



## Alterações Climáticas e seus Impactos em Recursos Hídricos Subterrâneos de Zonas Insulares – Recarga de Aquíferos

**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@lneec.pt](mailto:lferreira@lneec.pt)

### Resumo:

Neste artigo analisam-se os efeitos das alterações climáticas sobre a modificação dos valores da recarga numa ilha vulcânica de pequena dimensão (ilha Terceira), para diferentes conjuntos de vegetação e tipo de solo, utilizando um modelo de balanço hídrico – BALSEQ – considerando diferentes cenários de alterações climáticas em que os dados de entrada dos parâmetros precipitação e evapotranspiração foram obtidos a partir dos cenários de alterações climáticas definidos para a ilha Terceira por diferentes estudos, incluindo o projecto SIAM. Com base nestas modificações das recargas, associadas aos cenários de alteração climática, analisaram-se os efeitos que as recargas modificadas causariam nos volumes debitados pelas nascentes de um aquífero cujo funcionamento é razoavelmente conhecido (aquífero do Cabrito).

**Palavras-chave:** alterações climáticas, recursos hídricos subterrâneos, regiões insulares, recarga.

## 1 – INTRODUÇÃO

As alterações climáticas têm impactos sobre os recursos hídricos subterrâneos no que respeita à quantidade e qualidade (ex.: intrusão salina nos aquíferos costeiros devido à alteração do nível do mar), podendo assim falar-se de vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos às alterações climáticas. A compreensão dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos sofreu uma mais lenta evolução face ao conhecimento de outros aspectos das alterações climáticas. Pouco se conhece, por exemplo, sobre as interacções em termos de quantidade entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos em condições de alterações de precipitação e temperatura, ou sobre a qualidade das águas subterrâneas em condições de mais intensas e frequentes cheias. Contudo os recursos hídricos subterrâneos são extremamente importantes dado que abastecem uma grande fracção dos consumos, podendo ser a fonte principal de abastecimento nas zonas semi-desérticas. Alguns dos reservatórios de águas subterrâneas são particularmente susceptíveis às alterações climáticas, como sejam os *aquíferos de zonas insulares* ou os *aquíferos costeiros*. Os aquíferos costeiros são em especial sensíveis às alterações do nível do mar (que podem acentuar os problemas da intrusão salina) e os aquíferos insulares estão em dependência total dos regimes de precipitação, têm no geral dimensão reduzida, o que limita o volume de abastecimento a partir da precipitação, não podem ser abastecidos a partir de outras regiões e, no caso de ilhas vulcânicas, o relevo vigoroso é pouco favorável à retenção de água à superfície (excepto para as zonas de caldeira) e as características hidrodinâmicas dos materiais tendem a favorecer uma rápida circulação e curtos tempos de permanência das águas nos aquíferos. Sendo que os recursos hídricos subterrâneos são, nas zonas insulares, uma das fontes mais importantes de abastecimento das populações e, no caso dos Açores, a fonte mais importante a exclusiva, é importante compreender como as alterações climáticas afectam estes recursos. O presente estudo pretendeu dar uma contribuição à compreensão dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos em zonas insulares vulcânicas, quanto à (1) análise das tendências de alteração das recargas de aquíferos com diferentes cobertos vegetais e solos e (2) avaliação dos impactos das alterações climáticas sobre os caudais das nascentes.

## 2 - TENDÊNCIAS DE ALTERAÇÃO DAS RECARGAS DE AQUÍFEROS

Estando os Açores, para alguns modelos do Meteo Office, na transição entre as zonas de aumento de precipitação e as de maior aridez para diversos cenários de alterações climáticas, considerou-se um conjunto alargado de cenários de descida e de subida da precipitação; Os cenários de descida baseiam-se nas previsões dos cenários A2 e B2-Verão SRES, dos cenários A2 e B2 usados nos modelos HdmCM3/CIELO, e do Hadley Center SRES cenário A2 (SIAM, 2005). Os cenários de subida baseiam-se nos resultados dos cenários B2 e A2-Inverno SRES (SIAM, 2005) e dos cenários A2 e B2 usados nos modelos HdmCM3/CIELO. Para a evapotranspiração considerou-se também um leque de cenários, determinados a partir de cenários de evolução das temperaturas, calculando-se as evapotranspirações pela fórmula de Thornthwaite; foram assim considerados os seguintes cenários de temperaturas: (1) valores teóricos determinados pela tendência de redução das temperaturas nos Açores durante o período de 1946-1975, (2) valores teóricos dados pela tendência de subida das temperaturas dos modelos HadRM3 cenários A2 e B2 SRES, (3) valores teóricos dados pela tendência de subida das temperaturas dos modelos HadCM3/CIELO para os cenários A2 e B2 SRES (SIAM, 2005).

Com base nos cenários de precipitação e temperatura considerados, modificaram-se séries conhecidas de precipitação e temperatura da última década do século XX, as quais

serviram de dados de entrada ao modelo de balanço hídrico BALSEQ. Assim, para cada um destes vários cenários, o modelo BALSEQ calculou as recargas do aquífero do Cabrito (ilha Terceira), o que permitiu por sua vez fazer uma previsão, ainda se incompleta, das alterações possíveis aos volumes de caudal (anual) das nascentes associadas a este aquífero. As recargas foram calculadas para os diversos pares NC/AGUT (nº característico do solo/ocupação vegetal) do aquífero, identificados em *Novo et al. (1997)*, o que permitiu ter uma imagem da evolução da resposta de diferentes condições de NC/AGUT com a variação da precipitação e/ou da evapotranspiração.

