

EFEITOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E DA SUBIDA DO NÍVEL DO MAR NOS AQUÍFEROS COSTEIROS

Júlio F. FERREIRA DA SILVA

*Doutor em Engenharia Civil – Hidráulica Professor Auxiliar do Departamento de Eng^a Civil da Universidade do Minho,
Azurém 4800-058 Guimarães, Portugal
253510200, juliofs@civil.uminho.pt*

Luís Tavares RIBEIRO

*Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Minas do IST, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, 218417247,
ntrib@alfa.ist.utl.pt*

RESUMO

Neste trabalho descrever-se-ão os efeitos da subida do nível do mar no planeamento e gestão dos sistemas de captação da água doce disponível nas regiões costeiras. Recordar-se-ão as leis que regem o escoamento subterrâneo nos aquíferos do litoral e as metodologias para a procura das melhores políticas de extracção da água doce. Apresenta-se o modelo de gestão que é composto pela associação de uma técnica de optimização e de modelos de simulação do comportamento do aquífero. O modelo de optimização-simulação determina as extracções máximas permitidas a um conjunto de captações para cada cenário de subida do nível do mar, do escoamento natural no aquífero, do local de implantação e da distância de segurança entre o pé da interface água doce / água salgada e o ponto de controlo. Os efeitos na redução das extracções face à projectada subida do nível do mar e da diminuição do escoamento natural no aquífero, para que seja mantida a distância de segurança pretendida, são diversos em função do local de implantação. As superfícies e as curvas das extracções máximas em função da subida do nível do mar e do local de implantação evidenciam a necessidade dum adequado planeamento dos locais de construção das captações que antecipadamente evite os efeitos das alterações climáticas.

Palavras-chave: Alterações climáticas. Subida do nível do mar. Controlo da intrusão salina. Modelação de águas subterrâneas.



1 - INTRODUÇÃO

São diversos os trabalhos científicos que já identificaram tendências nas alterações climáticas, designadamente na subida do mar, com elevada probabilidade de ocorrência. Tais alterações devem ser consideradas nas políticas e estratégias de planeamento e de gestão da água doce das regiões costeiras. As mudanças climáticas constituem uma fonte suplementar de incerteza que influenciarão as futuras solicitações e a disponibilidade de água doce. Espera-se que a recarga acompanhe de perto as tendências da precipitação. Entretanto, qualquer que seja a subida do nível do mar este fenómeno provocará o avanço para o continente da intrusão marinha.

A concepção, dimensionamento e exploração dos sistemas de captação e de abastecimento de água em zonas costeiras para fazer face à variação do nível do mar devem examinar cuidadosamente o número de captações necessário, os respectivos locais de implantação e as quantidades a extrair em cada, para que seja satisfeita a solicitação de água, maximizado o resultado económico e mantido sob controlo o fenómeno da intrusão salina. Estas decisões poderão ser melhor fundamentadas recorrendo a um conjunto de ferramentas de optimização e de simulação do comportamento dos sistemas hídricos envolvidos que interligadas poderão encontrar as melhores soluções.

A adequada utilização dos aquíferos costeiros, precavendo os efeitos das alterações climáticas, obriga a que seja dada atenção especial ao critério do controlo do fenómeno da intrusão marinha. Assim, é importante determinar a extracção máxima possível para que a interface seja mantida para além de determinada distância de segurança em relação a pontos de controlo. O modelo de gestão disponibiliza face a cada cenário da projectada subida do nível do mar as melhores políticas de extracção em função da distância de segurança e de cada eventual local de implantação do sistema de captação.

2 - IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

As projectadas variações do nível do mar motivadas pelas alterações climáticas irão motivar progressivamente modificações no equilíbrio dos volumes de água salgada e água doce nos aquíferos costeiros. O planeamento dos sistemas de captação e de abastecimento de água a zonas costeiras deve ser realizado tendo antecipadamente em atenção o tendencial avanço da cunha salina. O problema da concepção e da gestão optimizadas de sistemas de captação e de abastecimento de água a partir de aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão salina consiste em determinar os melhores locais de implantação e as respectivas extracções que satisfaçam as solicitações dos utilizadores, mantendo, no entanto, o controlo sob o fenómeno da intrusão salina.

Dada a incerteza associada à projecção das alterações climáticas o estudo realizado teve como propósito cobrir um leque de eventuais cenários, pelo que o modelo de optimização-simulação é chamado a encontrar as extracções máximas para cada eventual local de implantação de um conjunto de captações, para cada valor do nível do mar, para cada cenário do escoamento natural e para cada distância de segurança. Assim, as sucessivas execuções do modelo de gestão varrem os valores compreendidos nos intervalos:

$$x_{s,\min} \leq x_s \leq x_{s,\max} \quad x_s = 520, 540, \dots, 2800 \text{ m} \quad (1)$$

$$B_{\min} \leq B \leq B_{\max} \quad B_i = 14, 14,05, \dots, 15 \text{ m} \quad (2)$$

$$ds_{\min} \leq ds \leq ds_{\max} \quad ds = 100, 200, \dots, 800 \text{ m} \quad (3)$$

em que: $x_{s,\min}$ e $x_{s,\max}$ os limites da implantação de cada captação subterrânea, ou seja a distância à linha de costa; B_{\min} e B_{\max} os limites da altura entre o nível do mar e a base do aquífero; ds - distância de segurança.

Na figura seguinte estão esquematizados os sistemas de captação, de abastecimento de água e de controlo da intrusão salina numa zona costeira.



