

## Alterações Climáticas e seus Impactos em Recursos Hídricos Subterrâneos de Zonas Insulares – Metodologias de Vulnerabilidade às Alterações Climáticas

*Autores:* Maria Emília NOVO (1); João Paulo Cárcamo LOBO FERREIRA (2)

(1) Geóloga, Dr. Engenharia do Ambiente, Assistente de Investigação no LNEC, requisitada no PNDI, Av. Guerra Junqueiro, 5180-104 Freixo Espada Cinta, Portugal, 279658130, [oisinhelios@yahoo.com](mailto:oisinhelios@yahoo.com); (2) Engº Civil, Dr.Eng. Engenharia Civil, Investigador-coordenador no LNEC, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, tel: 21 844 3609, email: [lferreira@lnec.pt](mailto:lferreira@lnec.pt)

### Resumo:

Neste artigo analisam-se alguns efeitos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos insulares numa ilha vulcânica de pequena dimensão (ilha Terceira), em termos de vulnerabilidade de aquíferos a estas mesmas alterações climáticas. A vulnerabilidade dos aquíferos estará relacionada com dois factores: (1) a subida do nível do mar e (2) modificação dos volumes e qualidade das águas disponíveis para a recarga destes mesmos aquíferos. Neste trabalho tenta-se avaliar estes dois aspectos, começando por se analisar a vulnerabilidade dos aquíferos à subida do nível do mar, utilizando para tal a metodologia GALDIT, apresentando-se zonamento da vulnerabilidade para as unidades produtivas em contacto com o mar. Para a vulnerabilidade à modificação da quantidade e qualidade das águas disponíveis para a recarga apresenta-se um primeiro esboço de proposta de metodologia de vulnerabilidade (designada como vulnerabilidade aos processos atmosféricos), a qual necessitará de trabalhos posteriores para consolidar a estrutura agora proposta.

*Palavras-chave:* alterações climáticas, recursos hídricos subterrâneos, regiões insulares, metodologia de vulnerabilidade às alterações climáticas, metodologia GALDIT.

## 1 - INTRODUÇÃO

As alterações climáticas podem afectar os recursos hídricos subterrâneos, quer através da modificação dos volumes e qualidade das águas disponíveis para a recarga, quer através das alterações do nível do mar. Se as alterações do nível do mar afectam exclusivamente os aquíferos das zonas costeiras, já as modificações na quantidade de água disponível para recarga têm uma representatividade geográfica muito maior, afectando quer aquíferos costeiros quer os aquíferos das regiões interiores.

A maioria das metodologias de vulnerabilidade às alterações climáticas desenvolvidas até ao momento aborda a questão da subida do nível do mar mas no geral esquece ou trata de forma subsidiária os aquíferos, analisando sobretudo o recuo do litoral e a submersão das zonas costeiras. A subida do nível do mar afecta os aquíferos por (1) intrusão salina e (2) perda de área/volume de armazenamento de um aquífero costeiro, em especial se este estiver confinado a áreas geográficas restritas como sejam corpos insulares. Embora muitas das metodologias de vulnerabilidade à subida do nível do mar não considerem estes aspectos, existem contudo algumas excepções em que a vulnerabilidade dos aquíferos à subida do nível do mar é o ponto focal. Um destes casos é a metodologia GALDIT.

Porém a acção das alterações climáticas sobre os aquíferos não se restringe aos efeitos da alteração do nível do mar, estendendo-se à modificação dos volumes de água para a recarga de aquíferos (e associadamente à sua qualidade), o que afecta todo o sector subterrâneo do ciclo da água. A questão da recarga tem tido um reduzido desenvolvimento nas metodologias de vulnerabilidade às alterações climáticas. Dada a importância das recargas no funcionamento dos aquíferos, procurou-se construir uma metodologia de análise da vulnerabilidade de aquíferos às alterações climáticas que considerasse (1) a subida do nível do mar e (2) a alteração das recargas/qualidade das águas disponíveis para recarga, ou seja, aquilo a que se chamou de “vulnerabilidade aos processos atmosféricos das alterações climáticas”, para separar da vulnerabilidade “à alteração do nível do mar”.