Como o que se pretendia era compreender a resposta do aquífero à modificação quer da precipitação quer da evapotranspiração, as simulações realizaram-se modificando primeiro só os valores das precipitação, e depois apenas os valores da evapotranspiração. Uma simulação final para a variação simultânea da precipitação e evapotranspiração foi também realizada. Os cenários de precipitação utilizados foram os seguintes:

**1. Descida de precipitação:** (a) -0.3 mm/dia; (b) -0.5 mm/dia; (c) -1 mm/dia; (d) -15 % anual; (e) -20 % anual; (f) Cenário 30 = precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +20% no Inverno = -14,9% precipitação anual; (g) Cenário 20 = precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +20% no Inverno = -25,3% precipitação anual; (h) Cenário 50 = precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +50% no Inverno = - 5,8% precipitação anual; (i) Cenário 60 = precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +50% no Inverno = - 15,9% precipitação anual.

**2. Subida de precipitação:** (a) +6 % anual; (b) +10 % anual; (c) +15 % anual; (d) +20 % anual; (e) +25 % anual; (f) +30% anual; (g) = Cenário 1 (1) = precipitação a +15% na estação húmida e sem tendência de alteração no Verão.

Os resultados do modelo BALSEQ para a variação da recarga de aquíferos com as alterações da precipitação são os seguintes:

a) **Para os cenários de descida de precipitação** (Fig. 1) – Nos solos muito permeáveis e vegetação arbórea a variação da recarga com a precipitação tende a ser a mais elevada (quando o modelo se baseia em variações percentuais da precipitação), indiciando grandes perdas de recarga; as maiores perdas surgem nos cenários com maior redução da precipitação no Outono (importância das variações sazonais diferenciais). As menores perdas de recarga ocorrem nos pares gramíneas/solos pouco permeáveis (em termos absolutos onde ocorrem também as menores recargas). Para vegetação arbórea/solos pouco permeáveis as perdas de recarga são elevadas, podendo ultrapassar o par 105/1 em condições de redução de precipitação acentuada no Outono e elevada no Inverno.

b) **Para os cenários de subida de precipitação** (Fig. 2) – A variação na subida de recarga (em percentagem) é sempre maior que a variação de precipitação, para qualquer coberto vegetal, quando a precipitação aumenta no Inverno e não há decréscimo nas restantes estações. Em termos absolutos os cenários +30%, +25%, +15% têm as maiores recargas. Nos solos muito permeáveis e vegetação arbórea a taxa de recarga é a mais elevada, podendo ser 2x superior à da subida da precipitação; as maiores alterações tendem a surgir nos cenários de maior variação da precipitação no Outono. Nos solos pouco permeáveis a taxa de subida da recarga é quase sempre inferior à da subida de precipitação; a menor subida da recarga ocorre para coberto de gramíneas. Nos solos de comportamento intermédio a variação da recarga é similar para coberto arbustivo/arbóreo e de gramíneas.

