

LOCALIZAÇÃO E GESTÃO OPTIMIZADAS DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO E DE CONTROLO DA INTRUSÃO MARINHA EM AQUÍFEROS COSTEIROS

Júlio F. FERREIRA DA SILVA

*Doutor em Engenharia Civil – Hidráulica Prof. Auxiliar do Departamento de Eng^a Civil da Universidade do Minho, Azurém 4800-058 Guimarães, Portugal
253510207, juliofs@civil.uminho.pt*

RESUMO

Neste trabalho o problema que pretende resolver-se consiste em determinar qual será a melhor implantação num aquífero costeiro numa barreira de captações e a extracção óptima em cada, para que seja maximizado o resultado económico e para que, simultaneamente, seja assegurado o controlo da intrusão salina, mantendo a interface água doce / água salobra para além da distância de segurança mais adequada. O incremento da recarga do aquífero revela-se como um sistema de controlo do fenómeno da intrusão marinha. Pretende, também, estudar-se o efeito do incremento da recarga realizada em furos implantados a uma dada distância das captações. A associação de técnicas de optimização e de modelos de simulação do comportamento dos sistemas hídricos e de abastecimento de água permite a determinação dos melhores locais de implantação das captações e dos respectivos regimes de extracção. Realça-se que a utilização dos recursos hídricos disponíveis nas áreas costeiras deve ser integrada e sustentável. A implementação dum sistema de controlo do equilíbrio dinâmico água doce / água salgada contribui para aumentar a segurança na continuidade do abastecimento de água, podendo, mesmo, revelar-se economicamente interessante.

Palavras-chave - Modelos de simulação de aquíferos, Intrusão salina, Optimização de sistema de captação e de abastecimento de água.

1 - INTRODUÇÃO

Na concepção e gestão dum sistema de abastecimento de água que envolve origens localizadas em aquíferos costeiros potencialmente sujeitos à intrusão marinha confrontam-se diversos interesses, designadamente o económico, o controlo da interface água doce / água salgada e, subsequentemente, a preservação dos equilíbrios naturais. Estando a água subterrânea facilmente disponível e apresentando características que permitam a sua utilização, então o critério económico pressionará no sentido do incremento das extracções. No entanto, à diminuição do volume de água doce no aquífero costeiro corresponde o avanço da cunha salina e a inerente degradação da qualidade da água. O controlo do volume de água doce no aquífero pode ser conseguido incrementando a recarga, designadamente, através da infiltração ou injeção em furos.

A concepção, dimensionamento e exploração dos sistemas de captação e de abastecimento de água em zonas costeiras 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. Esta definição poderá ser melhor fundamentada com recurso a um conjunto de ferramentas de optimização e de simulação do comportamento dos sistemas físicos envolvidos. Estas técnicas de optimização e modelos de simulação do fenómeno intrusão salina devidamente interligadas constituem um modelo global de apoio ao planeamento e gestão dos recursos hídricos disponíveis nas regiões costeiras. Este modelo de gestão (ou de Optimização-Simulação) para determinar as melhores políticas de utilização da água das regiões costeiras considera os custos de investimento e de exploração dos sistemas de abastecimento de água e dos sistemas de controlo da intrusão salina e de preservação dos equilíbrios naturais, designadamente através do incremento da recarga. O local de implantação dos sistemas de captação e de controlo da intrusão salina têm repercussões nas quantidades a extrair e, consequentemente, nos custos de investimento com a construção das captações, com a instalação dos equipamentos electromecânicos, com a construção de estações de tratamento, de estações elevatórias, de adutoras, de reservatórios e de sistemas de recarga. O funcionamento de cada um destes órgãos implica custos de exploração que serão, também, função dos respectivos caudais.

A adequada utilização dos aquíferos costeiros obriga a que seja dada atenção especial ao critério do controlo do fenómeno da intrusão marinha. Assim, é importante determinar a extracção possível para que a interface seja mantida para além de determinada distância em relação a pontos de controlo. A inclusão do conceito de distância de segurança disponibiliza eventuais estratégias alternativas que poderão ser seleccionadas em função do risco que o decisor queira assumir. O modelo de gestão disponibiliza as melhores políticas de extracção e a correspondente distância de segurança para cada eventual local de implantação do sistema de captação.

2 - IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

O problema da gestão optimizada de sistemas de captação e de abastecimento de água a partir de aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão salina consiste em determinar os melhores locais e as respectivas extracções que satisfaçam as solicitações dos utilizadores, mantendo, no entanto, o controlo sob o fenómeno da intrusão salina.

A adequada determinação dos locais de implantação dos sistemas de captação e de controlo da interface água doce / água salgada exige a utilização conjunta de técnicas de optimização e de modelos de simulação do comportamento do aquífero costeiro e dos órgãos do sistema de transporte da água. Técnicas de optimização, como os algoritmos genéticos divulgados por GOLDBERG (1989), podem ser moldados para determinarem as melhores políticas de implantação das captações, os regimes de extracção e os esquemas de funcionamento do sistema de abastecimento de água. 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 e outros (2004) defende-se

uma metodologia que associa métodos de otimização e modelos de simulação da intrusão marinha em cascata num grau de complexidade crescente. Assim, o modelo de apoio à gestão tem em vista a definição de estratégias que permitam a maximização dos resultados económicos e que mantenham sob controlo o volume de água doce no aquífero, ou seja a qualidade das águas subterrâneas afectadas pela intrusão marinha.

Se for adoptada uma perspectiva regional na concepção e dimensionamento do sistema de captação e de abastecimento de água a uma área costeira, então verificar-se-á que são vários os órgãos que apresentam custos de investimento e de exploração dependentes da localização das captações subterrâneas e das quantidades que são possíveis extrair do aquífero.

O local de implantação das captações subterrâneas condiciona o comprimento das condutas adutoras que transportam a água extraída em cada origem até à estação de tratamento. Os valores máximos das extracções determinam o diâmetro das adutoras, a capacidade do reservatório de regularização de bombagem, a selecção dos equipamentos para o tratamento, a selecção dos equipamentos electromecânicos para a estação elevatória, a conduta elevatória a jusante da central de tratamento e elevação e a capacidade do reservatório de regularização de distribuição. Na figura seguinte estão esquematizados os sistemas de captação, de abastecimento de água e de controlo da intrusão salina numa zona costeira.