## 2 - ELABORAÇÃO DE UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

A metodologia de vulnerabilidade de aquíferos às alterações climáticas que agora se apresenta considera duas componentes:

1. **Vulnerabilidade à alteração do nível do mar** – avalia a vulnerabilidade dos aquíferos costeiros à alteração do nível do mar.
2. **Vulnerabilidade aos processos atmosféricos das alterações climáticas** – avalia a vulnerabilidade dos aquíferos, costeiros e interiores, a um conjunto de processos que afectam tanto a qualidade como a quantidade dos recursos hídricos subterrâneos. Estes processos são quer de origem natural, quer de origem antrópica, pois as acções humanas de adaptação e mitigação terão também efeitos sobre a qualidade e quantidade dos recursos hídricos. Assim, a vulnerabilidade aos processos atmosféricos das alterações climáticas é dado por um conjunto de três índices:

2A. **Índice quantidade** – reflecte a modificação na quantidade dos recursos hídricos disponíveis, a qual é afectada pela alteração (1) dos regimes de precipitação e (2) das temperaturas, que por sua vez afectam a evapotranspiração.

2B. **Índice qualidade** – reflecte a modificação da qualidade dos recursos hídricos disponíveis, que é dependente de (A) salinização por processos associados à evapotranspiração e (B) vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à poluição. Note-se que a susceptibilidade à alteração da qualidade dos recursos hídricos por efeito da intrusão salina, associada à alteração

do nível do mar, é definida na componente *Vulnerabilidade à alteração do nível do mar*. O efeito sobre a qualidade dos recursos hídricos devido às acções humanas de adaptação às alterações climáticas é definido no *Índice antrópico*.

2C. **Índice antrópico** – reflecte a modificação na qualidade e quantidade dos recursos hídricos devido a acções antrópicas de mitigação/adaptação às alterações climáticas.

Estas duas componentes da vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas (vulnerabilidade à alteração do nível do mar e vulnerabilidade aos processos atmosféricos) são abaixo descritas. Pretendeu-se desenvolver esta metodologia utilizando como caso de estudo a ilha Terceira. A vulnerabilidade à alteração do nível do mar adoptou a metodologia GALDIT e os resultados da sua aplicação à ilha Terceira são apresentados abaixo. A vulnerabilidade aos processos atmosféricos foi estruturada, sendo definidos os parâmetros, classes e índices, mas optou-se por aguardar por mais dados de campo, para validação, antes da sua aplicação à ilha Terceira.

## 2.1. Vulnerabilidade à alteração do nível do mar

A *vulnerabilidade à alteração do nível do mar* é dada pela metodologia GALDIT, que considera os seguintes parâmetros:

- **G – Ocorrência/tipo de aquíferos:** (a) Confinados, (b) Livres, (c) Semi-confinados, (d) Delimitado;
- (2) **A – Condutividade hidráulica;**
  - **L – Altura do nível de água acima do nível do mar** (deve considerar apenas as variações temporais de longo período dos níveis de água);
  - **D – Distância à linha de costa;**
  - **I – Impacto do estado actual da intrusão salina na região** (dado pela relação  $Cl/[HCO_3 + CO_3]$  em epm na água doce);
  - **T – Espessura saturada do aquífero** (a intrusão salina num aquífero livre é:  $Lc = K \times B^2 / [2 \times q \times 0,0257]$ , onde : K = permeabilidade; B = espessura aquífero, q = caudal descarregado para o mar),

sendo o cálculo do índice GALDIT dado pela expressão:

$$GALDIT = (1 \times G + 3 \times A + 4 \times L + 4 \times D + 1 \times I + 2 \times T) / 15 = \sum_{i=1}^6 [(W_i) R_i] / \sum_{i=1}^6 W_i$$

A aplicação da metodologia GALDIT ao caso de estudo da ilha Terceira implicou os seguintes critérios:

- Não se aplicou ao sistema Serra do Cume por não estar em contacto com o mar (nem no cenário mais catastrófico de subida do nível do mar),
- Consideram-se os sistemas aquíferos livres excepto o sistema Graben,
- A altura do nível de água, por ser mal conhecida, foi correlacionada com a permeabilidade das formações,
- Considerou-se a distância à linha de costa até 1000 m, para acomodar zonas de exploração situadas mais para o interior e a alta permeabilidade de muitas das formações,
- O impacto do estado actual da intrusão salina foi dado como sem intrusão para os sistemas com poucas captações e com intrusão para os com muitas captações, sendo pressuposta uma gradação de intrusão em função da permeabilidade e furos junto do litoral.