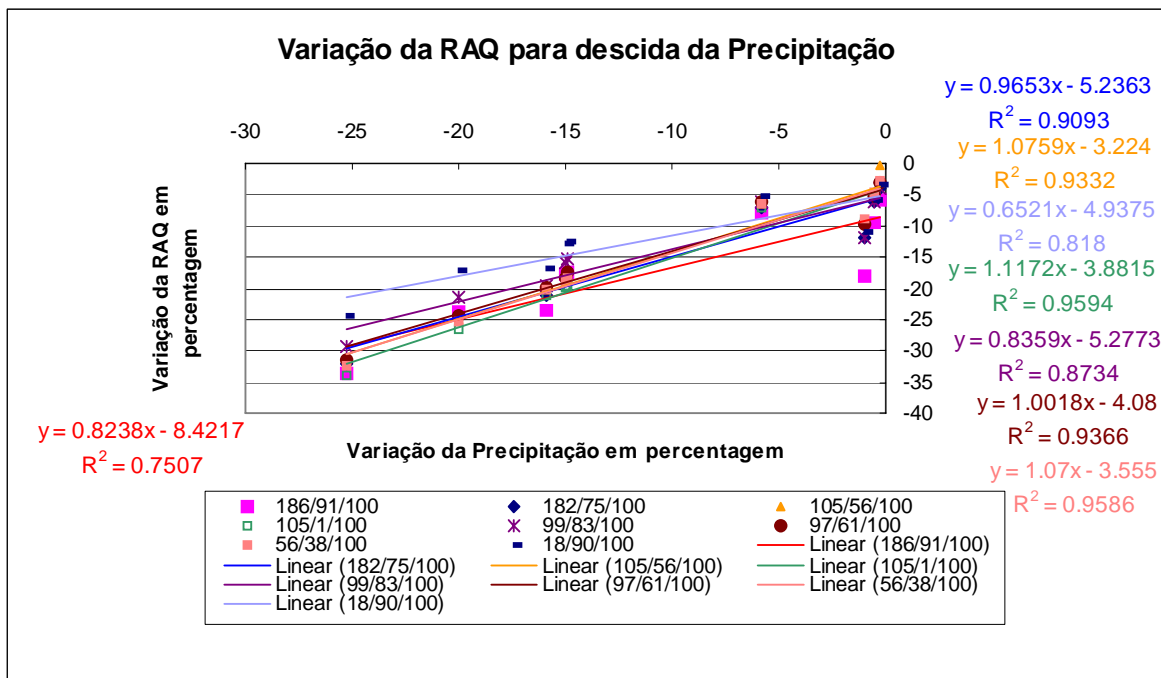
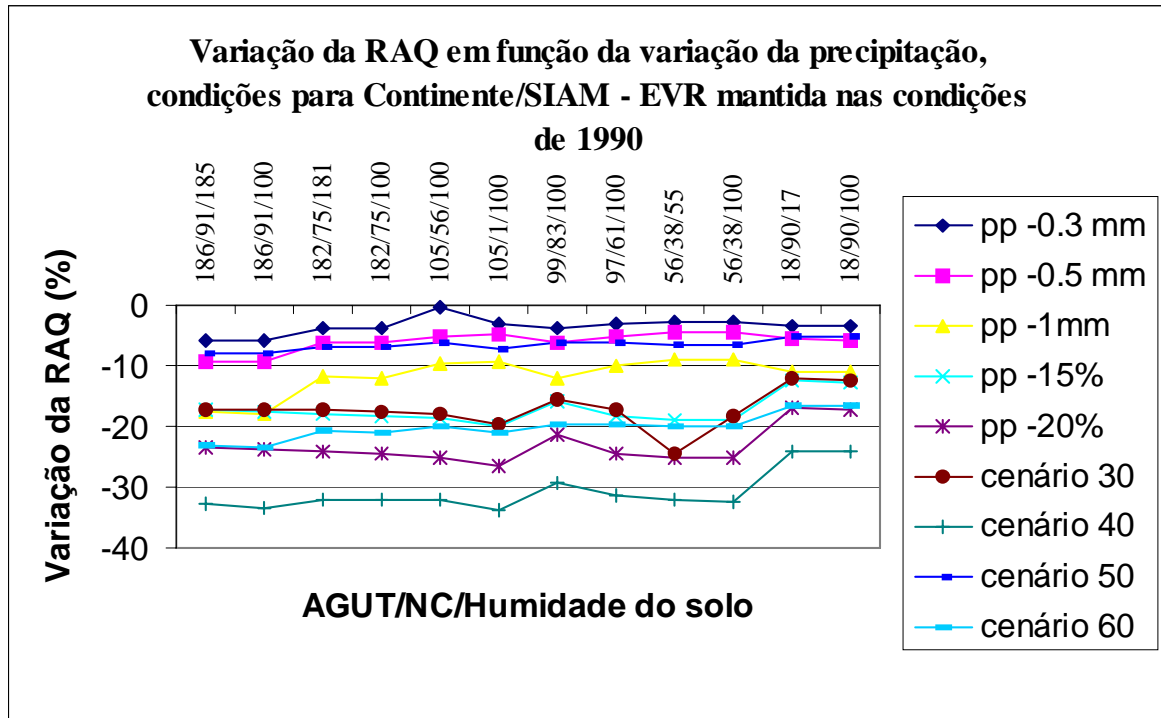


Figura 1 – Variações da recarga de aquíferos para cenários de redução da precipitação

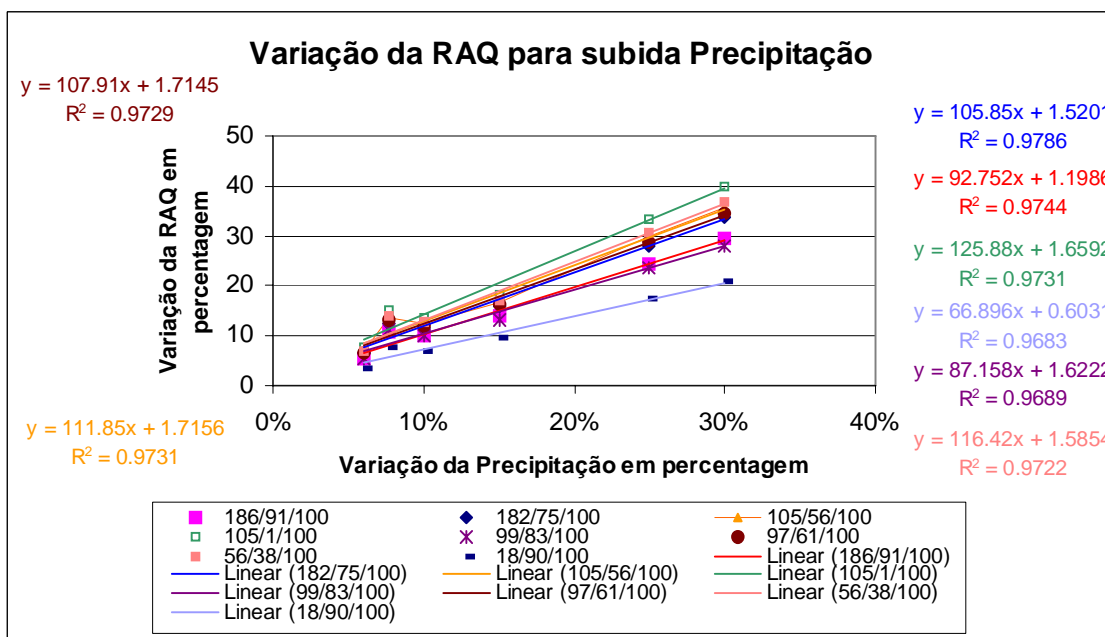
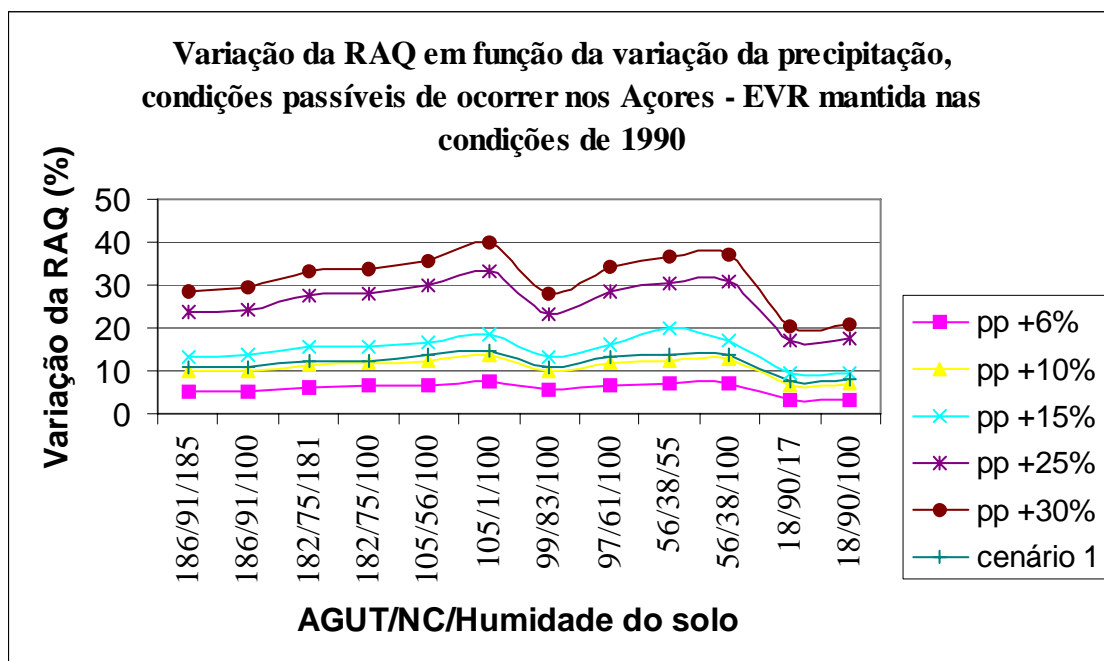