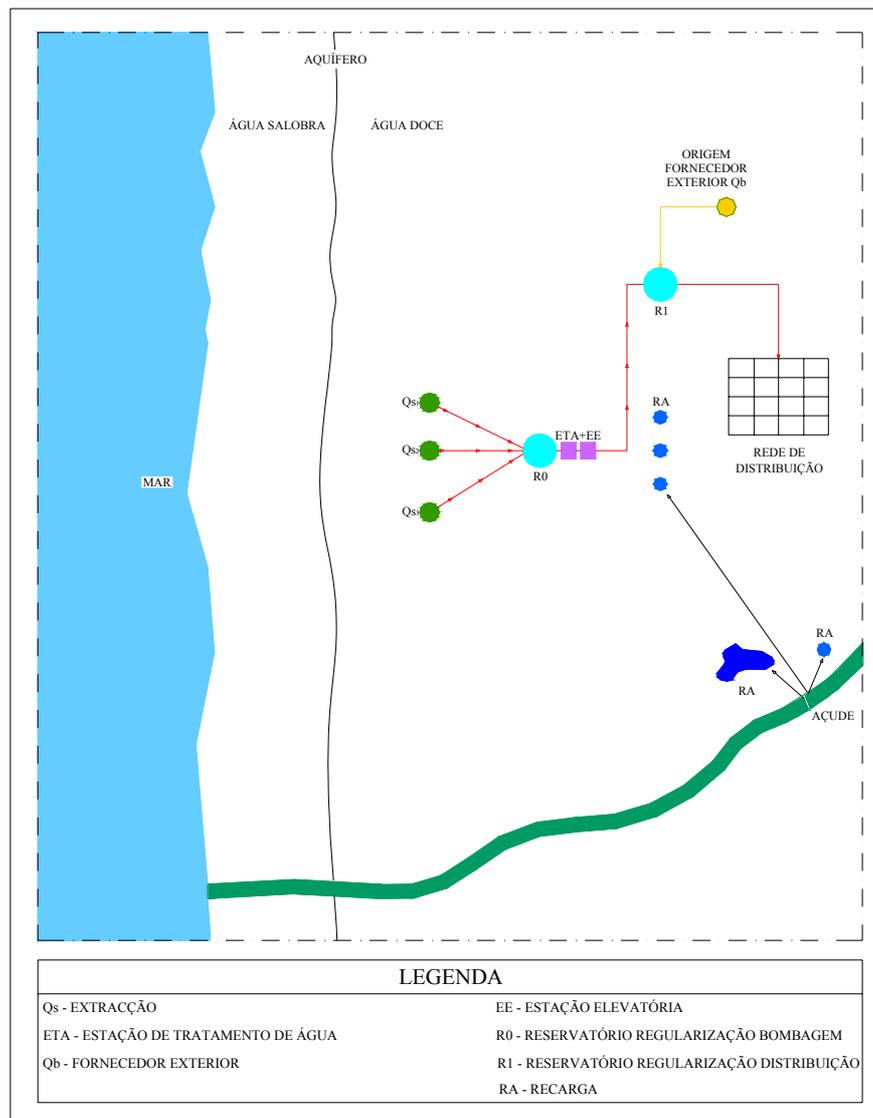


Figura 1 - Esquema de sistema de captação e de abastecimento de água a região costeira

3 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

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

3.1 - Objectivo

O objectivo é matematicamente representado pela maximização da diferença entre os benefícios e os custos totais na região ao longo do período de análise.

$$\max Z = (B_{total} - C_{total}) \quad (1)$$

sendo: B_{total} - Total dos Benefícios na região ao longo do período de análise; C_{total} - Total dos Custos na região ao longo do período de análise.

O benefício global pode ser quantificado através de:

$$B_{total} = \sum_{s=1}^{N_s} (c_{b,s} + a_{b,s} Q_s^{\beta_s}) + \sum_{b=1}^{N_b} (c_{b,b} + a_{b,b} Q_b^{\beta_b}) \quad (2)$$

Sendo: N_s - Número de captações subterrâneas; N_b - Número de origens superficiais e de fornecedores exteriores; c , a e β - parâmetros da função benefício.

O custo total terá como parcelas os encargos associados às captações subterrâneas, às origens superficiais ou fornecedores exteriores e aos sistemas de prevenção da degradação e reabilitação ambiental.

$$C_{total} = \sum_{t=1}^T [C_{S,t} + C_{B,t} + C_{R,t}] \quad (3)$$

em que: $C_{S,t}$ - Custo associado ao conjunto de origens subterrâneas no instante t ; $C_{B,t}$ - Custo associado ao conjunto de origens superficiais e exteriores à região no instante t ; $C_{R,t}$ - Custo associado ao sistema de prevenção da degradação e de reabilitação (por exemplo por recarga artificial) no instante t .

A existência de cada um dos órgãos de um sistema de abastecimento ou de recarga (captações, estações elevatórias, estações de tratamento, condutas, reservatórios) implica custos com as obras de construção civil e a instalação de equipamentos. A caracterização e quantificação completas dos benefícios e custos envolvidos na gestão de sistemas aquíferos do litoral podem ser encontradas em FERREIRA DA SILVA (2002, 2003). Esses investimentos podem ser expressos por tabelas ou, mais simplificada, através de modelos agregados do tipo:

$$(CIC)_S = \sum_{f=1}^{N_F} v_t (c_s + a_s H_{s,n}^{\alpha_s} Q_{s,n}^{\beta_s}) \varepsilon \quad (4)$$

em que: $(CIC)_S$ - Custo de investimento na captação subterrânea s ; v_t - Factor que transforma um valor futuro num Valor Actual; c_s , a_s , α_s , β_s , etc. - coeficientes das funções de custo, $Q_{s,n}$ - Caudal de projecto da origem subterrânea s ou caudal a extrair no horizonte N_F ; H - altura de elevação; ε - factor relacionado com a estratégia comercial do construtor e/ou instalador e situação de mercado.

Os encargos de exploração poderão ser calculados usando expressões do tipo:

$$CE = \sum_{t=1}^T v_t \left\{ \sum_{s=1}^{N_s} \left[ec_{S,t} (H_{s,0} - h_{s,t})^{\alpha_{Cse}} Q_{S,t}^{\beta_{Cse}} + (ee_{S,t} H_{S,t}^{\alpha_{Ee}} Q_{S,t}^{\beta_{Ee}}) + (et_{S,t} H_{S,t}^{\alpha_{Te}} Q_{S,t}^{\beta_{Te}}) + (ea_{S,t} L_{S,t} Q_{S,t}^{\beta_{Ae}}) \right] \right. \\ \left. + \sum_{b=1}^{N_b} (ee_{b,t} Q_{b,t}^{\beta_{Ce}}) + \sum_{r=1}^{N_r} (eR_{r,t} Q_{r,t}^{\beta_r}) \right\} \quad (5)$$

sendo: CE - Custo de exploração; α_c , β_c , etc. - coeficientes das funções de custo, L_s - comprimento da adutora associada à origem s .