Os resultados são apresentados no Quadro 1 e nas Figs. 1 e 2.

Sistemas Aquíferos	G	A	L	D	I	T	Índice	Classe de Vulnerabilidade
Caldeira Guilherme Moniz-São Sebastião	1 x 7,5	3 x 10	4 x 10	4 x 10	1 x 10	2 x 7,5	9,50	Muito vulnerável
				4 x 7,5			8,83	Muito vulnerável
				4 x 5			8,17	Muito vulnerável
				4 x 2,5			7,50	Moderadamente vulnerável
Ribeirinha	1 x 7,5	3 x 7,5	4 x 5	4 x 10	1 x 2,5	2 x 5	6,83	Moderadamente vulnerável
				4 x 7,5			6,17	Moderadamente vulnerável
				4 x 5			5,50	Moderadamente vulnerável
				4 x 2,5			4,83	Baixamente vulnerável
Graben	1 x 10	3 x 10	4 x 5	4 x 10	1 x 7,5	2 x 7,5	8,17	Muito vulnerável
				4 x 7,5			7,50	Moderadamente vulnerável
				4 x 5			6,83	Moderadamente vulnerável
				4 x 2,5			6,17	Moderadamente vulnerável
Ignimbritos das Lajes	1 x 7,5	3 x 10	4 x 7,5	4 x 10	1 x 10	2 x 7,5	8,83	Muito vulnerável
				4 x 7,5			8,17	Muito vulnerável
				4 x 5			7,50	Moderadamente vulnerável
				4 x 2,5			6,83	Moderadamente vulnerável
Serra de Santiago	1 x 7,5	3 x 7,5	4 x 5	4 x 10	1 x 2,5	2 x 5	6,83	Moderadamente vulnerável
				4 x 7,5			6,17	Moderadamente vulnerável
				4 x 5			5,50	Moderadamente vulnerável
				4 x 2,5			4,83	Baixamente vulnerável
Central	1 x 7,5	3 x 7,5	4 x 5	4 x 10	1 x 5	2 x 5	7,00	Moderadamente vulnerável
				4 x 7,5			6,33	Moderadamente vulnerável
				4 x 5			5,67	Moderadamente vulnerável
				4 x 2,5			5,00	Moderadamente vulnerável
Labaçal-Quatro Ribeiras	1 x 7,5	3 x 10	4 x 5	4 x 10	1 x 7,5	2 x 5	7,67	Muito vulnerável
				4 x 7,5			7,00	Moderadamente vulnerável
				4 x 5			6,33	Moderadamente vulnerável
				4 x 2,5			5,67	Moderadamente vulnerável
Biscoitos-Terra Chã	1 x 7,5	3 x 10	4 x 7,5	4 x 10	1 x 2,5	2 x 7,5	8,33	Muito vulnerável
				4 x 7,5			7,67	Muito vulnerável
				4 x 5			7,00	Moderadamente vulnerável
				4 x 2,5			6,33	Moderadamente vulnerável
Santa Bárbara Superior	1 x 7,5	3 x 10	4 x 7,5	4 x 10	1 x 2,5	2 x 2,5	7,67	Muito vulnerável
				4 x 7,5			7,00	Moderadamente vulnerável
				4 x 5			6,33	Moderadamente vulnerável
				4 x 2,5			5,67	Moderadamente vulnerável
Santa Bárbara Inferior	1 x 7,5	3 x 7,5	4 x 5	4 x 10	1 x 2,5	2 x 5	6,83	Moderadamente vulnerável
				4 x 7,5			6,17	Moderadamente vulnerável
				4 x 5			5,50	Moderadamente vulnerável
				4 x 2,5			4,83	Baixamente vulnerável

Quadro 1 – Resultados do índice GALDIT para os aquíferos da ilha Terceira (Açores)