Figura 2 – Variações da recarga de aquíferos para cenários de subida da precipitação

c) **Conclusões para ambos os tipos de cenários** (Fig. 3) – A variação da recarga (valores médios para as várias condições AGUT/NC) com a variação de precipitação é directamente proporcional e aproximadamente linear. Uma modificação linear da precipitação aplicada a todo o ano leva a uma variação da recarga mui próxima da variação da precipitação média anual. Quando a modificação linear se modifica de estação para estação do ano a variação da recarga afasta-se do valor da variação média anual da precipitação. O par AGUT/NC = 105/1 é em média o que apresenta os maiores incrementos ou os menores decréscimos de recarga com a variação de precipitação. O par AGUT/NC = 18/90 é em média o que apresenta as menores reduções e menores subidas de recarga com a variação da precipitação. Em regra as áreas menos propícias à infiltração sofrem das maiores reduções de recarga (sempre superiores às da redução da

precipitação) e em cenários de aumento de precipitação tendem a registar as menores subidas. A redução da recarga tende a ser maior para coberto vegetal com grande extensão radicular.

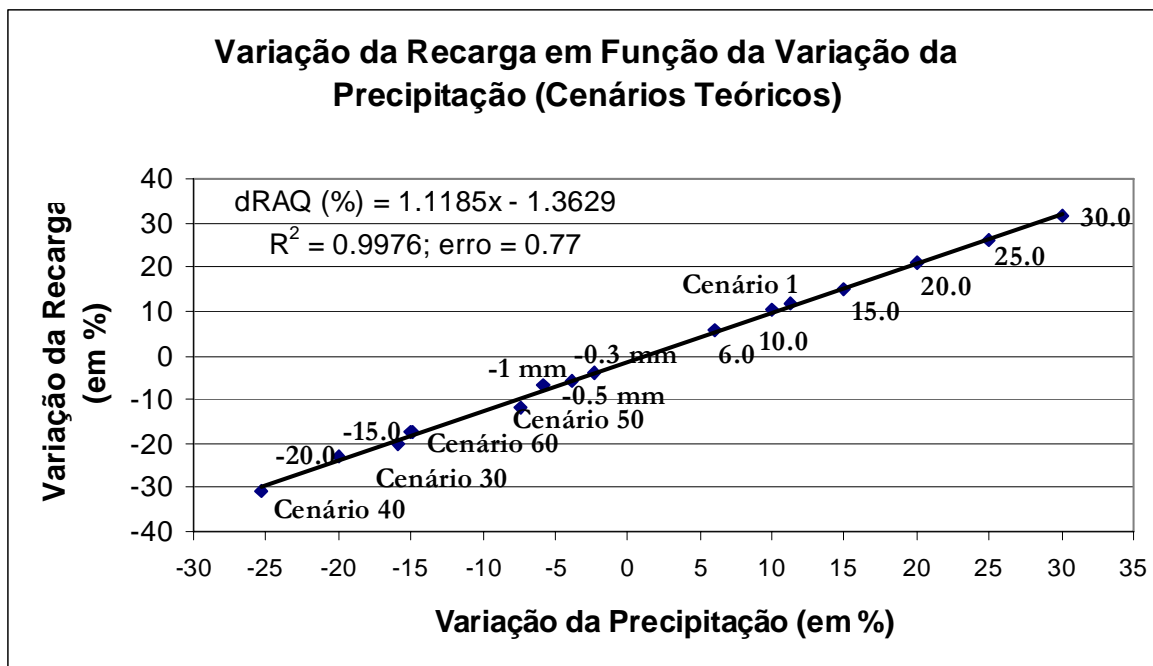


Figura 3 – Variações da recarga de aquíferos para o conjunto total de cenários da precipitação

Para a análise da variação da recarga com a variação das evapotranspirações, os cenários de evapotranspiração utilizados foram os seguintes:

1. *Subida da evapotranspiração*: (a) Sobe 1,5%; (b) Sobe 5%; (c) Sobe 10%; (d) Sobe 15%; (e) Sobe 20%; (f) Sobe 25%; (g) Sobe 30%; (h) Sobe 40%; (i) Sobe 50%.