3.2 - Restrições

O controlo da intrusão salina no aquífero será realizado impondo um valor máximo para a distância entre do “pé” da interface aos 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 então os pontos de controlo serão as captações centrais. Exigindo que os pontos de controlo não sejam invadidos, então limitar-se-á o avanço do pé da interface:

$$(x_{pe})_s \leq (x_{pc})_s - (ds)_s \quad \forall s, s=1,2,\dots,N_{pc} \quad (6)$$

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

As restrições são relativas à garantia das solicitações, aos limites de extracção de cada captação e às cotas piezométricas mínimas:

$$\sum Q_i = D \quad i = 1, \dots, (N_s + N_b) \quad (7)$$

$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max} \quad i = 1, \dots, (N_s + N_b) \quad (8)$$

$$x_{s,\min} \leq x_s \leq x_{s,\max} \quad s = 1, \dots, N_s \quad (9)$$

$$ds_{\min} \leq ds \leq ds_{\max} \quad ds = 100, 200, \dots, 800 \quad (10)$$

$$h_s \geq h_0 \quad s = 1, \dots, N_s \quad (11)$$

em que: D é a solicitação; N_s - Número de origens subterrâneas; N_b - Número de origens superficiais e fornecedores exteriores; $Q_{i,\min}$ e $Q_{i,\max}$ os limites de cada origem; $x_{s,\min}$ e $x_{s,\max}$ os limites da implantação de cada captação subterrânea, ou seja da distância à linha de costa; ds - distância de segurança; h_0 a cota piezométrica mínima admissível.

Formulando o problema desta forma e sendo o custo do fornecimento de água com origem superficial superior à de origem subterrânea, então o modelo de gestão procurará extrair o máximo de água do aquífero mantendo a interface à distância de segurança mais interessante.

4 - APLICAÇÕES

Nos estudos seguintes considerar-se-á o sistema esquematizado na figura 1. Admitir-se-á que o terreno possui um declive de 0,5%, aumentando as cotas com o afastamento em relação ao mar. A central de tratamento e elevação de água (EE) fica implantada no centro do aquífero e a 3500 m da linha de costa. Admite-se que seja possível implantar as adutoras associadas às captações adoptando o traçado mais directo, pelo que o respectivo comprimento será determinado em função do local de implantação. A adutora elevatória entre a estação elevatória (EE) e o reservatório de regularização de distribuição (R1) tem 1000 m de comprimento. Considera-se que as solicitações crescerão linearmente ao longo do período de análise económica. Estima-se que no ano de arranque do empreendimento a utilização média diária anual seja de 3000,0 m³/dia, sendo a taxa de crescimento de 3% na primeira fase e de 1,875% na segunda etapa de 20 anos. O preço médio actual da energia será de 0,0848 €/kWh, sendo admitido um crescimento segundo a fórmula de juros compostos com a taxa de 2%. Para a análise económica adoptar-se-á o critério do valor actual, sendo o valor do dinheiro de 5%.

Admitir-se-á que as captações subterrâneas serão implantadas num aquífero com espessura de 14 m, condutividade hidráulica de 100 m/dia e escoamento específico de 0,6 m³/m.dia. Considera-se, também, a existência de uma origem superficial ou fornecedor exterior complementar às origens subterrâneas. Não ocorrendo qualquer extracção o pé da interface localiza-se a 418,54 m do mar. 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.

4.1 - Extracções óptimas numa barreira de três captações versus local de implantação

O problema que pretende resolver-se consiste em determinar qual será a melhor implantação numa barreira de três captações e a extracção óptima em cada para que seja maximizado o resultado económico e, simultaneamente, para que o controlo da intrusão salina seja assegurado mantendo a interface água doce / água salobra para além da distância de segurança mais adequada.

As captações distam entre si 1000 m. Admite-se que a área disponível para implantar o conjunto de três captações vai desde os 420 a 2800 m do mar, ($420 \leq x_s \leq 2800$) e que a extracção máxima em cada captação é de 2000 m³/dia.

A melhor solução encontrada pelo modelo de optimização-simulação indica que as origens deverão ser implantadas a $x_{s,max}$, o limite da implantação de cada captação subterrânea. Com o propósito de determinar a extracção óptima em função do eventual local de implantação e para cada distância de segurança foi desenvolvido um procedimento que calcula, também, os custos parciais associados ao sistema de captação, de abastecimento de água e de controlo da intrusão salina. As melhores políticas de extracção para o conjunto das três captações, quando a distância de segurança (ds) é, respectivamente, de 300 e 500 m são as registadas nos quadros seguintes:

Quadro 1 - Extracções em 3 captações vs local de implantação para $ds=300$ m

Local (m)	Q1 (m ³ /dia)	Q2 (m ³ /dia)	Q3 (m ³ /dia)	Sum Q (m ³ /dia)
820.00	190.71	135.55	190.71	516.96
(...)				
900.00	311.52	213.59	311.52	836.62
(...)				
1000.00	439.53	289.34	439.53	1168.40

Quadro 2 - Custos relativos às extracções em 3 captações vs implantação para $ds=300$ m

Local (m)	CIC (10 ³ €)	CIR0 (10 ³ €)	CIETA (10 ³ €)	CIEE (10 ³ €)	CIACR0 (10 ³ €)	CIA (10 ³ €)	CIR1 (10 ³ €)	CIT (10 ³ €)	CET (10 ³ €)	CT (10 ³ €)
820.00	178.9	18.84	117.0	49.25	397.53	59.86	66.49	887.9	5741.6	6629.5
(...)										
900.00	183.5	27.0	118.9	57.6	386.7	74.2	93.6	941.5	5497.5	6439
(...)										
1000.00	188.8	34.7	120.8	65.5	405.7	74.2	119.3	1009.0	5186.1	6195.2

Sendo: ds - distância de segurança; CIC - Custo de Investimento nas Captações; $CIR0$ - Custo de Investimento no Reservatório de Regularização de bombagem; $CIETA$ - Custo de Investimento na Estação de tratamento de Água; $CIACR0$ - Custo de Investimento na Adutora entre as Captações e $R0$; CIA - Custo de Investimento na Adutora elevatória entre $R0$ e $R1$ (Res distribuição); $CIR1$ - Custo de Investimento no Reservatório de regularização de distribuição $R1$; CIT - Custo Total de Investimento; CET - Custo Total de Exploração; CT - Custo Total.