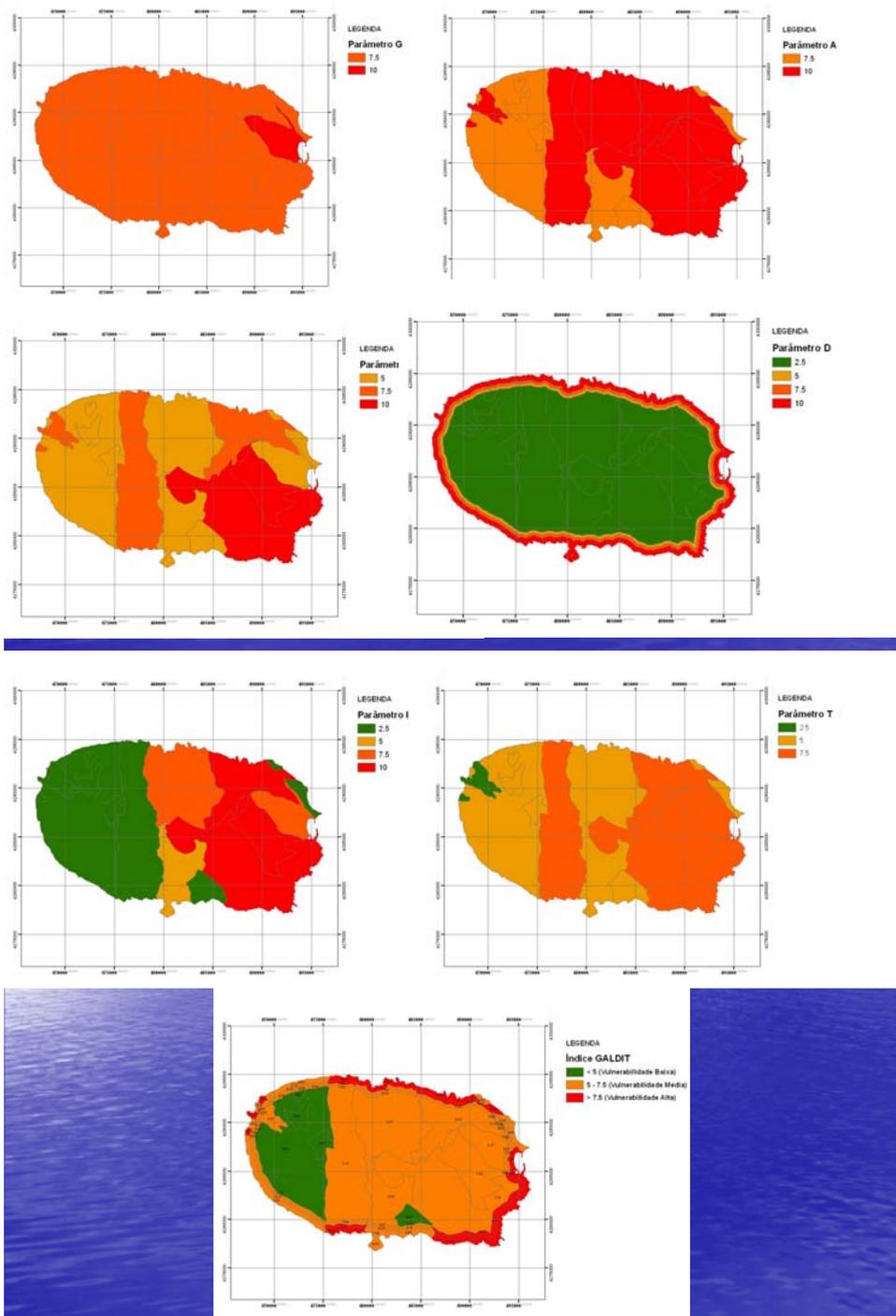


Figura 1 – Cartografia dos parâmetros G, A, L, D, I, T e índice GALDIT para os aquíferos da ilha Terceira (Açores)

## 2.2. Vulnerabilidade aos processos atmosféricos

Para a Vulnerabilidade aos processos atmosféricos das alterações climáticas, índice Quantidade, consideraram-se os seguintes parâmetros: (1) **Variação da recarga**: reflecte a mudança das recargas com as alterações climáticas (aquíferos diferentes têm variações distintas de recarga); (2) **NC**: reflecte as zonas de ESC máximo e nulo (zonas de recarga) e as características intrínsecas do terreno que controlam a infiltração; (3) **Área do**