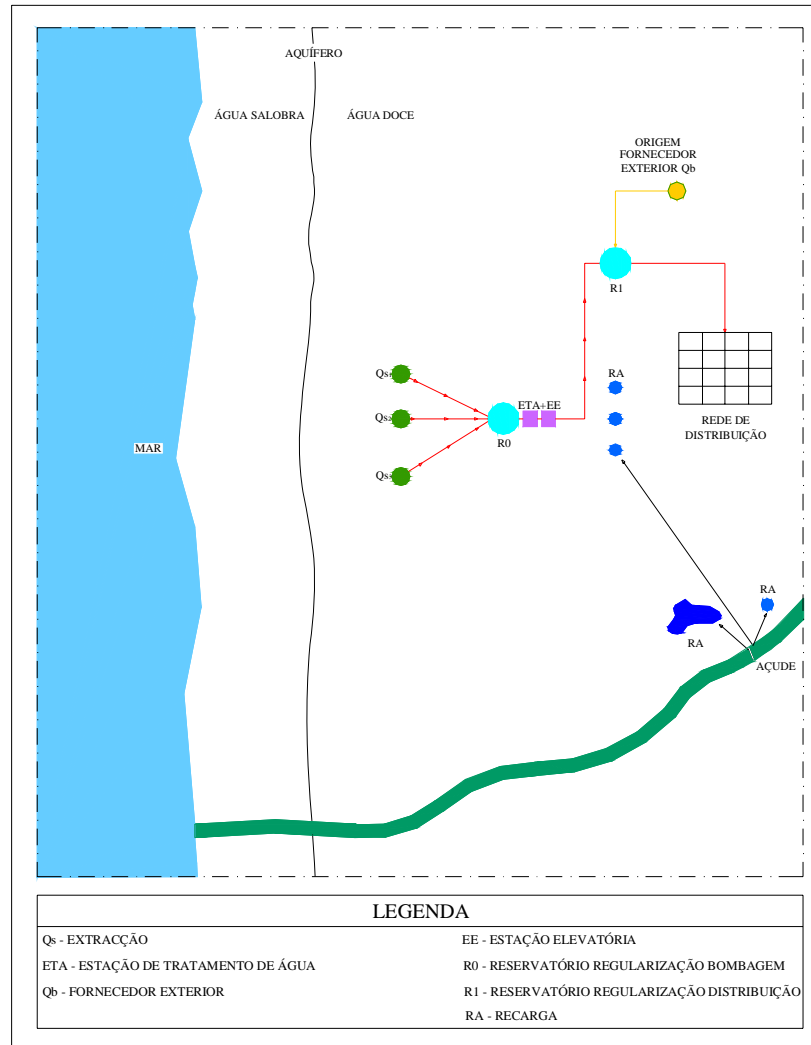


Figura 1 - Esquema de sistema de captação e de abastecimento de água a região costeira

3 MODELO DE GESTÃO DE AQUÍFEROS SUJEITOS À INTRUSÃO SALINA

O adequado planeamento dos locais de implantação dos sistemas de captação exige a utilização conjunta de técnicas de optimização e de modelos de simulação do comportamento dos sistemas hídricos das regiões costeiras, designadamente dos aquíferos costeiros. São diversas as técnicas de optimização que podem ser moldadas para determinarem as melhores políticas de implantação das captações e os regimes de extracção de água doce. Os modelos de simulação do escoamento subterrâneo, como os defendidos por STRACK (1989) e BAKKER (2002), antecipam o comportamento do aquífero face às alternativas geradas pela ferramenta de optimização. Em FERREIRA DA SILVA (2003) e FERREIRA DA SILVA (2005) defende-se uma metodologia que associa métodos de optimização e modelos de simulação da intrusão marinha em cascata num grau de complexidade crescente.

As equações que caracterizam o escoamento num sistema aquífero costeiro podem ser definidas aplicando a expressão de Darcy a cada lado da interface água doce / água salgada:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(K_{xx})_d \frac{\partial h_d}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(K_{yy})_d \frac{\partial h_d}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_{zz})_d \frac{\partial h_d}{\partial z} \right] + Q_d = S_d \frac{\partial h_d}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(K_{xx})_s \frac{\partial h_s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(K_{yy})_s \frac{\partial h_s}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_{zz})_s \frac{\partial h_s}{\partial z} \right] + Q_s = S_s \frac{\partial h_s}{\partial t} \quad (5)$$

Em que: x, y - coordenadas, d água doce; s a água salgada; h - altura piezométrica, Q - caudal extraído ou injectado, S - coeficiente de armazenamento, t - tempo.

A resolução da equação diferencial que caracteriza o escoamento pode realizar-se por via analítica, nalguns casos, e mais genericamente por via numérica. Defende-se que o estudo de sistemas complexos e de grande dimensão deve iniciar-se com o recurso a modelos conceptuais simples para numa segunda fase ser usado um modelo numérico, necessariamente mais refinado.

Strack (1976 e 1989) desenvolveu uma solução exacta para caracterizar o escoamento em aquíferos costeiros com uma linha de costa recta, diversas captações localizadas a x_i do mar e o respectivo caudal Q_i . O potencial é definido, usando o método das imagens, por:

$$\phi = \frac{q}{K}x + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi K} LN \left[\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{(x+x_i)^2 + (y-y_i)^2} \right] \quad (6)$$

onde: q - escoamento específico; K - condutividade hidráulica; Q_i - extracção / Injecção; (x_i, y_i) coordenadas do local de extracção / injecção; n - número de locais extracção / injecção.

4 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

A formulação matemática do problema envolve a definição da função objectivo e das restrições.

4.1 - OBJECTIVO

O objectivo é matematicamente representado pela maximização das extracções:

$$\max Z = \sum_{s=1}^{N_s} Q_s \quad (7)$$

sendo: Q_s - A extracção em cada captação s ; N_s - Número total de captações.

