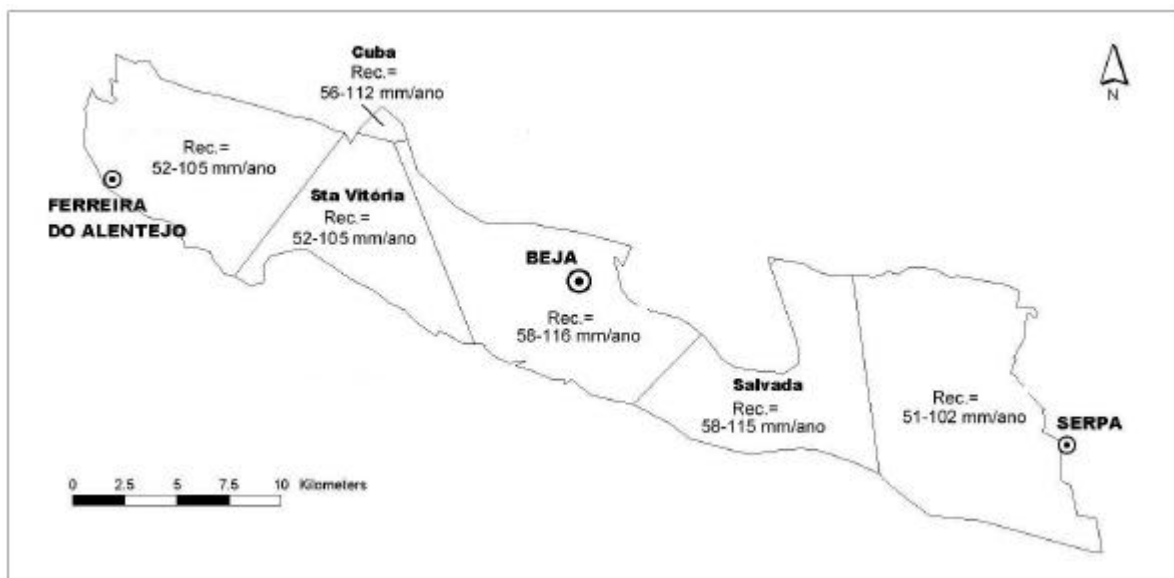


Figura 5 – Recarga anual do SA dos Gabros de Beja.

No entanto, esta abordagem regional da recarga pode não ser muito rigorosa em virtude das alterações locais das características do solo (ex. presença de caliços), ocupação agrícola e arbórea, geomorfologia (declive), espessura da zona vadosa e extensão da área afecta a novos regadios. Será igualmente de considerar as áreas impermeáveis dos aglomerados urbanos e a irregularidade climática, em especial a distribuição temporal dos episódios torrenciais de precipitação.

Os recursos hídricos subterrâneos do complexo gabro-diorítico podem assegurar grande parte do abastecimento público aos concelhos de Ferreira do Alentejo, Beja e Serpa. Actualmente, apenas Ferreira do Alentejo depende exclusivamente das águas subterrâneas para abastecimento público, enquanto a cidade de Beja e a vila de Serpa utilizam origens mistas.

O principal constrangimento em relação à produção de água para consumo humano a partir dos recursos hídricos subterrâneos relaciona-se com teores em nitratos que frequentemente ultrapassam os limites legalmente consignados.

Os processos naturais resultantes da interacção água-rocha no SA dos Gabros de Beja são responsáveis pela fácies carbonatada e algo dura, enquanto a contaminação difusa resultante de práticas agrícolas e elevadas taxas de evapotranspiração podem ser relacionadas com a ocorrência de elevadas condutividades e nitratos e ainda cloretos e sulfatos em concentrações anómalas.

As implicações agro-ambientais da distribuição episódica e concentrada dos eventos de recarga durante o semestre húmido, como ficou demonstrado pela aplicação do modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ, são inúmeras.

A irregularidade climática, com frequentes regimes torrenciais, provocam a lixiviação precoce dos fertilizantes e o facto das épocas de fertilização coincidirem com o semestre húmido ou seja com o período de recarga útil dos aquíferos (em especial durante o trimestre Jan-Mar/Abril), provocam alterações sazonais e cumulativas na qualidade da água subterrânea do SA dos Gabros de Beja.