2. *Descida da evapotranspiração*: (a) Desce 5%; (b) Desce 10%; (c) Desce 15%; (d) Desce 20%; (e) Desce 25%; (f) Desce 30%.

A análise da variação da recarga de aquíferos para os cenários de alteração de evapotranspiração levou às seguintes conclusões:

a) *Para os cenários de subida da evapotranspiração* (Fig. 4) – A recarga desce com a subida da evapotranspiração. As reduções de recarga são máximas nos solos de baixa permeabilidade, com coberto vegetal arbóreo. As reduções de recarga são mínimas em solos de média-alta permeabilidade com vegetação de gramíneas. Solos de alta permeabilidade ou permeabilidade média com um coberto vegetal arbóreo/arbustivo geram reduções similares de recarga. Em cobertos de gramíneas o comportamento dos solos mais impermeáveis diverge dos de permeabilidade moderada, sendo que os primeiros a recarga sofre uma maior redução.

b) *Para os cenários de descida da evapotranspiração* (Fig. 5) – A recarga sobe para a descida da evapotranspiração. A maior subida de recarga ocorre para solo pouco permeável e vegetação arbórea. A menor subida de recarga ocorre para vegetação herbácea e solo de média-alta permeabilidade. Solos de alta permeabilidade ou de permeabilidade média e vegetação arbustivo/arbórea geram subidas similares de recarga. Em cobertos de gramíneas o comportamento dos solos mais impermeáveis diverge dos de permeabilidade moderada, sendo que os primeiros a recarga sofre uma maior subida.

### Variação da RAQ em função da variação da evapotranspiração, condições para Continente/SIAM - PP mantida nas condições de 1990

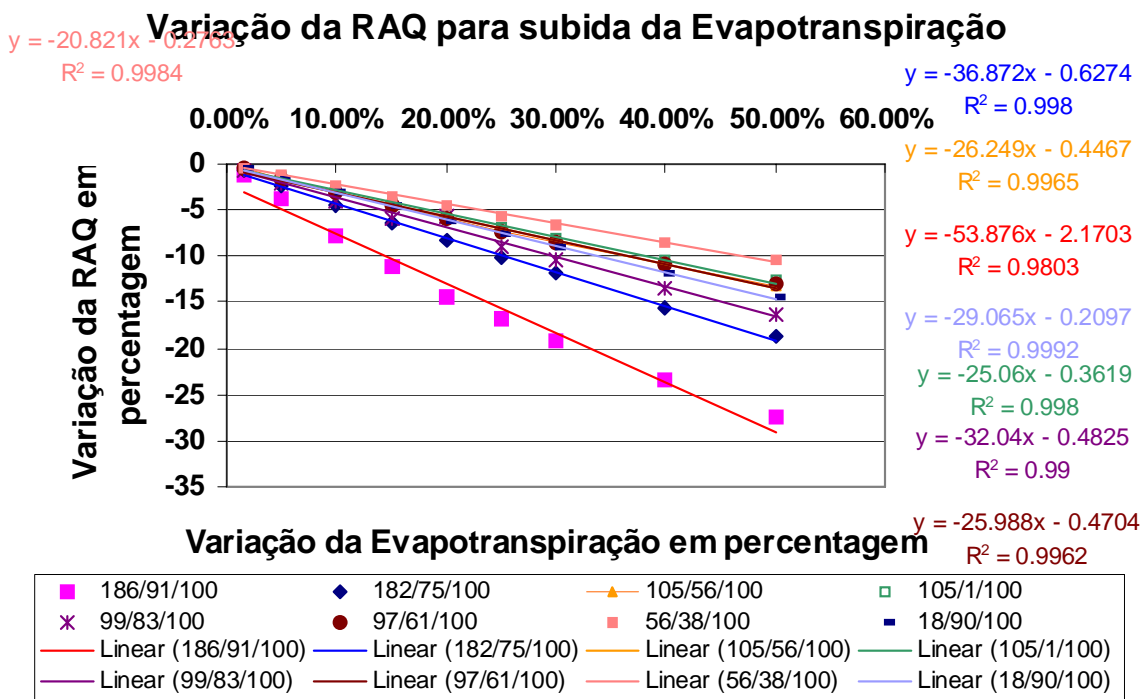
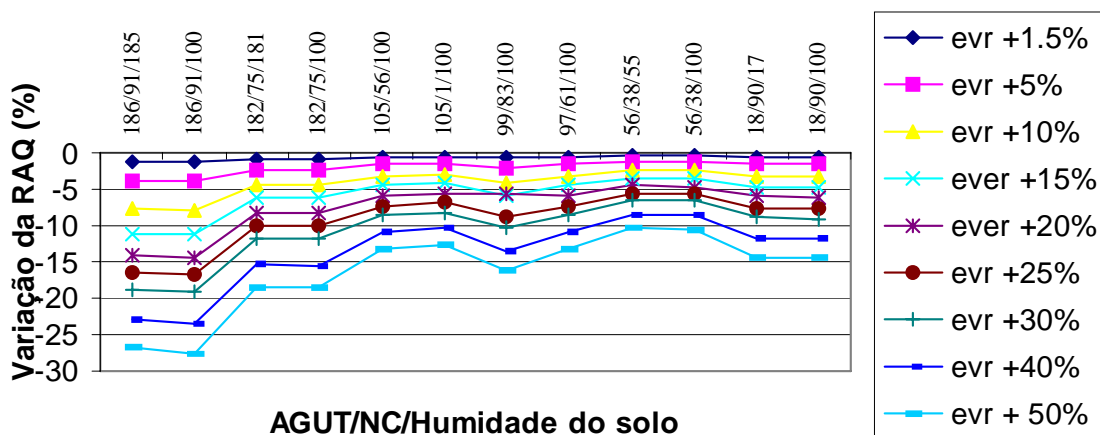