Quadro 3 - Extracções em 3 captações vs local de implantação par $ds=500$ m

Local (m)	Q1 (m ³ /dia)	Q2 (m ³ /dia)	Q3 (m ³ /dia)	Sum Q (m ³ /dia)
1020.00	240.28	128.07	240.28	608.64
(...)				
1500.00	913.10	364.69	913.10	2190.89
(...)				
2000.00	1354.16	452.24	1354.16	3160.57

Quadro 4 - Custos relativos às extracções em 3 captações vs implantação para $ds=500$ m

Local (m)	CIC (10 ³ €)	CIR0 (10 ³ €)	CIETA (10 ³ €)	CIEE (10 ³ €)	CIACR0 (10 ³ €)	CIA (10 ³ €)	CIR1 (10 ³ €)	CIT (10 ³ €)	CET (10 ³ €)	CT (10 ³ €)
1020.00	180.4	21.3	117.6	51.7	370.4	59.9	74.6	875.8	5650.9	6526.7
(...)										
1500.00	208.0	55.7	126.4	87.9	438.6	90.4	190.4	1197.3	3933.0	5130.3
(...)										
2000.00	229.3	73.3	131.5	107.2	357.4	108.3	251.0	1258.0	2894.0	4152.0

As representações de todos os resultados obtidos quando a distância de segurança exigida (d_s) é, respectivamente de 300 m e de 500 m, encontram-se nos gráficos seguintes:

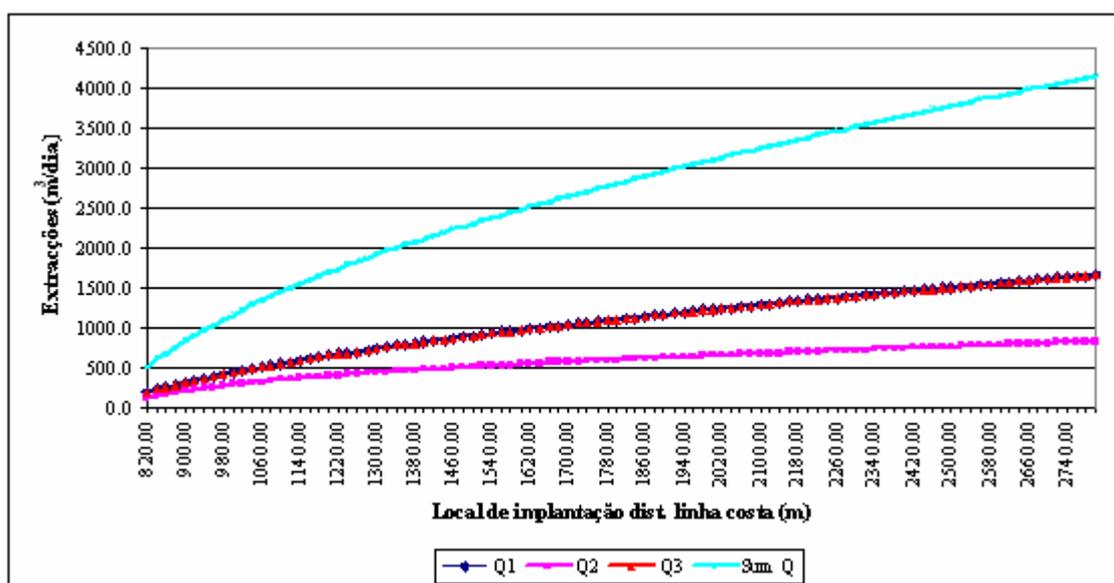


Figura 2 - Extracção óptima em 3 captações vs local de implantação para $d_s = 300$ m

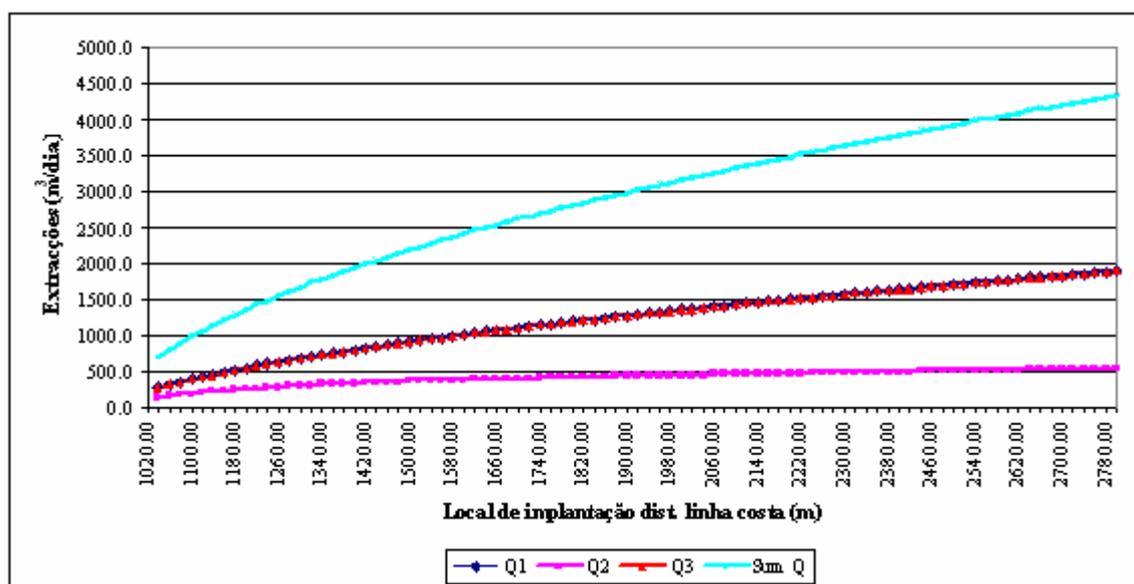


Figura 3 - Extracção óptima em 3 captações vs local de implantação para $d_s = 500$ m

A análise das figuras anteriores permite constatar que o modelo determina a melhor política de extracções atribuindo o mesmo valor às captações laterais (Q1 e Q3) e reduzindo a quantidade a retirar

da captação central, ou seja esta origem constitui o ponto de maior controlo do fenómeno da intrusão salina. Alargando o trabalho a outras distâncias de segurança obteve-se um conjunto de resultados que estão representados na figura seguinte:

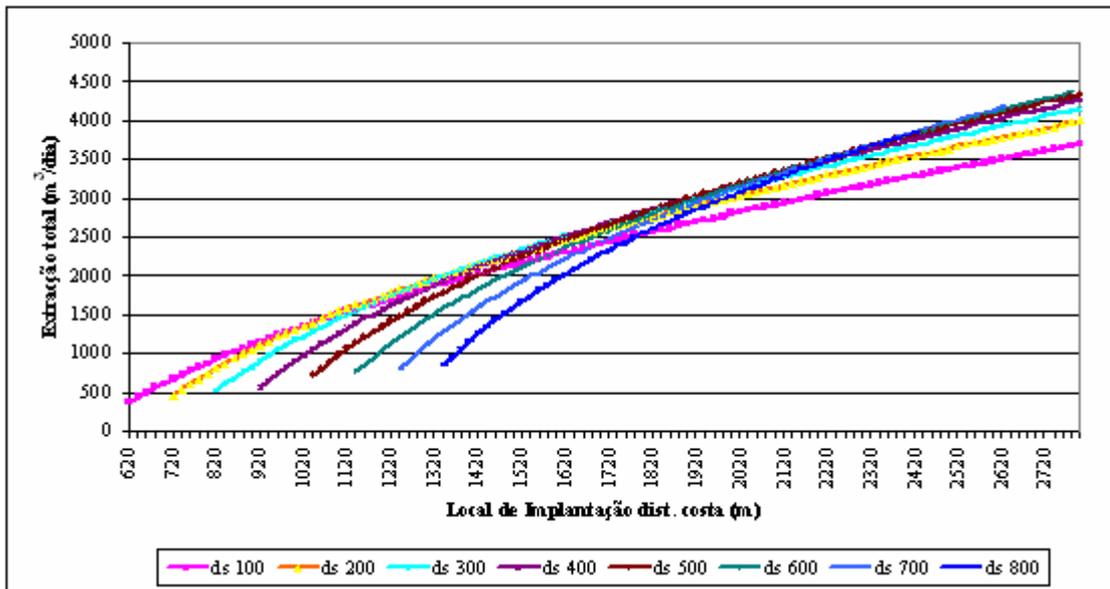


Figura 4 - Extracção total em 3 captações vs local de implantação para diversas ds

A observação desta figura permite-nos identificar que para cada distância ao mar das captações existe uma distância de segurança mais indicada. Na figura seguinte faz-se um resumo das distâncias de segurança mais aconselháveis em função do eventual local de implantação da barreira de extracção.

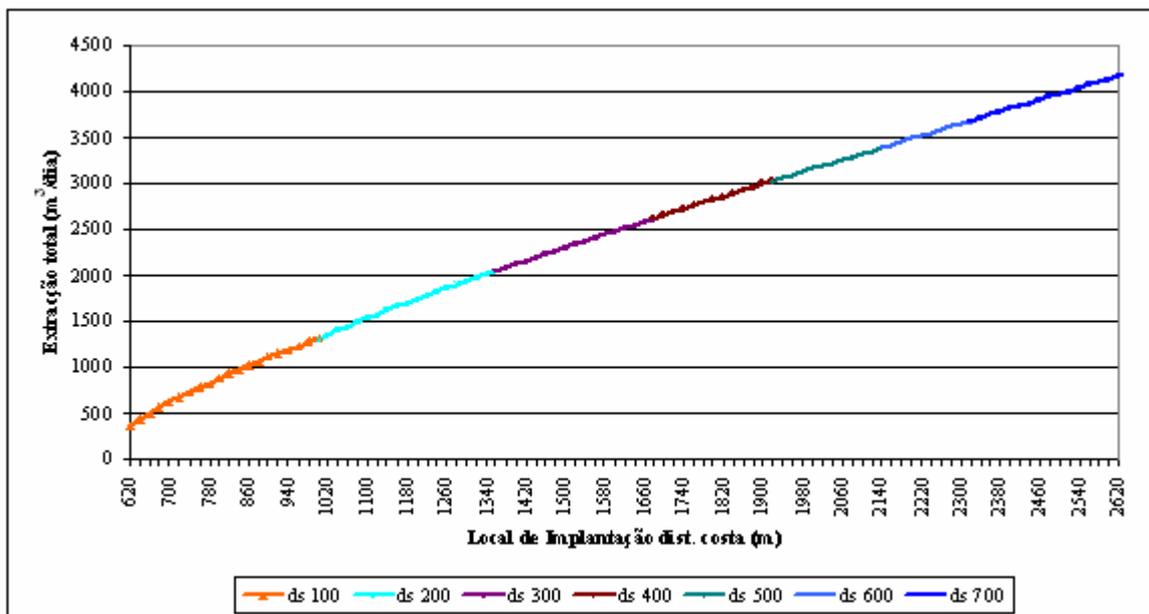


Figura 5 - Extracção total óptima em 3 captações vs local de implantação para ds aconselhável

4.2 - Locais de implantação e extracções óptimas com sistema de prevenção da degradação através do incremento da recarga

Neste caso o problema que pretende resolver-se consiste em determinar qual será a melhor extracção em cada captação numa barreira de três para que seja maximizado o resultado económico e, simultaneamente, para que o controlo da intrusão salina seja assegurado mantendo a interface água doce / água salobra para além da distância de segurança mais adequada com o incremento da recarga em três furos que infiltram no máximo 100 m³/dia cada quando implantados a 1000 m das captações na direcção perpendicular ao mar.

Os custos de investimento com a construção do sistema de recarga englobam as obras de construção civil para a realização de três furos e para a instalação de uma adutora entre a linha de água e o local de recarga.

O modelo de gestão, composto pela técnica de optimização e pelo modelo de simulação do comportamento do aquífero, indica que, em geral, a melhor solução será a utilização integral da capacidade de incremento da recarga.