4.2 - RESTRIÇÕES

O controlo da intrusão salina no aquífero será realizado impondo um valor máximo para a distância entre do "pé" da interface e os pontos de controlo. Estes poderão ser as captações que condicionam a solução, eventualmente as implantadas nos locais mais próximos do mar. Pretendendo implantar um conjunto de captações em linha, então os pontos de controlo serão as captações centrais. Exigindo que a distância de segurança seja respeitada, então limitar-se-á o avanço do pé da interface:

$$(x_{pe})_s \leq (x_{pc})_s - (ds)_s \quad \forall s, s=1,2,\dots,N_{pc} \quad (8)$$

em que: $(x_{pe})_s$ - distância do pé da interface à linha de costa; x_{pc} - distância do ponto de controlo à linha de costa; ds - distância segurança admissível entre a interface e o ponto de controlo; N_{pc} - número de pontos de controlo.

As restrições são relativas aos limites de extracção de cada captação e às cotas piezométricas mínimas:

$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max} \quad i = 1, \dots, N_s \quad (9)$$

$$h_s \geq h_0 \quad s = 1, \dots, N_s \quad (10)$$

em que: $Q_{i,\min}$ e $Q_{i,\max}$ os limites de extracção em cada origem; N_s - Número de origens subterrâneas; h_s a cota piezométrica na captação s ; h_0 a cota piezométrica mínima admissível.

5 - APLICAÇÕES

Nos estudos seguintes considerar-se-á o sistema esquematizado na figura 1. Admitir-se-á que as captações subterrâneas serão implantadas num aquífero com condutividade hidráulica de 100 m/dia e escoamento específico actual de 0,6 m³/m.dia. Considerando que a altura actual da superfície do mar



está catorze metros acima da base do aquífero ($B=14,0$ m), então não havendo qualquer extracção o pé da interface localiza-se a 418,54 m da linha de costa. Admitindo sucessivos valores para a distância de segurança, desde a distância mínima de 100 m, depois 200 m até 800 m, as captações poderão ser implantadas, respectivamente, a partir dos 520 m, 620 m, etc.

5.1 - EXTRACÇÕES MÁXIMAS NUMA BARREIRA DE TRÊS CAPTAÇÕES VERSUS LOCAL DE IMPLANTAÇÃO COM AUMENTO DO NÍVEL DO MAR E REDUÇÃO DO ESCOAMENTO NATURAL

O problema que pretende resolver-se consiste em determinar qual será a extracção máxima numa barreira de três captações para que seja assegurado o controlo da intrusão salina, ou seja para manter a interface água doce / água salobra para além duma distância de segurança.

As captações distam entre si 1000 m. Admite-se que a extracção máxima em cada captação é de 2000 m³/dia.

As melhores políticas de extracção para o conjunto das três captações, quando a distância de segurança (d_s) é de 300 m e $q = 0,6$ m²/dia são as registadas no quadro seguinte:

Quadro 1 - Extracções em 3 captações vs local de implantação para $d_s=300$ m $B=14,0$ m e $q = 0,6$ m²/dia

Local (m)	Q_1 (m ³ /dia)	Q_2 (m ³ /dia)	Q_3 (m ³ /dia)	Sum Q (m ³ /dia)
740.00	44,99	33,25	44,99	123,22
(...)				
1000.00	439,53	289,34	439,53	1168,40
(...)				
2000.00	1227,64	651,95	1227,64	3107,24
2800.00	1660,26	833,75	1660,26	4154,27

Sendo: Q_1 , Q_2 , Q_3 as extracções máximas, respectivamente, nas captações 1, 2 e 3 (m³/dia) e Sum Q a extracção total na barreira (m³/dia).

Admitindo como cenário a redução máxima do escoamento natural em 30% se a subida do nível do mar for de 1,0 m, então a relação entre o caudal por metro linear e a subida do nível do mar será:

$$q = 0,60 - 0,18\Delta h \quad (11)$$

em que: Δh a subida do nível do mar.

O controlo do avanço da intrusão marinha face à subida do nível do mar poderá ser realizado com a redução das extracções. De acordo com a hipótese formulada a uma subida de 0,50 m corresponderá um $q = 0,51$ m²/dia. Nestas circunstâncias só será possível extrair água doce em locais mais afastados do mar. As extracções máximas em cada captação são as registadas no quadro seguinte:

Quadro 2 - Extracções em 3 captações vs local de implantação para $d_s=300$ m $B=14,50$ m e $q = 0,51$ m²/dia

Local (m)	Q_1 (m ³ /dia)	Q_2 (m ³ /dia)	Q_3 (m ³ /dia)	Sum Q (m ³ /dia)
860.00	48,46	33,82	48,46	130,73
(...)				
1000.00	228,04	150,12	228,04	606,20
(...)				
2000.00	954,20	506,74	954,20	2415,14
(...)				
2800.00	1336,87	671,35	1336,87	3345,10

A quantidade total máxima que será possível extrair na barreira de 3 captações em função do local de implantação e da subida do nível do mar para uma distância de segurança de 300,0 m fica registada no quadro seguinte e representada na figura que se lhe segue.

Quadro 3 – Extracção total máxima em 3 captações vs local de implantação para $ds=300$ m vs altura da água do mar