Figura 4 – Variações da recarga de aquíferos para cenários de subida da evapotranspiração

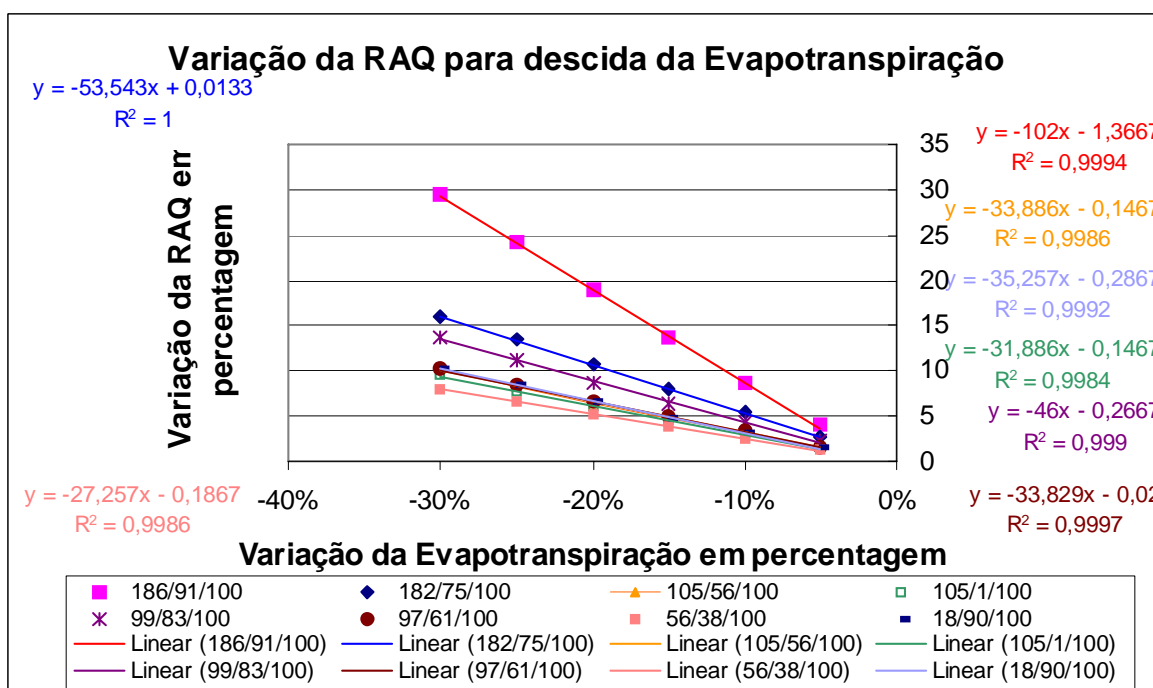
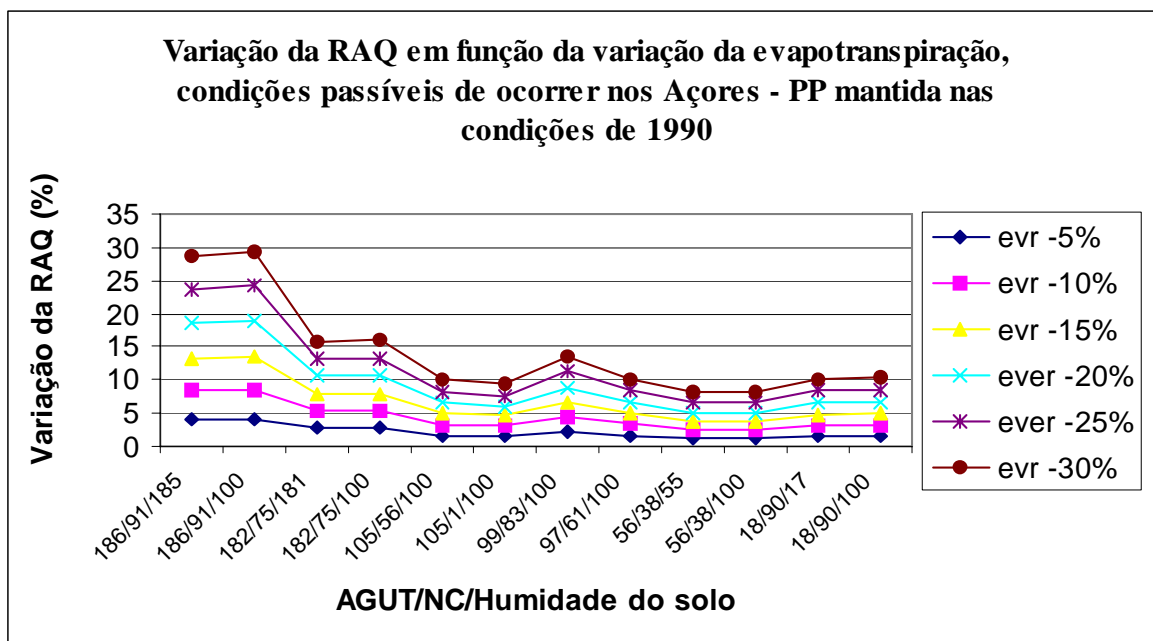