**aquífero:** relacionado com a extensão do aquífero e sua resiliência à estiagem (volume de armazenamento); (4) **Espessura do aquífero:** parâmetro associado à extensão do aquífero; (5) **Porosidade eficaz:** relacionada com o volume de armazenamento; (6) **Tempo de residência:** associado com a velocidade de circulação e esgotamento; relaciona-se com a susceptibilidade à estiagem; (7) **Ligação hidráulica com outros aquíferos:** relaciona-se com os volumes perdidos para aquíferos subjacentes. A estrutura do índice é dada pelo Quadro 2, sendo este calculado por:

$$AC1 = (4 \times \Delta RAQ + 4 \times NC + 3 \times Ar + 3 \times Ep + 3 \times Pe + 1 \times Tr + 1 \times Dr)/18$$

Parâmetro	Classes	Índices
Variações da recarga ( $\Delta RAQ$ ) (em %)	> 35	10
	15 – 35	7
	5 – 15	4
	< 5	1
NC	100 – 75	10
	75 – 50	7
	50 – 35	4
	< 35	1
Área do Aquífero ( $Ar$ ) (em km <sup>2</sup> )	< 10	10
	10 – 30	5
	> 30	1
Espessura do aquífero ( $Ep$ ) (em m)	< 10	10
	10 – 20	5
	> 20	1
Porosidade eficaz ( $Pe$ ) (em %)	< 5	10
	5 – 11	7
	10 – 20	4
	> 20	1
Tempos de residência ( $Tr$ ) (em dias)	< 30	10
	30 – 90	5
	> 80	1
Ligação hidráulica com outros aquíferos ( $Dr$ )	Sim	10
	Não	1

Índice	Classe de Vulnerabilidade
7 – 10	Alta
4 – 7	Média
1 – 4	Baixa

Quadro 2 – Estrutura do índice Quantidade/Vulnerabilidade aos processos atmosféricos das alterações climáticas

Para a Vulnerabilidade aos processos atmosféricos das alterações climáticas, índice Qualidade, consideraram-se os seguintes parâmetros: (1) **Volumes de recarga:** controlam o avanço da cunha salina e também o de lavagem do aquífero; (2) **Distância à superfície do solo:** reflecte o potencial para processos de capilaridade/salinização da zona vadosa; (3) **Taxa de subida local do nível do mar:** define o potencial de avanço da cunha salina (e o recuo da linha de costa e perda de volume de aquífero); (4) **Distância à linha de**

**costa:** controla o impacto da intrusão salina; (5) **Condutividade hidráulica:** o avanço da intrusão salina depende da condutividade; (6) **Altura do nível de água acima do nível do mar:** define o equilíbrio hidrostático entre a água doce e a água salgada; (7) **Espessura do aquífero:** controla o avanço da cunha salina; (8) **Carga poluente no escoamento superficial:** reflecte o arraste de poluentes por condições alteradas de ESC. A estrutura do índice é dada pelo Quadro 3, sendo este calculado por:

$$AC2 = (4 \times VRAQ + 2 \times Prof + 3 \times Mar + 4 \times D + 3 \times K + 4 \times L + 2 \times Ep + 2 \times ESCp)/24$$

Parâmetro	Classes	Índices
Volumes de recarga (VRAQ) (em hm <sup>3</sup> )	> 100	10
	50 – 100	7,5
	20 – 50	5
	< 20	1
Distância à superfície do solo (Prof) (em m)	< 10	10
	10 – 20	5
	> 20	1
Taxa de subida local do nível do mar (Mar)	> 1,5	10
	1 – 1,5	7,5
	0,5 – 1	5
	< 0,5	1
Distância à linha de costa (D) (em m)	< 500	10
	500 – 750	7,5
	750 – 1 000	5
	> 1 000	1
Condutividade hidráulica (K) (em m/d)	> 1 000	10
	100 – 1 000	7,5
	50 – 100	5
	< 50	1
Altura do nível de água acima do nível do mar (L) (em m)	< 1	10
	1 – 1,5	7,5
	1,5 – 2	5
	> 2	1
Espessura do aquífero (Ep) (em m)	> 10	10
	7,5 – 10	7,5
	5 – 7,5	5
	< 5	1
Carga poluente no escoamento superficial (ESCp) (em mg/l azoto)	> 150	10
	50 – 150	5
	< 50	1