Local (m)	Altura entre a superfície do mar e a base do aquífero (m)								
	14,00	14,10	14,30	14,50	14,60	14,70	14,80	14,90	15,00
740,00	123,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
760,00	230,55	120,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
780,00	331,49	221,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
800,00	426,76	316,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
820,00	516,96	406,90	186,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
840,00	602,63	492,48	271,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
860,00	684,20	573,92	352,74	130,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
880,00	762,09	651,64	430,13	207,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
900,00	836,62	725,96	504,06	281,37	169,73	0,00	0,00	0,00	0,00
920,00	908,10	797,21	574,85	351,73	239,87	127,83	0,00	0,00	0,00
940,00	976,80	865,65	642,77	419,15	307,05	194,77	0,00	0,00	0,00
960,00	1042,95	931,50	708,07	483,89	371,53	258,98	146,25	0,00	0,00
980,00	1106,75	995,00	770,95	546,18	433,52	320,68	207,66	0,00	0,00
1000,00	1168,40	1056,31	831,61	606,20	493,23	380,08	266,75	153,25	0,00
1020,00	1228,05	1115,62	890,22	664,13	550,83	437,34	323,69	209,86	0,00
1040,00	1285,87	1173,06	946,94	720,13	606,48	492,64	378,64	264,47	150,13
1060,00	1341,98	1228,79	1001,90	774,35	660,32	546,12	431,76	317,23	202,52
1080,00	1396,50	1282,91	1055,23	826,90	712,49	597,91	483,16	368,25	253,18
1100,00	1449,54	1335,54	1107,05	877,91	763,09	648,12	532,98	417,68	302,22
(...)									
1500,00	2306,40	2182,44	1934,14	1685,34	1560,75	1436,03	1311,19	1186,22	1061,12
(...)									
2000,00	3107,24	2969,02	2692,29	2415,14	2276,40	2137,57	1998,63	1859,59	1720,45
(...)									
2800,00	4154,27	3992,61	3669,02	3345,10	3183,00	3020,83	2858,57	2696,22	2533,79

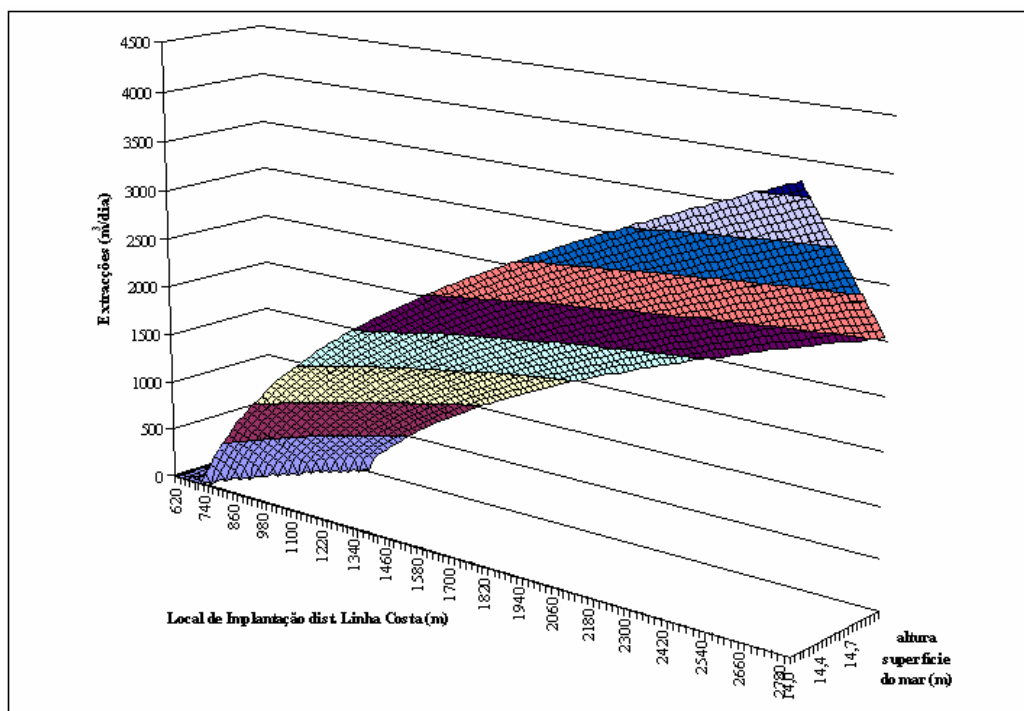


Figura 1 - Extracção total máxima em 3 captações vs local de implantação para $ds=300$ m vs altura da água do mar

A extracção máxima permitida no conjunto das 3 captações em cada eventual local de implantação, quando a subida do nível do mar é de 0,10 m e para que seja respeitada uma distância entre o pé da interface e a captação central de 300,0 m está representada no gráfico seguinte:

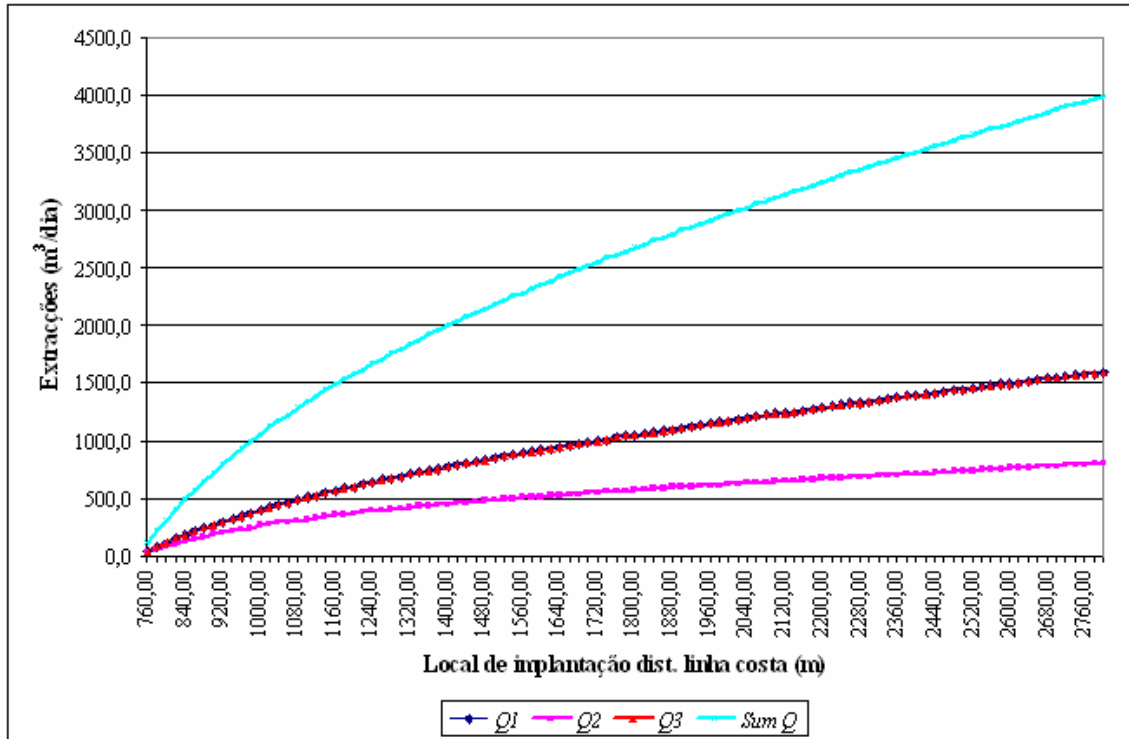


Figura 2 – Extracção vs dist. à linha de costa da implantação das 3 captações para altura da superfície do mar $B = 14,10$ m e $ds = 300$ m

Na figura seguinte pode verificar-se a redução na extracção máxima nas 3 captações quando implantadas a 1100,0 m da linha de costa em função da altura da superfície do mar quando se pretende uma distância de segurança de $ds = 300$ m.

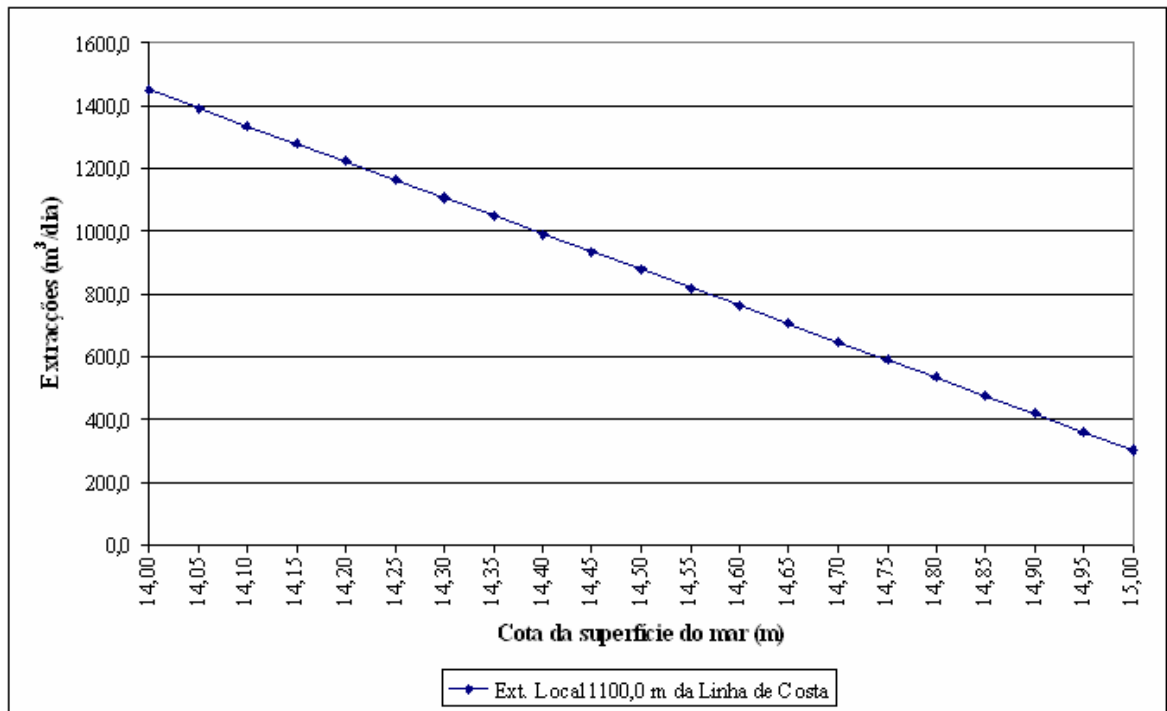


Figura 3 – Extracção máxima vs altura da superfície do mar para implantação das 3 captações a 1100,0 m da linha de costa e $ds = 300$ m

Na figura seguinte representam-se as curvas de redução nas extracções em relação à situação inicial ($B=14,0$ m) em função da distância à linha de costa do local de implantação das 3 captações e da altura da superfície do mar quando $ds = 300$ m.