Figura 5 – Variações da recarga de aquíferos para cenários de subida da evapotranspiração

c) *Para o conjunto dos cenários de evapotranspiração* (Fig. 6) – Há uma correlação inversa, embora linear, entre a variação da evapotranspiração e a variação da recarga e que sublinha o controlo da recarga pela vegetação e solo. Esta correlação inversa entre a evapotranspiração e a recarga é similar para a subida e a descida da evapotranspiração. O par AGUT/NC = 186/91 tem a maior variação de recarga (em todos os cenários) com a variação da evapotranspiração. O par AGUT/NC = 56/38 tem a menor variação de recarga (em todos os cenários) com a variação da evapotranspiração.



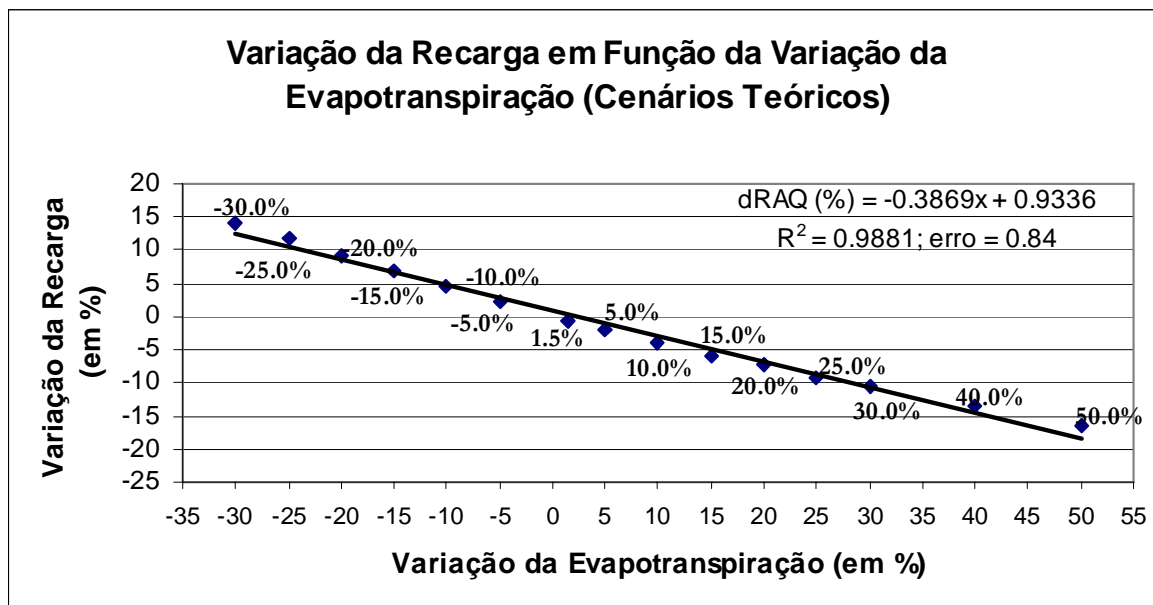


Figura 6 – Variações da recarga de aquíferos para o conjunto total de cenários da evapotranspiração

Deve referir-se que para uma correcta avaliação dos impactos da evapotranspiração na recarga deveria conhecer-se não apenas as variações devidas à temperatura mas também a alteração do coberto vegetal, devido aos processos naturais desencadeados pelas alterações climáticas e acções humanas de adaptação/mitigação a estas mesmas alterações climáticas. Na ausência de cenários sobre este tipo de alterações para a região dos Açores optou-se por manter os cobertos vegetais e analisar apenas os efeitos sobre a recarga devidos à variação da evapotranspiração causados simplesmente pela alteração da temperatura.

### 3 - AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS SOBRE OS CAUDAIS DAS NASCENTES

A partir dos resultados das simulações do modelo BALSEQ para a recarga do aquífero do Cabrito (ilha Terceira) tentou definir-se como as alterações de precipitação e evapotranspiração poderiam afectar o regime das nascentes deste aquífero. As condições actuais do aquífero são: (1) volume anual de recarga, cerca de 2,2 hm<sup>3</sup>/ano; (2) até 18% da recarga (2,5 hm<sup>3</sup>/ano) podem ser armazenados no aquífero; (3) 20% recarga é conduzida para a drenância; (4) a descarga total nascentes é de 7,7, hm<sup>3</sup>/ano, isto é, 63% do total anual de recarga; (5) o caudal de estiagem das nascentes é de 58% da recarga de estiagem. As condições de cálculo para avaliar as alterações dos caudais das nascentes deste aquífero foram as seguintes: (1) usou-se o valor de recarga determinado para cada cenário de alteração de precipitação e de evapotranspiração; (2) as condições (volume) de armazenamento dentro do aquífero são similares à situação actual; (3) as perdas para outros aquíferos são similares à situação actual. Os valores obtidos estão no Quadro 1. Pode verificar-se que: (a) as alterações na evapotranspiração geram menores variações, de sentido oposto, nos caudais das nascentes; (b) as alterações na precipitação geram variações maiores, do mesmo sentido, nos caudais das nascentes; (c) as maiores reduções de caudais ocorrem para as maiores reduções da precipitação no Outono, mesmo que haja subidas de precipitação no Inverno; (d) a maior redução de caudais pode atingir 49%.