Apesar da ocupação agrícola se basear predominantemente na monocultura cerealífera extensiva, as dotações médias de Azoto são importantes, entre 100 a 120 kg/ha/ano, principalmente distribuídas pelos meses de Novembro/Dezembro (adubação de fundo) e Fevereiro/Março (adubação de cobertura).

A monitorização periódica, entre 1997 e 2000, do teor em nitratos em dezenas de origens de água subterrânea nos arredores de Beja evidenciou que ocorrem perdas importantes de Azoto do sistema solo-planta, para o meio freático, com a predominância sistemática de valores acima de 50 mg NO<sub>3</sub>/L. A mediana relativa a 3 anos de monitorização situou-se entre 53 e 86 mg NO<sub>3</sub>/L. Constatou-se que os valores médios mais elevados se verificaram entre Março e Junho de 1998 e entre Março e Julho de 2000 (Paralta, 2001).

Estudos idênticos, sobre vulnerabilidade e susceptibilidade à poluição do sector oriental do SA dos Gabros de Beja, situado na margem esquerda do Rio Guadiana e sem ligação hidráulica ao restante aquífero, apontam igualmente para uma situação preocupante de contaminação difusa por nitratos de origem agrícola, normalmente acima do VMA para consumo humano, que pode ser relacionada com a evolução do ano hidrológico e do ano agrícola (Paralta & Francês, 2000; Serra *et al.*, 2003).

## 5. CONCLUSÕES

A aplicação de várias metodologias permitiu definir um intervalo de recarga média anual para o Sistema Aquífero dos Gabros de Beja entre 10 e 20% da precipitação e elaborar o respectivo mapa de recarga.

No estado actual dos conhecimentos, considera-se que o intervalo indicado constitui uma estimativa aceitável para a elaboração de cálculos das disponibilidades hídricas para uma gestão racional do SA dos Gabros de Beja, numa perspectiva de sustentabilidade do recurso, tanto ao nível da quantidade como da qualidade para diversas utilizações

Os resultados obtidos com o modelo BALSEQ e pelo método do Balanço de Cloretos são concordantes, apontando para uma recarga na ordem dos 10%. A partir das extracções municipais contabilizadas na bacia hidrográfica de Pisões obteve-se uma estimativa de recarga de, pelo menos, 14%. Há que ter em atenção que os resultados do modelo BALSEQ se referem aos dois anos hidrológicos mais recentes, enquanto que os resultados obtidos pelos outros dois métodos representam valores médios para séries temporais mais longas.

De acordo com o padrão de distribuição da precipitação na região, conclui-se, em termos gerais, que a recarga média anual deverá situar-se entre um mínimo de 50 L/m<sup>2</sup> e um máximo na ordem dos 115 L/m<sup>2</sup>. Integrando para a área total do sistema aquífero, obtém-se, em termos médios, recursos hídricos subterrâneos renováveis anualmente entre 18.8 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> e 37.5 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

Os eventos de recarga episódica e concentrada durante o semestre húmido coincidem com as épocas de fertilização (em especial durante o trimestre Jan-Mar/Abril) provocando a lixiviação precoce dos fertilizantes do solo para a zona saturada.

Esta situação ficou demonstrada pela monitorização periódica, entre 1997 e 2000, do teor em nitratos em dezenas de origens de água subterrânea nos arredores de Beja em que a mediana relativa a 3 anos de monitorização oscilou entre 53 e 86 mg NO<sub>3</sub>/L. Constatou-se que os valores médios mais elevados se verificaram entre Março e Junho de 1998 e entre Março e Julho de 2000

Estas evidências indicam que o Sistema Aquífero dos Gabros de Beja constitui um aquífero vulnerável, sujeito a contaminação difusa por nitratos de origem agrícola, que importa continuar a monitorizar no sentido de inverter a situação actual, de acordo com as directivas nacionais e europeias, em especial a Directiva Quadro da Água (2000/60/EC) e a directiva relativa à protecção das águas contra a poluição por nitratos (Directiva 91/676/CEE de 12 de Dezembro de 1991).

### **Agradecimentos**

O primeiro autor agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia do MCES a atribuição da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/10361/2002 que tem permitido a continuação dos trabalhos de investigação. Um agradecimento especial é devido ao técnico de campo do IGM, Amílcar Bartolomeu e ao estudante de mestrado do ITC, Rafael Cortez pela sua contribuição nos trabalhos de campo e no esforço de modelação.