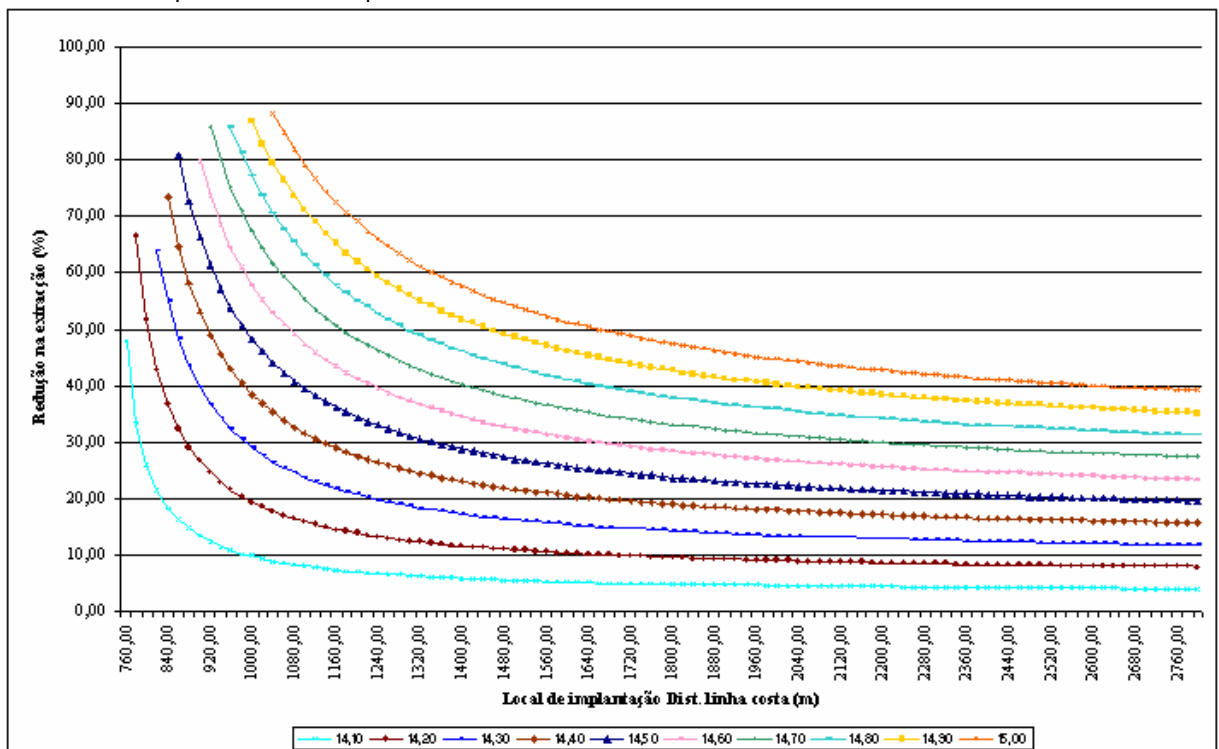


Figura 4 – Redução nas extracções em relação à situação inicial vs dist. à linha de costa do local de implantação das 3 captações e vs altura da superfície do mar e $ds = 300$ m

Na figura seguinte encontra-se o primeiro local de extracção (distância à linha de costa) em que é respeitada a distância de segurança de 300,0 m em função da altura do nível do mar.

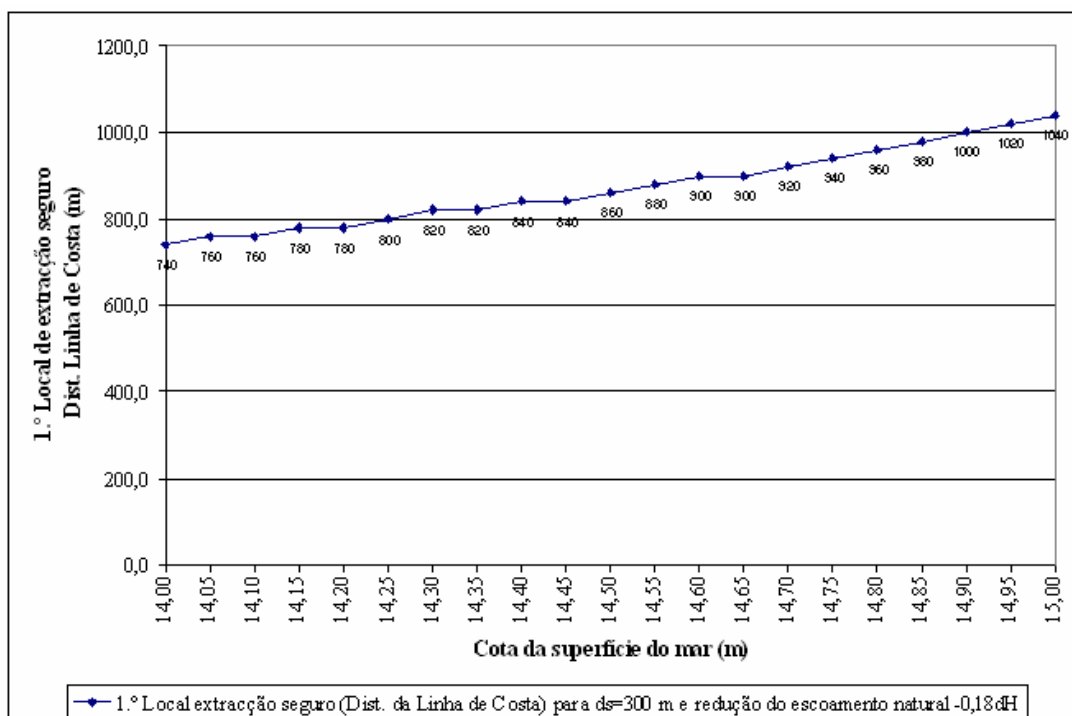


Figura 5 - 1.º local de extração em que é respeitada a distância de segurança de 300,0 m em função da altura do nível do mar

Com o propósito de estudar o efeito do aumento da distância de segurança (ds) executou-se o modelo de gestão para outros valores de ds . Os resultados quando a $ds = 500$ m encontram-se nos quadros seguintes:

Quadro 4 - Extracções em 3 captações vs local de implantação para $ds=500$ m $B=14,0$ m e $q=0,6$ m³/dia

Local (m)	Q_1 (m ³ /dia)	Q_2 (m ³ /dia)	Q_3 (m ³ /dia)	Sum Q (m ³ /dia)
940.00	57,03	32,33	57,03	146,38
(...)				
1000.00	198,13	107,20	198,13	503,46
(...)				
2000.00	1354,16	452,24	1354,16	3160,57
(...)				
2800.00	1895,08	546,52	1895,08	4336,68

Quadro 5 - Extracções em 3 captações vs local de implantação para $ds=500$ m $B=14,50$ m e $q=0,51$ m³/dia

Local (m)	Q_1 (m ³ /dia)	Q_2 (m ³ /dia)	Q_3 (m ³ /dia)	Sum Q (m ³ /dia)
1060.00	60,91	31,52	60,91	153,34
(...)				
2000.00	1034,32	345,43	1034,32	2414,07
(...)				
2800.00	1516,93	437,46	1516,93	3471,33

Na representação seguinte encontram-se os resultados do estudo da redução nas extracções em função da distância à linha de costa do local de implantação das 3 captações e da distância de segurança quando a subida do mar é de 1,0 m ($B = 15,0$ m).