As extracções e respectivos custos relativos ao mesmo sistema caracterizado no item anterior, mas agora com um sistema de recarga para controlo da intrusão salina, infiltrando 100 m³/dia em cada um dos três furos, estão registados nos quadros seguintes:

Quadro 5 - Extracções em 3 captações vs local de implantação para $ds=300$ m com incremento da Recarga

Local	Q1	Q2	Q3	Sum Q
(m)	(m ³ /dia)	(m ³ /dia)	(m ³ /dia)	(m ³ /dia)
820.00	250.41	195.95	250.41	696.77
900.00	372.56	274.39	372.56	1019.50
1000.00	502.03	350.52	502.03	1354.58

Quadro 6 - Custos relativos 3 captações vs implantação $ds=300$ m com incremento da Recarga

Local	CIC	CIR0	CIETA	CIEE	CIACR0	CIA	CIR1	CIT	CET	CT
(m)	(10 ³ €)									
820.00	181.4	23.6	118.1	54.0	397.5	59.9	82.1	916.5	5621.9	6538.4
900.00	186.3	31.4	120.0	62.0	420.3	74.2	108.0	1002.1	5321.1	6323.3
1000.00	191.7	38.8	121.9	69.8	440.7	74.2	133.0	1070.1	5012.3	6082.4

Quadro 7 - Extracções em 3 captações vs implantação $ds=500$ m com incremento da Recarga

Local	Q1	Q2	Q3	Sum Q
(m)	(m ³ /dia)	(m ³ /dia)	(m ³ /dia)	(m ³ /dia)
1020.00	279.48	196.04	279.48	755.00
1500.00	986.30	424.71	986.30	2397.30
2000.00	1430.99	511.98	1430.99	3373.96

Quadro 8 - Custos relativos 3 captações vs implantação $ds=500$ m com incremento da Recarga

Local	CIC	CIR0	CIETA	CIEE	CIACR0	CIA	CIR1	CIT	CET	CT
(m)	(10 ³ €)									
1020.00	182.4	25.0	118.4	55.5	384.0	74.2	86.9	926.4	5554.8	6481.2
1500.00	211.8	59.5	127.5	92.1	438.6	90.4	203.7	1223.6	3731.8	4955.5
2000.00	233.7	76.9	132.6	111.3	357.4	108.3	263.8	1284.0	2706.1	3990.1

As extracções máximas permitidas quando existe um sistema de incremento da recarga para os diversos eventuais locais de implantação das captações e quando as distâncias de segurança são, respectivamente, de $ds=300$ e $ds=500$ m estão representadas nos gráficos seguintes:

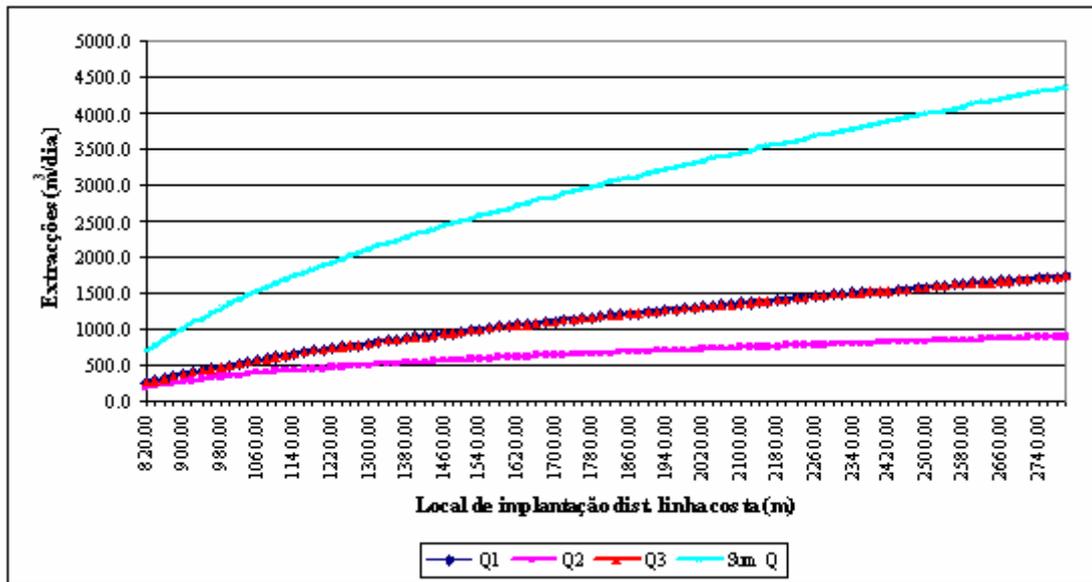


Figura 6 - Extracção óptima em 3 captações vs local de implantação para $ds = 300$ m e incremento da recarga

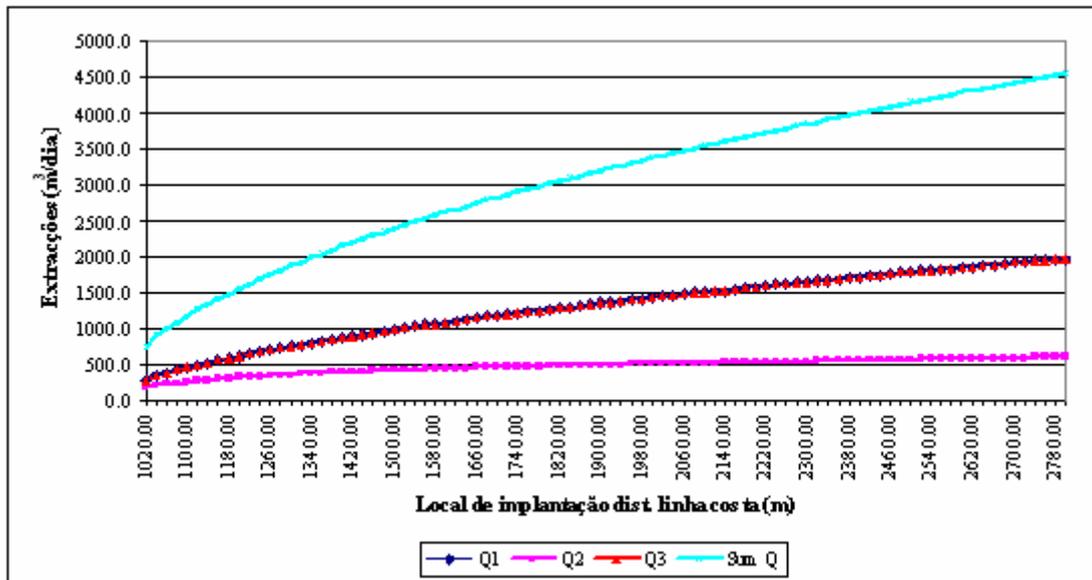


Figura 7 - Extracção óptima em 3 captações vs local de implantação para $ds = 500$ m e incremento da recarga

As distâncias de segurança mais aconselháveis em função do eventual local de implantação da barreira de extracção e da extracção pretendida quando existe um sistema de incremento da recarga encontram-se na figura seguinte:

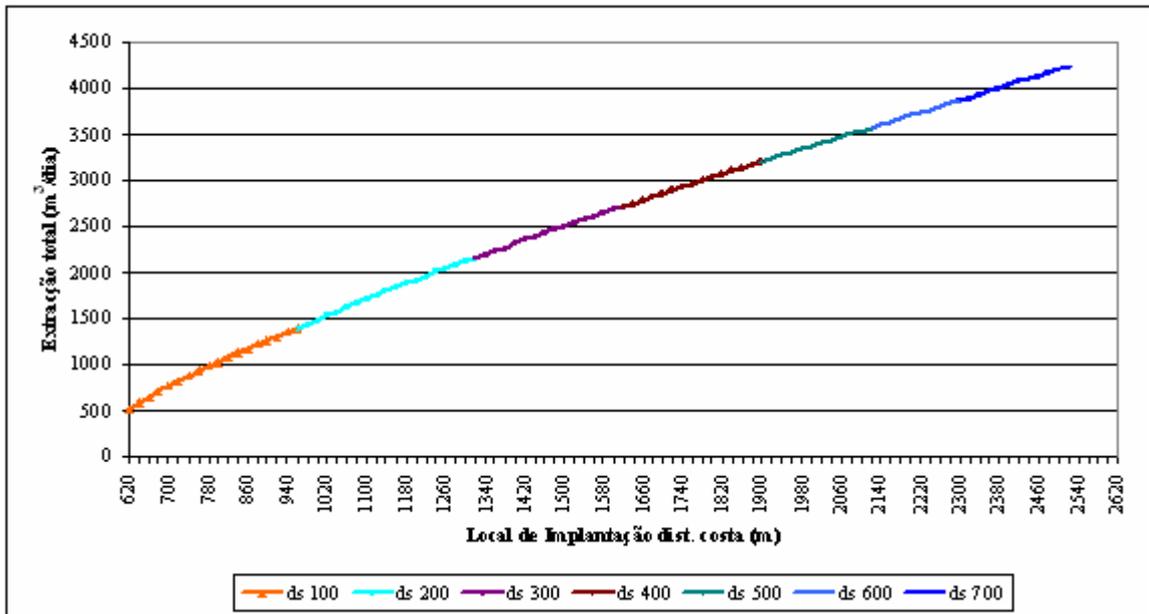


Figura 8 - Extracção total óptima em 3 captações vs local de implantação para ds aconselhável com sistema de recarga

Da análise comparada dos quadros e das figuras dos resultados do modelo de gestão relativos às situações em que no aquífero não existe sistema de recarga e quando passa a existir, resulta que com o incremento da recarga é possível aumentar as extracções e que os resultados económicos vêm melhorados. O acréscimo na extracção da primeira para a segunda situação, ou seja, a diferença entre os valores da figura 8 e da figura 5, encontra-se registado na figura seguinte:

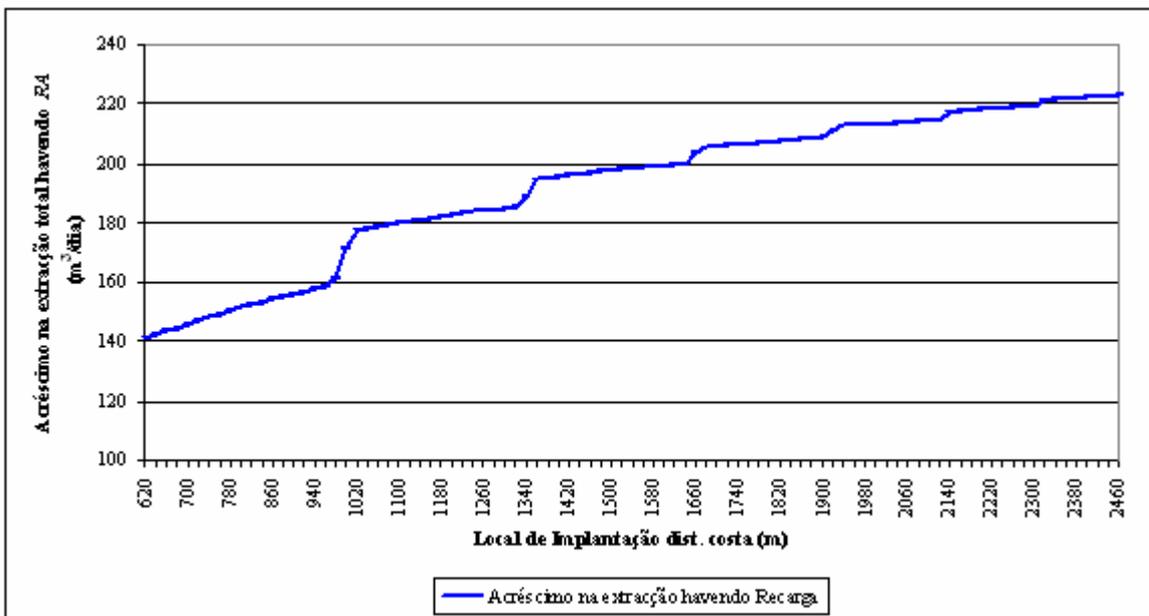


Figura 9 - Acréscimo na extracção total em 3 captações vs local de implantação com sistema de recarga

4.3 - Locais de implantação e extracções óptimas com mesmo valor em cada captação com sistema de prevenção da degradação através do incremento da recarga

Neste caso o problema que pretende resolver-se consiste em determinar qual será o efeito do incremento da recarga numa barreira de três captações com extracção idêntica em cada para que seja maximizado o resultado económico e, simultaneamente, para que o controlo da intrusão salina seja assegurado mantendo a interface água doce / água salobra para além da distância de segurança mais adequada. A imposição de igual extracção em cada captação pode ter interesse pela facilidade de aquisição equipamentos com características idênticas. O incremento da recarga em três furos implantados a 1000 m das captações na direcção perpendicular ao mar será inicialmente de 100 m³/dia cada. No estudo subsequente aumentar-se-á a recarga para 300 m³/dia em cada furo. Nos quadros seguintes estão resumidos os resultados.