### **Bibliografia**

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. & Smith, M. (1998) – "Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements", FAO, Irrigation and Drainage Paper, nr. 56.
- Chachadi, A.G., Moinante, M.J. & Oliveira, M.M., (2002) – Measuring, Monitoring and Managing Sustainability: The Coastal Dimension – Coastin. Gis and Mathematical Modelling for the Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution: Application to an Indian Case-Study Area in Kakinada. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 279/02 – GIAS, October/2002, 43 pp.
- Chachadi, A.G., Raikar, P.S., Lobo Ferreira, J.P. & Oliveira, M.M. (2001) – GIS and Mathematical Modelling for the Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution: Application to an Indian Case Study Area in Goa. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 115/01-GIAS, April 2001 (69 pp).
- Costa, A. M. (1987) – Exploração racional dos recursos hídricos subterrâneos para reforço do abastecimento a Beja. Livro do 2º Congresso sobre o Alentejo. Beja, I volume, pp.383-388.
- CCR Alentejo (2003) – Projecto de Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo. Relatório Final. CCR Alentejo, Évora, 2003.
- Duque, J. M. (1997) – Caracterização hidrogeológica e modelação matemática do aquífero dos Gabros de Beja. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa, 210 pp.

- Gouweleeuw B. T. (2000) – Satellite passive microwave surface moisture monitoring. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam. The Netherlands.
- Lobo Ferreira, J.P. (1981) - "Mathematical model for the evaluation of the recharge of aquifers in semiarid regions with scarce (lack) hydrogeological data". Proceedings of Euromech 143/2-4 Setp. 1981, Rotterdam, A.A. Balkema (Ed. A. Verruijt e F.B.J. Barends).
- Lobo Ferreira, J.P., Baptista, J.M., Rodrigues, J.D. & Cunha, L.V. (1981) - "Estudo global dos recursos hídricos da ilha do Porto Santo". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Oliveira, M.M.; Moinante, M.J. & Lobo-Ferreira, J.P. (1994) - "Estudo da Caracterização dos Aquíferos e dos Consumos de Água na Península de Setúbal. Contribuição do LNEC para o Relatório da HP a Entregar à EPAL em Fevereiro de 1994. Relatório Final". Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Relatório 37/94 – GIAS.
- Paralta, E. & Francés, A. (2000) - Caracterização hidrogeológica e avaliação da vulnerabilidade à poluição do complexo gabro-diorítico de Serpa-Brinches (sector oriental do sistema aquífero dos Gabros de Beja). GeoNovas, nº14, Porto, pp. 27-35.
- Paralta, E. & Ribeiro, L. (2000) - Análise variográfica e cartografia de risco da contaminação por nitratos na região de Beja. Recursos Hídricos, APRH, vol. 21, nº3, Lisboa, pp. 47 – 58.
- Paralta (2001) – Hidrogeologia e Modelação Estocástica da Contaminação por Nitratos do Aquífero Gabro-diorítico da Região de Beja. Tese de Mestrado em Georrecursos. IST/Centro de Geo-Sistemas, Lisboa, 157 pp.
- Paralta, E. & Ribeiro, L. (2003) - Monitorização e Modelação Estocástica da Contaminação por Nitratos do Aquífero Gabro-diorítico na Região de Beja – Resultados, Conclusões e Recomendações. Seminário sobre Águas Subterrâneas. LNEC, 27-28 de Fevereiro de 2003, Lisboa, 30 pp.
- Serra, E. (2002) – Vulnerabilidade e risco de poluição agrícola no sistema aquífero dos Gabros de Beja (sector da margem esquerda do rio Guadiana). Trabalho Final de Curso de Licenciatura em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 87 pp.
- Serra, E.; Paralta, E.; Nascimento, J. & Ribeiro, L. (2003) – Análise Comparativa de Dois Índices de Poluição Agrícola no Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Sector da Margem Esquerda do Rio Guadiana). Seminário sobre Águas Subterrâneas. LNEC, 27-28 de Fevereiro de 2003, Lisboa, 18 pp.
- Van der Lee & Gehrels, J. C. (1990) – Modelling Aquifer Recharge. Introduction to the Lumped Parameter Model EARTH. Hydrological Report, Free University of Amsterdam. The Netherlands, 1990, 30 pp.
- 2000/60/EC – Directiva Quadro da Água. Jornal Oficial das Comunidades, Comissão Europeia Bruxelas, 22 de Dezembro de 2000.