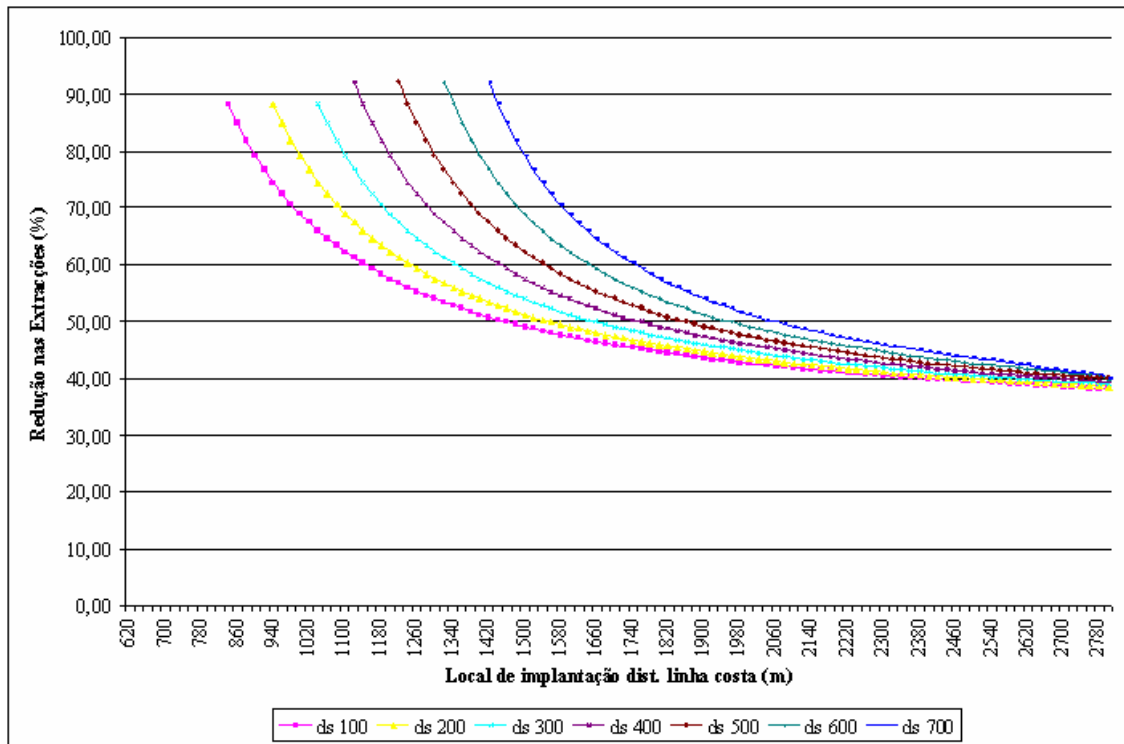


Figura 6 – Redução nas extracções e relação à situação inicial vs dist. à linha de costa do local de implantação das 3 captações e vs ds para altura da superfície do mar $B = 15,0$ m

5.2 - EXTRACÇÕES MÁXIMAS NUMA BARREIRA DE TRÊS CAPTAÇÕES VERSUS LOCAL DE IMPLANTAÇÃO COM AUMENTO DO NÍVEL DO MAR E REDUÇÃO ACENTUADA DO ESCOAMENTO NATURAL

Admitindo, agora, como cenário uma redução acentuada do escoamento natural em 70% se a subida do nível do mar for de 1,0 m, então a relação entre o caudal por metro linear e a variação do nível do mar será:

$$q = 0,60 - 0,42\Delta h \quad (12)$$

Seguindo esta lei a superfície das extracções máximas em função do local de implantação e do nível do mar quando a $ds = 300$ m está representada na figura seguinte:

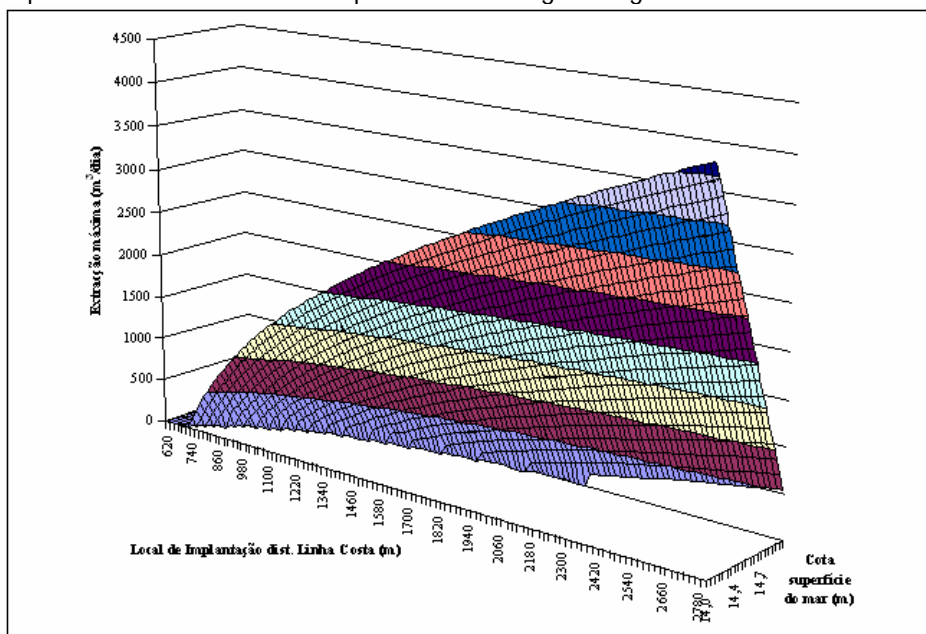


Figura 7 - Extracção total máxima em 3 captações vs local de implantação para $ds=300$ m vs altura da água do mar com redução acentuada do escoamento natural

A curva que representa o primeiro local de extracção em que é respeitada a distância de segurança de 300,0 m em função da altura do nível do mar para este cenário de redução acentuada do escoamento natural tem o andamento que está representado na figura seguinte:

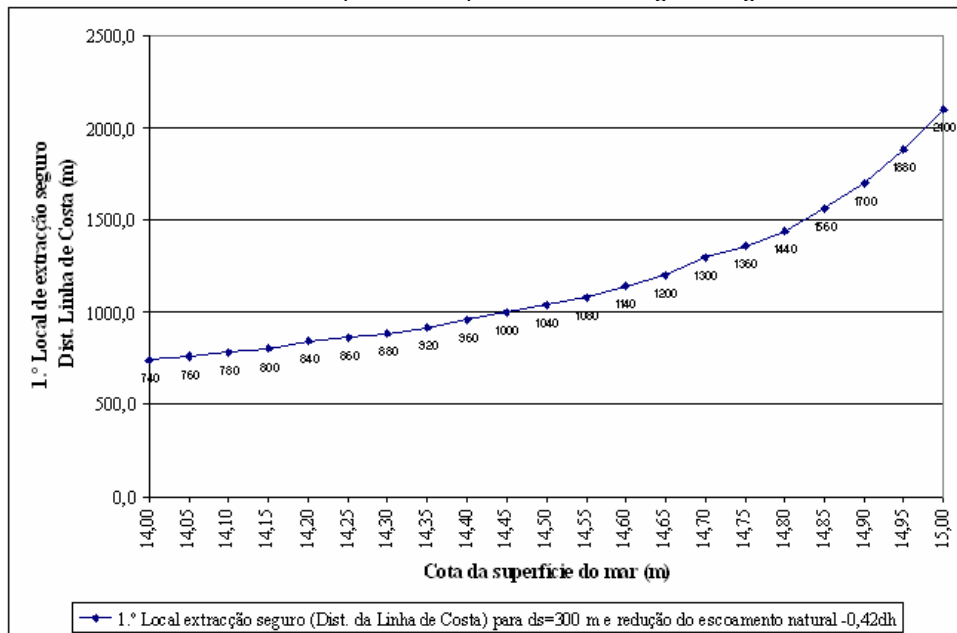


Figura 8 - 1.º local de extracção em que é respeitada a distância de segurança de 300,0 m em função da altura do nível do mar com redução acentuada do escoamento natural

6 - CONCLUSÕES

Neste trabalho fez-se o relato dos estudos realizados para o adequado planeamento e gestão de sistemas de captação e de controlo da intrusão marinha em aquíferos do litoral face à expectável subida do nível do mar.

Os casos de estudo envolveram os efeitos das alterações climáticas nas extracções máximas num conjunto de 3 captações em função do local de implantação (distância à linha de costa) e da distância de segurança entre o pé da interface água doce / água salgada e o ponto de controlo. Estes ensaios permitem verificar que o modelo desenvolvido pode ser usado para o planeamento e controlo otimizados de sistemas de captação e de abastecimento de água a zonas costeiras face a um conjunto de eventuais cenários de subida do nível do mar e de redução do escoamento natural no aquífero. O modelo determina o conjunto de extracções máximas em função do eventual local de implantação das captações para que se mantenha sob controlo o volume de água salgada no aquífero, ou seja que se evite a invasão das captações pela intrusão marinha.

Os estudos conduziram a curvas que permitem a definição da extracção máxima em função do cenário da alteração climática, do local de implantação de uma barreira de três captações e da distância de segurança. Os efeitos das mudanças climáticas na gestão das extracções de aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão marinha são função do local de implantação e da distância de segurança. Constata-se que implantando as captações em locais mais próximos do mar, para além das extracções máximas serem relativamente inferiores em relação a outros locais alternativos mais afastados da linha de costa, a redução nas extracções, face a eventual subida do nível do mar, para manter o pé da interface à distância de segurança pretendida é muito mais severa. A representação dos resultados do modelo de gestão permite uma melhor compreensão da necessidade dum adequado planeamento da localização das captações que antecipadamente considere a evolução da projectada subida do nível do mar. A visualização dos valores da extracção máxima versus local de implantação,

ajuda na percepção da necessidade de uma adequada política de gestão que vigile continuamente a evolução do fenómeno da intrusão marinha.

Assim, conclui-se que o modelo apresentado pode ser um instrumento útil para a definição de políticas sustentáveis da utilização da água em zonas costeiras.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor regista o apoio da FCT ao Centro de Engenharia Civil da UMinho.

BIBLIOGRAFIA

1. BAKKER, Mark e Schars, F. - "The Sea Water Intrusion (SWI) Package Manual", Version 1, Dezembro, 2002;
2. FERREIRA DA SILVA, Júlio - "Gestão otimizada à escala regional de sistemas aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão salina - Um modelo global para o uso sustentável da água em regiões costeira", Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil - Hidráulica, Universidade do Minho, 2003;
3. FERREIRA DA SILVA, Júlio F. "Localização e gestão optimizadas de sistemas de captação e de controlo da intrusão marinha em aquíferos costeiros", 7.º SILUSBA, Évora, 30 Maio-2 Junho; 2005;
4. SANTOS, F. D., K. Forbes and R. Moita - "Climate change in Portugal scenarios, impacts and adaptation measures - SIAM project", Gradiva, Fundação Caloute Gulbenkian, FCT; 2002;
5. STRACK, O. D. L. - "Groundwater Mechanics", Prentice Hall, 1989.