	Cenários de Variação da Precipitação									
	- 0,3 mm/d	- 0,5 mm/d	- 1 mm/d	- 15% anual	- 20% anual	Cenário 30 (1)	Cenário 20 (2)	Cenário 50 (3)	Cenário 60 (4)	
Varição Média Recarga (%)	-3,7	-6,0	-11,7	-17,2	-23,1	-17,2	-30,8	-6,5	-20,2	
Nova Recarga (hm <sup>3</sup> /ano)	11,75	11,47	10,77	10,10	9,38	10,10	8,44	11,41	9,74	
Armazenamento+Drenância	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	
Novos Caudais (hm <sup>3</sup> /ano)	7,25	6,97	6,27	5,60	4,88	5,60	3,94	6,91	5,24	
Razão Caudais/Recarga (%)	61,70	60,76	58,23	55,45	52,03	55,45	46,70	60,55	53,78	
Incremento de Caudais (%)	-5,86	-9,51	-18,54	-27,25	-36,60	-27,25	-48,80	-10,30	-32,01	
	Cenários de Variação da Precipitação									
	+ 6%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	Cenário 1 (5)			
Varição Média da Recarga (%)	+5,9	+10,9	+14,9	+21,1	+26,3	+31,5	+11,9			
Nova Recarga (hm <sup>3</sup> /ano)	12,92	13,53	14,02	14,77	15,41	16,04	13,65			
Armazenamento+Drenância	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50			
Novos Caudais (hm <sup>3</sup> /ano)	8,42	9,03	9,52	10,27	10,91	11,54	9,15			
Razão Caudais/Recarga (%)	12,92	13,53	14,02	14,77	15,41	16,04	13,65			
Incremento de Caudais (%)	9,35	17,27	23,61	33,43	41,67	49,91	18,85			
	Cenários de Variação da Evapotranspiração									
	+1,5%	+ 5%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	+ 40%	+ 50%	
Varição Média Recarga (%)	-0,6	-2,1	-4,0	-5,9	-7,4	-9,2	-10,7	-13,6	-16,4	
Nova Recarga (hm <sup>3</sup> /ano)	12,13	11,94	11,71	11,48	11,30	11,08	10,89	10,54	10,20	
Armazenamento+Drenância	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	
Novos Caudais (hm <sup>3</sup> /ano)	7,63	7,44	7,21	6,98	6,80	6,58	6,39	6,04	5,70	
Razão Caudais/Recarga (%)	62,89	62,32	61,58	60,80	60,17	59,38	58,70	57,31	55,88	
Incremento de Caudais (%)	-0,95	-3,33	-6,34	-9,35	-11,72	-14,58	-16,95	-21,55	-25,98	
	Cenários de Variação da Evapotranspiração									
	- 5%	- 10%	- 15%	- 20%	- 25%	- 30%				
Varição Média Recarga (%)	+2,2	+4,4	+6,8	+9,2	+11,7	+14,2				
Nova Recarga (hm <sup>3</sup> /ano)	12,47	12,74	13,03	13,32	13,63	13,93				
Armazenamento+Drenância	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50				
Novos Caudais (hm <sup>3</sup> /ano)	7,97	8,24	8,53	8,82	9,13	9,43				
Razão Caudais/Recarga (%)	63,91	64,67	65,46	66,22	66,98	67,70				
Incremento de Caudais (%)	<b>3,49</b>	<b>6,97</b>	<b>10,77</b>	<b>14,58</b>	<b>18,54</b>	<b>22,50</b>				

Nota: -15% anual e -20% anual significa que se afectou a série de uma redução de cerca de 15 e 20% respectivamente por dia, o que deu 15 e 20% respectivamente menos precipitação anual

- (1) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +20% no Inverno = -14,9% anual
- (2) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +20% no Inverno = -25,3% anual
- (3) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -35% no Outono, +50% no Inverno = - 5,8% anual
- (4) precipitação a -30% Primavera, -15% no Verão, -60% no Outono, +50% no Inverno = - 15,9% anual
- (5) precipitação a +15% na estação húmida e sem tendência de alteração no Verão

Quadro 1 – Variação dos caudais das nascentes do aquífero do Cabrito para diferentes cenários de variação da precipitação e da evapotranspiração

## 4 - CONCLUSÕES

Para o conjunto de cenários de variação da precipitação verifica-se que: (1) a variação da recarga é directamente proporcional à variação de precipitação; (2) se for aplicada à precipitação uma modificação linear constante ao longo do ano, a recarga tende a seguir esta variação linear da precipitação; (3) se a variação da recarga for diferente para cada estação do ano, a variação da recarga afasta-se da variação para o valor médio anual de precipitação; (4) para quaisquer dos tipos de solo e coberto vegetal considerados, a subida de recarga é sempre maior que a subida de precipitação se ocorrer subida no Inverno e não houver descida em nenhuma das outras estações; (5) as rectas de regressão podem usar-se para os respectivos pares NC/AGUT para previsões aproximadas de variação de recarga em função da variação da precipitação.

Analisando a variação da recarga com a variação da evapotranspiração verifica-se que: (1) as zonas de variação de recarga mais significativa ocorrem em vegetação de grandes raízes e solos mais impermeáveis; (2) os solos mais permeáveis têm as menores variações de recarga; (3) a variação de recarga é inversamente proporcional à variação da evapotranspiração; (4) a variação média de recarga parece ter uma menor relação de linearidade com a variação de evapotranspiração do que com a variação de precipitação; (5) as rectas de regressão podem usar-se para os respectivos pares NC/AGUT para previsões aproximadas de variação de recarga em função da variação da evapotranspiração.

## 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.