Quadro 9 - Implantação para 3 captações com mesma extracção e recarga de 100 m³/dia

Designação	x_s (m)	y_s (m)	x_{pe} (m)	$x_s - x_{pe}$ (m)	Q_s (m ³ /dia)
Cap _{S1}	2000	1000	951.2	1048.8	1019.05
Cap _{S2}	2000	0	1600.0	400.0	1019.05
Cap _{S3}	2000	-1000	951.2	1048.8	1019.05

Quadro 10 - Custos de investimento para o sistema de abastecimento com 3 captações com mesma extracção e recarga de 100 m³/dia

Órgão	CI (10 ³ €)
Captações	226.13
Reservatório Reg. Bombagem	71.45
Estação de tratamento	130.94
Estação elevatória	105.22
Adutora Cap-R0	378.88
Adutora EE-R1	108.34
Reservatório Reg. Distribuição	244.78
Sistema de Recarga	170.33
Custo total de investimento	1,436.07

Quadro 11 - Custos de exploração para o sistema de abastecimento com 3 captações com mesma extracção e recarga de 100 m³/dia

Tipo de custo de Exploração	CE (10 ³ €)
VACE Captações-R0	399.10
VACE EE-R1	505.28
VACET	234.59
VACEb	1,973.06
VACER	234.59
Soma Valor Actual dos Custos Exploração	3,346.62

Sendo VACER - Valor actual do custo de exploração com o sistema de recarga.

Quadro 12 - Resultado económico para o sistema de abastecimento com 3 captações com mesma extracção e recarga de 100 m³/dia

Benefício	38,279.29 x 10 ³ €
Custo total de investimento	1,436.07 x 10 ³ €
Soma Custos Exploração	3,346.62 x 10 ³ €
Resultado	33,496.60 x 10 ³ €

Se fosse possível incrementar a recarga para os 300 m³/dia cada em cada furo de infiltração então os resultados seriam:

Quadro 13 - Implantação para 3 captações com mesma extracção e recarga de 300 m³/dia

Designação	x_s	y_s	x_{pe}	$x_s - x_{pe}$	Q_s
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ³ /dia)
Cap _{s1}	2000	1000	654.6	1345.4	1155.8
Cap _{s2}	2000	0	1600.0	400.0	1155.8
Cap _{s3}	2000	-1000	654.6	1345.4	1155.8

Quadro 14 - Custos de investimento para o sistema de abastecimento com 3 captações com mesma extracção e recarga de 300 m³/dia

Órgão	CI (10 ³ €)
Captações	234.56
Reservatório Reg. Bombagem	78.53
Estação de tratamento	133.03
Estação elevatória	113.08
Adutora Cap-R0	378.88
Adutora EE-R1	108.34
Reservatório Reg. Distribuição	269.31
Sistema de Recarga	174.47
Custo total de investimento	1,490.20

Quadro 15 - Custos de exploração para o sistema de abastecimento com 3 captações com mesma extracção e recarga de 300 m³/dia

Tipo de custo de Exploração	CE (10 ³ €)
VACE Captações-R0	468.00
VACE EE-R1	579.77
VACET	237.02
VACEb	1,468.33
VACER	237.02
Soma Valor Actual dos Custos Exploração	2,990.15

Quadro 16 - Resultado económico para o sistema de abastecimento com 3 captações com mesma extracção e recarga de 300 m³/dia

Benefício	38,279.29 x10 ³ €
Custo total de investimento	1,490.20 x10 ³ €
Soma Custos Exploração	2,990.15 x10 ³ €
Resultado	33,798.93 x10 ³ €

A análise destes resultados permite-nos concluir que se for possível incrementar a recarga do aquífero recorrendo, por exemplo, a uma linha de água superficial, e desde que o desvio da água para os furos de infiltração não provoque impactos ambientais inadmissíveis, então a recarga artificial poderá permitir a extracção de maiores quantidades de água, melhorar os resultados económicos e a segurança de exploração contra a propagação do fenómeno da intrusão marinha. De facto com o incremento da recarga artificial existe um maior controlo da posição da interface água doce / água salgada na medida em que esta é empurrada para mais próximo do mar em frente das captações laterais.

5 - CONCLUSÕES

Neste trabalho fez-se o relato dos estudos realizados para o desenvolvimento dum modelo de gestão de sistemas de captação e de controlo da intrusão marinha em aquíferos do litoral.

Os casos de estudo envolveram um conjunto de 3 captações e, posteriormente, os respectivos furos para incremento da recarga no aquífero. Estes ensaios permitem verificar que o modelo desenvolvido pode ser usado para a concepção e gestão optimizadas de sistemas de captação e de abastecimento de água a zonas costeiras. O modelo determina o conjunto de extracções aconselháveis em função do eventual local de implantação das captações e para que se mantenha sob controlo o volume de água salgada no aquífero, ou seja que se evite a propagação da poluição salina.

Os estudos conduziram a curvas que permitem a definição do melhor do local de implantação de uma barreira de três captações em função da extracção pretendida, indicando, também, a distância de segurança aconselhável.

A representação das saídas do modelo de gestão permite uma melhor compreensão da necessidade de controlo do fenómeno da propagação da intrusão salina por limitação das extracções em função dos eventuais locais de implantação. A visualização dos limites de extracção 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. O incremento da recarga poderá constituir um sistema de controlo da cunha salina, e simultaneamente contribuir para a melhoria dos resultados económicos. O aproveitamento da água subterrânea ou uma linha de água superficial que inevitavelmente seriam descarregadas no mar sem qualquer aproveitamento e desde que o desvio da água para os furos de infiltração não provoque impactos ambientais inadmissíveis, dará um excelente contributo para a gestão à escala regional dos recursos hídricos disponíveis.

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 autor regista o apoio da FCT ao Centro de Engenharia Civil da UMinho. Os estudos relatados neste trabalho foram realizados com o apoio parcial do projecto POCTI/ECM/2512/9.

BIBLIOGRAFIA

1. BAKKER, Mark e Schars, F. - "The Sea Water Intrusion (SWI) Package Manual", Version 1, Dezembro, 2002;
2. FERREIRA DA SILVA, Júlio - "Custos de instalação de condutas em sistemas de adução e distribuição de água", Universidade do Minho, 2002;
3. FERREIRA DA SILVA, Júlio - "Gestão optimizada 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;
4. FERREIRA DA SILVA, Júlio F. e Naim Haie, "LOCALIZAÇÃO OPTIMIZADA DE CAPTAÇÕES EM AQUÍFEROS POTENCIALMENTE SUJEITOS À INTRUSÃO SALINA", 7.º Congresso da água, Lisboa, 8-12 Março; 2004;
5. FERREIRA DA SILVA, Júlio F. e Naim Haie, "GESTÃO OPTIMIZADA DOS RECURSOS HÍDRICOS DISPONÍVEIS EM ZONAS COSTEIRAS - O incremento da recarga como componente duma estratégia para utilização sustentável de aquíferos costeiros", 7.º Congresso da água, Lisboa, 8-12 Março; 2004;
6. GOLDBERG, D.E.- "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley, 486 pp, USA, 1989;
7. STRACK, O. D. L. - "Groundwater Mechanics", Prentice Hall, 1989.