Índice	Classe de Vulnerabilidade
7 – 10	Alta
4 – 7	Média
1 – 4	Baixa

Quadro 3 – Estrutura do índice Qualidade/Vulnerabilidade aos processos atmosféricos das alterações climáticas

Para a Vulnerabilidade aos processos atmosféricos das alterações climáticas, índice Antrópico, consideraram-se os seguintes parâmetros: (1) Stress hídrico: reflecte os desequilíbrios sobre os aquíferos provocados pelas alterações de consumos associados às

alterações climáticas; (2) CBO: reflecte o impacto da poluição/carga orgânica devido à actividade humana associada a medidas de adaptação às alterações climáticas; (3) Cloretos: reflecte o impacto da poluição/salinização devido à actividade humana associada a medidas de adaptação às alterações climáticas. Embora a variação da vegetação controle a extracção de água na zona vadosa e o escoamento, sendo um aspecto importante da acção antrópica, nesta fase do desenvolvimento da metodologia em função da actividade humana de adaptação/mitigação às alterações climáticas. A estrutura do índice é dada pelo Quadro 4, sendo este calculado por:

$$AC3 = (2 \times Sh + 1 \times CBO + 1 \times CI)/4$$

Parâmetro	Classes	Índices
Stress hídrico (Sh) (em % consumo sobre recarga total)	100 – 70	10
	70 – 50	7
	50 – 30	4
	< 30	1
CBO (em mg/l)	> 5 000	10
	750 – 5 000	5
	< 750	1
Cloretos (CI) (em mg/l)	> 1 000	10
	1 000 – 250	5
	< 250	1

Índice	Classe de Vulnerabilidade
7 – 10	Alta
4 – 7	Média
1 – 4	Baixa

Quadro 4 – Estrutura do índice Antrópico/Vulnerabilidade aos processos atmosféricos das alterações climáticas

A Vulnerabilidade aos processos atmosféricos das alterações climáticas é assim dado pelo somatório dos índices quantitativo, qualitativo e antrópico, segundo a fórmula:

$$VAC = AC1 + AC2 + AC3$$

sendo a sua estrutura a indicada no Quadro 5.

Índice	Classe de Vulnerabilidade
7 – 10	Alta
4 – 7	Média
1 – 4	Baixa

Quadro 5 – Estrutura do índice vulnerabilidade aos processos atmosféricos das alterações climáticas

Pretende-se em projectos que continuem este estudo, realizar o detalhado trabalho de campo necessário ao zonamento de vulnerabilidade de aquíferos às alterações climáticas de acordo com a metodologia aqui proposta.

### 3 - CONCLUSÕES

Da análise da vulnerabilidade de aquíferos à subida do nível do mar (metodologia GALDIT), inclusa no desenvolvimento de uma metodologia mais alargada de vulnerabilidade dos aquíferos às alterações climáticas, vê-se que os aquíferos mais vulneráveis são: (1) Guilherme Moniz-S. Sebastião, Ignimbritos das Lajes, Biscoitos-Terra Chã, Santa Bárbara Superior: em todas as distâncias até 1 km; (2) Labaçal-Quatro Ribeiras: a menos de 500 m da costa; (3) Graben: a menos de 500 m em caso de aquífero livre; a todas as distâncias até 1 km em aquífero confinado.

Para a vulnerabilidade aos processos atmosféricos é apresentada a estrutura de uma nova metodologia, que considera os aspectos quantitativos, qualitativos e os efeitos das acções humanas sobre os recursos hídricos subterrâneos motivadas pela resposta às alterações climáticas. Esta metodologia carece de estudos posteriores com vista à calibração e validação da sua estrutura.

### BIBLIOGRAFIA

NOVO, M. E. (2007) – *Alterações Climáticas e Seus Impactos nos Recursos Hídricos Subterrâneos em Ilhas de Pequena Dimensão (Caso de Estudo: Açores – Ilha Terceira)*. Tese de dissertação de doutoramento em Engenharia do Ambiente, especialidade em Engenharia do Ambiente, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias.