

# MODELO ESTOCÁSTICO-DETERMINÍSTICO PARA A DEFINIÇÃO DO LOCAL DE CAPTAÇÃO EM AQUÍFEROS COSTEIROS E DA RESPECTIVA EXTRACÇÃO MÁXIMA

Júlio F. FERREIRA DA SILVA

*Doutor em Engenharia Civil – Hidráulica Prof. Auxiliar do Departamento de Eng<sup>a</sup> Civil da Universidade do Minho, Azurém 4800-058 Guimarães, Portugal  
253510200, [juliofs@civil.uminho.pt](mailto:juliofs@civil.uminho.pt)*

Maria da Conceição CUNHA

*Doutora em Engenharia Civil, Prof. Associada com Agregação do Departamento de Eng<sup>a</sup> Civil da Universidade de Coimbra, Polo II, 3030-290 Coimbra,  
Portugal239797175, [mccunha@dec.uc.pt](mailto:mccunha@dec.uc.pt)*

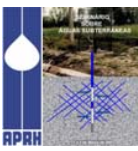
## RESUMO

Neste trabalho descreve-se um modelo estocástico-determinístico que foi desenvolvido para ajudar na definição do local de captação em aquíferos costeiros e da respectiva extracção máxima. O modelo recorre a técnicas de análise e de simulação estocásticas dos parâmetros que caracterizam o aquífero e a uma ferramenta de gestão que usa, de forma interligada, métodos de optimização e de simulação do comportamento do aquífero costeiro. Este conjunto de ferramentas constitui um modelo global para a concepção e gestão optimizadas de sistemas de captação em aquíferos do litoral.

Para cada um dos cenários simulados da condutividade hidráulica ou do escoamento natural e para cada eventual local de implantação, a técnica de optimização procura as extracções máximas que garantam o controlo da intrusão salina e, conseqüentemente, mantenham sob controlo os equilíbrios ambientais. O modelo estocástico-determinístico permite incluir a incerteza associada à caracterização do aquífero no processo de decisão. O tratamento estatístico dos resultados ajuda na análise de sensibilidade aos efeitos do ambiente incerto nos resultados de gestão. A extracção máxima permitida em cada eventual local de captação é caracterizada pela função de probabilidade, média e desvio padrão.

Os resultados do modelo desenvolvido podem ser usadas para a fundamentação de políticas sustentáveis de gestão da água disponível nas regiões costeiras.

**Palavras-chave** - Modelos de gestão de recursos hídricos costeiros, Simulação de aquíferos, Intrusão salina, Optimização estocástica.



## 1 - INTRODUÇÃO

A admissão da incerteza inerente à caracterização dos sistemas hídricos leva a que sejam mais racionais as análises baseadas em resultados de modelos estocásticos. De facto, os parâmetros hidrogeológicos (transmissividade ou condutividade hidráulica), os hidrológicos (precipitação e recarga, descarga de água doce no mar, nível do mar) e os de exploração (caudais extraídos, recarga artificial) podem ser variáveis no espaço e/ou no tempo. Pode constatar-se que qualquer um destes elementos base revela um comportamento que se caracteriza pela existência de uma parcela aleatória, ou seja, são conhecidos com alguma incerteza.

A recarga natural dos aquíferos é fortemente influenciada pelos factores climáticos. A análise estocástica deve ser implementada para que se possa investigar os efeitos da aleatoriedade dos dados nas políticas de utilização dos aquíferos do litoral e conseqüentemente no fenómeno da intrusão salina.

As técnicas de análise, modelação e de simulação estocástica permitem a geração de um grande número de realizações de cada um dos elementos base atendendo às características das respectivas amostras. Na sequência de cada uma destas realizações e para cada eventual solução (conjunto dos valores das variáveis de decisão) determinada pela técnica de optimização, é simulado o comportamento do aquífero em cada ponto de análise. Para cada cenário o modelo de gestão (optimização-simulação) procura a maximização das extracções mantendo sob controlo a intrusão salina, isto é, preservando o volume de água doce no aquífero e conseqüentemente a qualidade da água captada. Os resultados disponibilizados pelas diversas simulações devem ser devidamente analisados com recurso às ferramentas estatísticas. Assim, as extracções permitidas são definidas por uma função de probabilidade, pelo valor mais expectável (média) e pelo desvio padrão.

Este conjunto de ferramentas convenientemente estruturadas e interligadas constitui um modelo global de apoio à decisão para a gestão sustentável da água disponível nas zonas costeiras na medida em que é possível previamente limitar as extracções e, subseqüentemente, controlar o fenómeno da intrusão salina.

## 2 - DESCRIÇÃO DO MODELO ESTOCÁSTICO-DETERMINÍSTICO

### 2.1 - Descrição das componentes

O modelo estocástico-determinístico faculta a análise dos efeitos individuais dos diversos elementos base envolvidos no modelo de gestão, ou seja dos parâmetros de entrada das técnicas de optimização e do modelo matemático de simulação do comportamento do aquífero costeiro.

A análise estocástica começa pela identificação da função de distribuição probabilística que melhor se ajusta ao elemento base em estudo. A modelação estocástica pode realizar-se recorrendo a diversos métodos, cuja selecção dependerá do elemento base. Estão disponíveis diversas ferramentas, desde as técnicas de análise sucessões cronológicas, que poderão ser empregues para modelar o escoamento natural, até técnicas específicas relativas aos parâmetros hidrogeológicos.

O estabelecimento de cenários pode realizar-se de forma expedita recorrendo a técnicas de simulação, entre as quais se encontra o método de Monte Carlo.

O modelo de gestão, composto pelas técnicas de optimização e pelo modelo de simulação da intrusão salina, é chamado a encontrar as melhores soluções tantas vezes quantos os cenários gerados. Subseqüentemente, para cada cenário ficam disponíveis conjuntos de resultados relacionados com as extracções máximas permitidas e com o comportamento do aquífero costeiro. Estas saídas serão sujeitas a uma análise estatística.

Na figura seguinte está representado o modelo global que permite estudar os efeitos da variação dos valores dos elementos base nos resultados do modelo de gestão.

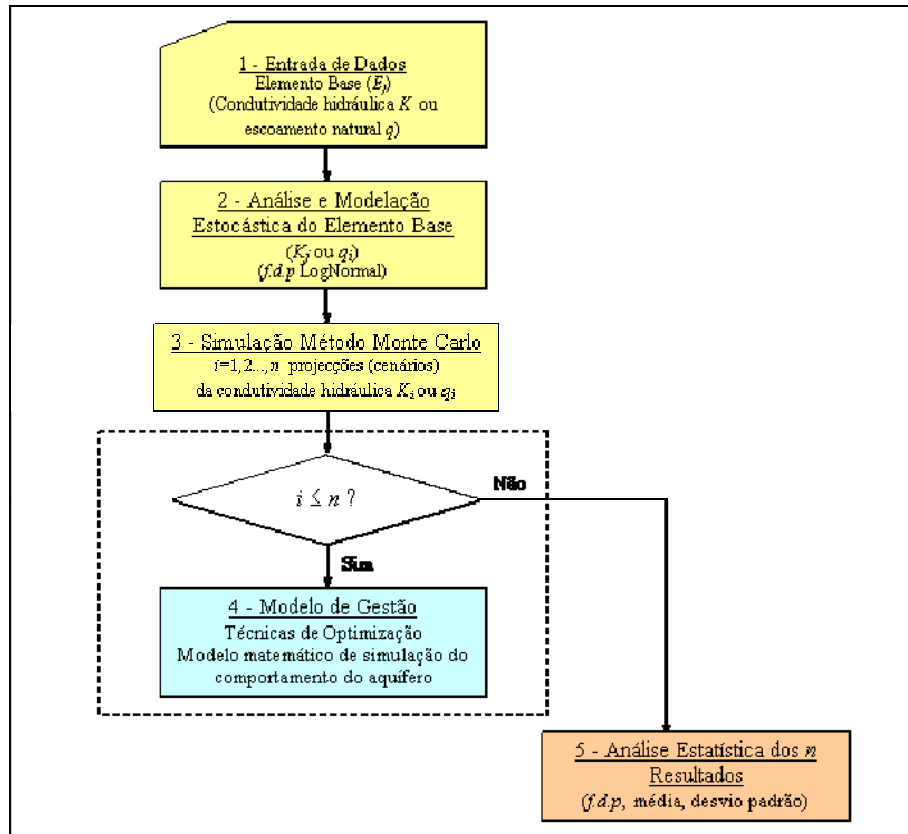


Figura 1 - Esquema do modelo estocástico-determinístico

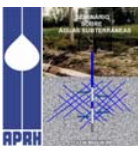
## 2.2 - Análise e modelação estocástica dos elementos base

Quando dispomos de um conjunto de dados relativos aos parâmetros hidrogeológicos é imediata a verificação se esses registos obedecem à lei de probabilidade Normal ou a uma outra que dela derive. O primeiro passo para a definição do tipo de distribuição de frequência que melhor se ajusta aos dados históricos é averiguar através de testes estatísticos adequados se o modelo se adapta aos dados. Um procedimento clássico adoptado para aquela verificação é usar teste do  $\chi^2$  ou recorrer a testes baseados na função de distribuição empírica, dos quais o mais divulgado é o teste de Kolmorov-Smirnov.

## 2.3 - Simulação estocástica usando o método de Monte Carlo

Sendo conhecida a distribuição probabilística do elemento base, a técnica de Monte Carlo gera um número predeterminado de realizações que reflectem as propriedades estatísticas predefinidas e os respectivos limites. Este método de simulação permite a geração de valores que representam as propriedades estatísticas dos dados de campo.

Por vezes, a análise e tratamento estatístico dos valores dos elementos base apresentam algumas dificuldades, designadamente devido à escassez de dados. Nestas circunstâncias pode recorrer-se à geração artificial de amostras, usando a técnica de Monte Carlo, para examinar experimentalmente o comportamento do parâmetro base em análise. O processo de geração pode recorrer a um conjunto de métodos (método a inversão, método da rejeição, etc.) para produzir números que modelem as propriedades estatísticas dos dados disponíveis.



## 2.4 - Descrição do modelo de gestão

A questão que pretende tratar-se relaciona-se com a definição do local de captação e da respectiva extracção máxima permitida para que seja possível manter sob controlo a intrusão salina, admitindo nessa análise a incerteza associada aos elementos base. O modelo de gestão para procurar a melhor estratégia necessita de incorporar técnicas de optimização interligadas a modelos de simulação do comportamento do aquífero costeiro. Neste processo de procura são testadas inúmeras eventuais soluções. Assim, na selecção dos modelos matemáticos /numéricos para a simulação da intrusão salina não deve esquecer-se que o objectivo é obter em tempo útil as melhores soluções para cada um dos diversos cenários simulados. Os modelos de interface brusca, conforme constata Essaid (1990) revelam-se mais conservadores, isto é colocam-se pelo lado da segurança, na definição da posição da interface água doce / água salgada. No caso de aquíferos homogéneos a solução defendida por Strack (1989) apresenta vantagens pela economia de cálculos. Em FERREIRA DA SILVA (2003) defende-se uma metodologia que associa métodos de optimização e modelos de simulação da intrusão marinha em cascata num grau de complexidade crescente.

Dada a incerteza associada aos elementos base 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 cenário gerado e para cada distância de segurança. Esta variável consiste na distância entre o pé da interface e o ponto de controlo, eventualmente a captação mais próxima do mar. Assim, as sucessivas execuções do modelo de gestão varrem os valores compreendidos nos intervalos:

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

$$ds_{\min} \leq ds \leq ds_{\max} \quad ds = 100, 200, \dots, 800 \text{ m} \quad (2)$$

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;  $ds$  - distância de segurança.

Na figura 2 estão esquematizados os sistemas de captação, de abastecimento de água e de controlo da intrusão salina numa zona costeira. A figura 3 é relativa a um corte esquemático do sistema de captação num aquífero costeiro. Nesta imagem pode verificar-se o desenho característico da interface água doce / água salgada. A linha interior da interface define o lugar geométrico dos pontos a partir dos quais a água é doce. O pé da interface consiste na intersecção desta última linha com o fundo do aquífero.

### 2.4.1 - Formulação matemática do problema

O objectivo é matematicamente representado pela maximização das extracções:

$$\max Z = \sum_{s=1}^{N_s} Q_s \quad (3)$$

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

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:

$$(x_{pe})_s \leq (x_{pc})_s - (ds)_s \quad \forall s, \quad s=1,2,\dots,N_{pc} \quad (4)$$

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

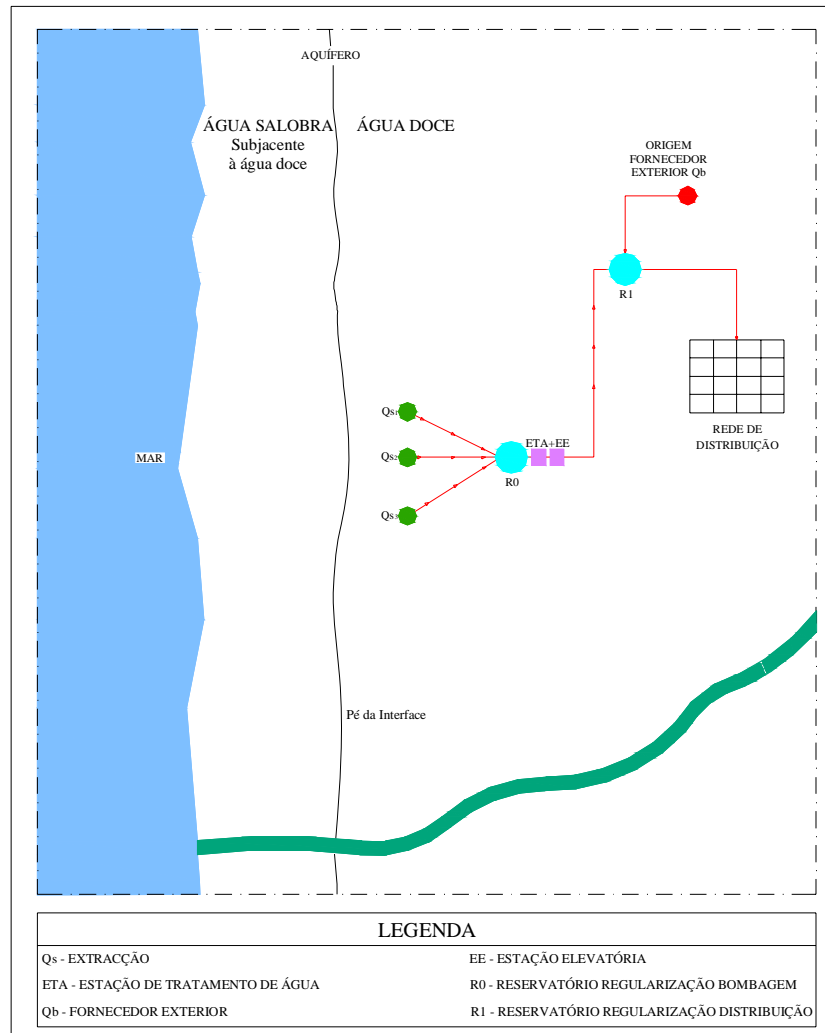


Figura 2 - Esquema de sistema de captação e de abastecimento de água a região costeira

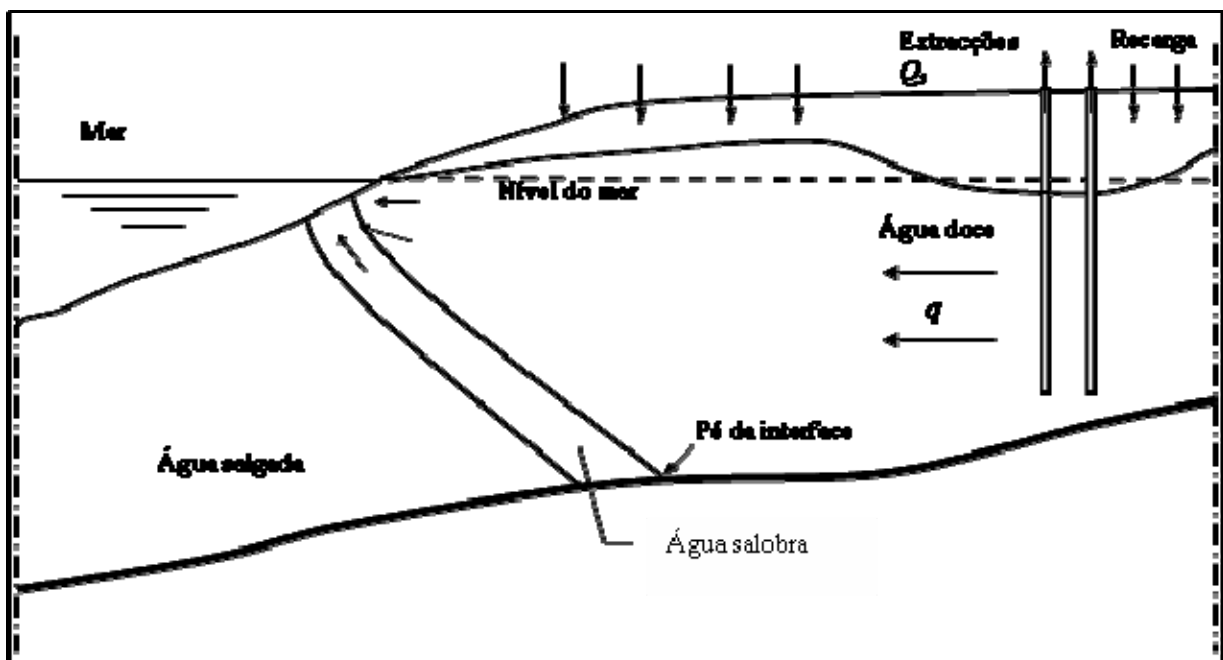
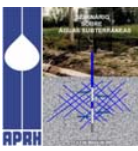


Figura 3 - Corte esquemático do sistema de captação num aquífero costeiro



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

$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max} \quad i = 1, \dots, N_s \quad (5)$$

$$h_s \geq h_0 \quad s = 1, \dots, N_s \quad (6)$$

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.

## 2.4.2 - Técnicas de optimização

A resolução do problema enunciado envolve a utilização de técnicas de optimização não lineares que se revelam computacionalmente complexas. A melhor solução pode ser encontrada adoptando uma metodologia multi-etápica com um grau progressivo de complexidade. As técnicas de optimização que têm sido usadas baseiam-se no conceito de gradiente e/ou numa heurística de optimização global. Os métodos baseados no conceito de gradiente poderão convergir para óptimos locais, pelo que ao seu uso devem ser associadas algumas cautelas. Os algoritmos evolutivos têm a capacidade de se adaptar a problemas não lineares como os encontrados na gestão de sistemas aquíferos do litoral. Os algoritmos genéticos (A.G.) são uma técnica de optimização global que iniciam a procura do óptimo global a partir de um conjunto de pontos e trabalham simultaneamente com diversas eventuais soluções. Os (A.G.) usam perturbações aleatórias na procura da melhor solução e a informação da função objectivo é usada directamente sem ser necessário trabalhar com derivadas. Informação mais detalhada sobre esta técnica de optimização pode ser encontrada em MICHALEWICZ (1994).

## 2.4.3 - Modelos de simulação da intrusão salina

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (K_{xx})_d \frac{\partial h_d}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (K_{yy})_d \frac{\partial h_d}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ (K_{zz})_d \frac{\partial h_d}{\partial z} \right] + Q_d = S_d \frac{\partial h_d}{\partial t} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (K_{xx})_s \frac{\partial h_s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (K_{yy})_s \frac{\partial h_s}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ (K_{zz})_s \frac{\partial h_s}{\partial z} \right] + Q_s = S_s \frac{\partial h_s}{\partial t} \quad (8)$$

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. Defendemos 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.

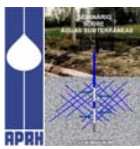
STRACK (1976 e 1989) desenvolveu uma solução exacta para caracterizar o escoamento em aquíferos costeiros com uma linha de costa recta, diversas captações localizadas a  $x_i$  do mar e o respectivo caudal  $Q_i$ . O potencial é definido, usando o método das imagens, por:

$$\phi = \frac{q}{K} x + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi K} \text{LN} \left[ \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{(x + x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (9)$$

onde  $(x_i, y_i)$  e  $Q_i$  são, respectivamente, as coordenadas e o caudal da captação  $i$ .

## 2.5 - Análise estatística de resultados

A cada cenário relativo ao elemento base em estudo corresponde um conjunto de resultados do modelo de optimização e do modelo de simulação do comportamento do sistema hídrico. A técnica de



otimização disponibiliza as extracções. O modelo de simulação do escoamento subterrâneo disponibiliza as cotas piezométricas da água doce e a posição da interface em cada nó em análise. O posterior tratamento das realizações de cada variável permite determinar diversas estatísticas, entre as quais a média, a variância, a função de distribuição de probabilidade, etc.

Assim, por exemplo, a simulação do fenómeno da intrusão salina para cada uma das  $n$  realizações da condutividade hidráulica de um aquífero livre permite a obtenção de  $j=1,2,\dots,n$  realizações da variável de decisão extracção  $Q$  da água doce em cada captação  $i$   $(Q_i)_j$ . Então, é possível calcular os momentos de primeira e segunda ordem de  $Q_i$ .

$$\overline{(Q_i)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Q_i)_j \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (10)$$

$$\sigma_Q^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [(Q_i)_j - \overline{(Q_i)}]^2 \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (11)$$

Calculados os valores médios poder-se-á definir os respectivos intervalos de confiança. Os limites de confiança para o valor esperado com  $(1-\alpha).100\%$  de confiança são dados por:

$$\lim_{Sup,Inf} = \overline{Q_i} \pm z(\alpha/2) \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n ((Q_i)_j - \overline{Q_i})^2}}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

$\lim_{Sup}$  - Limite superior;  $\lim_{Inf}$  - Limite inferior;  $\overline{Q_i}$  - Média dos valores da extracção de água doce;  $z(\alpha/2)=1,96$  - coeficiente de confiança admitindo que distribuição da variável é Normal e  $\alpha=5\%$ .

Mais simplificada poder-se-á admitir na análise os intervalos definidos por:

$$\lim_{Sup,Inf} = \overline{Q_i} \pm \sigma_i \quad (13)$$

### 3 - APLICAÇÕES

Nos estudos seguintes considerar-se-á o sistema de captação esquematizado na figura 2. Admitindo que a altura entre do nível médio do mar e a base do aquífero é de catorze metros ( $B=14,0$  m) e que as captações subterrâneas serão implantadas num aquífero com condutividade hidráulica média de 100 m/dia e escoamento específico médio de 0,6 m<sup>3</sup>/m.dia, 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.

O problema que aqui 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 versus local de implantação. Admite-se que a extracção máxima em cada captação é de 2000 m<sup>3</sup>/dia. O problema foi inicialmente resolvido adoptando uma abordagem determinística com condutividade hidráulica  $K = 100$  m/dia. A abordagem estocástica foi desenvolvida realizando 200 simulações da condutividade hidráulica com média  $LN(100) = 4,605$  e desvio padrão 0,230. As realizações  $Y = LN(K)$  assim obtidas foram posteriormente convertidas em realizações da condutividade hidráulica,  $K = EXP(Y)$ . Os primeiros valores da série de 200 realizações estão registados no quadro seguinte. Os valores extremos gerados foram, respectivamente, 89,97 e 113,86 m/dia.

Quadro 1 - Primeiros valores gerados para a condutividade hidráulica  $K$  (m/dia)

100.0	94,29	96,95	104,29	99,17	92,54	96,11	96,80	101,81	96,40	97,74	101,98	(...)
-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	--------	-------	-------	--------	-------



O conjunto de valores gerados deu origem ao seguinte histograma:

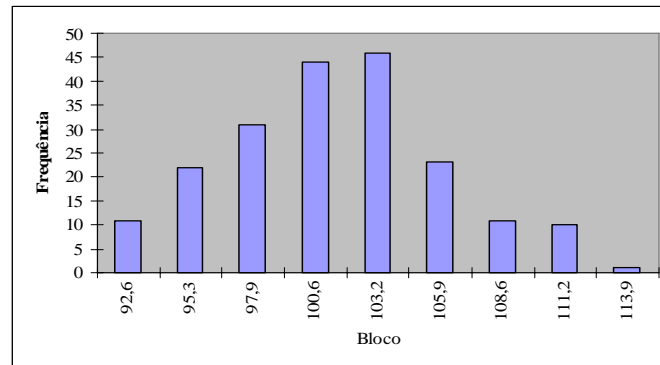


Figura 4 - Histograma dos valores gerados da condutividade hidráulica

Nos quadros seguintes indicam-se, a título de exemplo, os resultados do modelo de gestão quando a condutividade hidráulica toma, respectivamente, os dois primeiros valores do quadro anterior.

Quadro 2 - Resultados usando o 1º valor da condutividade hidráulica  $K = 100$  m/dia e  $ds = 100$  m

Local de implantação (m)	$Q_{S1}$ (m³/dia)	$Q_{S2}$ (m³/dia)	$Q_{S3}$ (m³/dia)	$SumQ_S$ (m³/dia)
620	130,6	113,0	130,6	374,2
640	153,3	132,0	153,3	438,5
660	175,2	150,1	175,2	500,4
680	196,3	167,3	196,3	560,0

Quadro 3 - Resultados usando o 2º valor da condutividade hidráulica  $K = 94,29$ m/dia e  $ds = 100$  m

Local de implantação (m)	$Q_{S1}$ (m³/dia)	$Q_{S2}$ (m³/dia)	$Q_{S3}$ (m³/dia)	$SumQ_S$ (m³/dia)
620,0	161,3	139,6	161,3	462,3
640,0	183,4	157,9	183,4	524,8
660,0	204,8	175,4	204,8	584,9
680,0	225,4	192,1	225,4	642,9

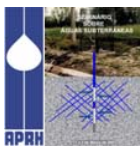
Sendo:  $Q_{Si}$  – Extracção na captação  $i$  (m³/dia) e  $SumQ_S$  – Soma das extracções no conjunto das 3 captações (m³/dia).

O tratamento estatístico dos resultados disponibilizados pelo modelo de gestão, na sequência das duzentas simulações, conduzem à determinação dos valores médios das extracções e respectivos limites. No quadro seguinte estão registados os resultados quando a distância de segurança é de, respectivamente, 100 e 200 m.

Quadro 4 - Valores médios das extracções e respectivos limites para  $ds = 100$  m e  $ds = 200$  m

Local	$\mu_{ds100}$ (m³/dia)	$\sigma_{ds100}$ (m³/dia)	LimInf <sub>ds100</sub> (m³/dia)	LimSup <sub>ds100</sub> (m³/dia)	$\mu_{ds200}$ (m³/dia)	$\sigma_{ds200}$ (m³/dia)	LimInf <sub>ds200</sub> (m³/dia)	LimSup <sub>ds200</sub> (m³/dia)
640	436,5	72,2	431,4	441,6				
660	498,4	70,7	493,4	503,4				
680	558,1	69,3	553,2	563,0				
700	615,6	68,0	610,8	620,4	374,1	92,42	367,6	380,6
720	671,3	66,8	666,6	676,0	454,7	90,07	448,3	461,1





Local	$\mu_{ds100}$ (m <sup>3</sup> /dia)	$\sigma_{ds100}$ (m <sup>3</sup> /dia)	LimInf <sub>ds100</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	LimSup <sub>ds100</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	$\mu_{ds200}$ (m <sup>3</sup> /dia)	$\sigma_{ds200}$ (m <sup>3</sup> /dia)	LimInf <sub>ds200</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	LimSup <sub>ds200</sub> (m <sup>3</sup> /dia)
740	725,2	65,6	720,5	729,8	531,5	87,9	525,3	537,7
760	777,4	64,5	772,9	782,0	604,9	85,8	598,9	611,0
(...)								
1000	1310,8	54,5	1307,0	1314,7	1305,1	68,5	1300,2	1309,9
1020	1349,5	53,8	1345,7	1353,3	1353,0	67,5	1348,2	1357,8
1040					1399,8	66,5	1395,1	1404,5
1060					1445,6	65,5	1440,9	1450,2
1080					1490,3	64,6	1485,8	1494,9
(...)								
1360					2038,9	55,0	2035,0	2042,8
1380					2073,9	54,5	2070,0	2077,7

Sendo:  $\mu_{ds}$  – Extracção média no conjunto das captações implantada em cada eventual local respeitando a distância de segurança  $ds$ ;  $\sigma_{ds}$  – desvio padrão; LimInf<sub>ds</sub> – Limite inferior; LimSup<sub>ds</sub> – Limite Superior.

O histograma e as estatísticas sumário da estatística descritiva dos 200 valores da extracção máxima no local de implantação que dista 640 m da linha de costa e impondo uma distância de segurança de 100 m encontram-se, respectivamente, representados na figura seguinte e no quando que se lhe segue.

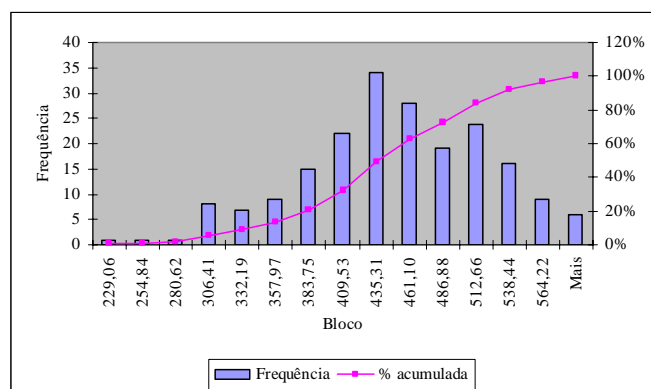


Figura 5 - Histograma dos 200 valores da extracção máxima no local  $x=640$  m e  $ds=100$  m

Quadro 5 - Estatísticas sumário da estatística descritiva dos 200 valores da extracção máxima no local de implantação que dista 640 m da linha de costa

Média	436,52
Erro-padrão	5,10
Desvio-padrão	72,16
Assimetria	-0,18
Mínimo	229,06
Máximo	590,00

Fazendo a mesma análise para outros locais de implantação os respectivos histogramas apresentam um aspecto semelhante.

A representação gráfica do desvio padrão das extracções máximas relativas às 200 simulações da condutividade  $K$  versus local de captação apresenta um comportamento para todas as distâncias de segurança consideradas semelhante ao registado na figura seguinte que é relativa a  $ds = 200$  m:

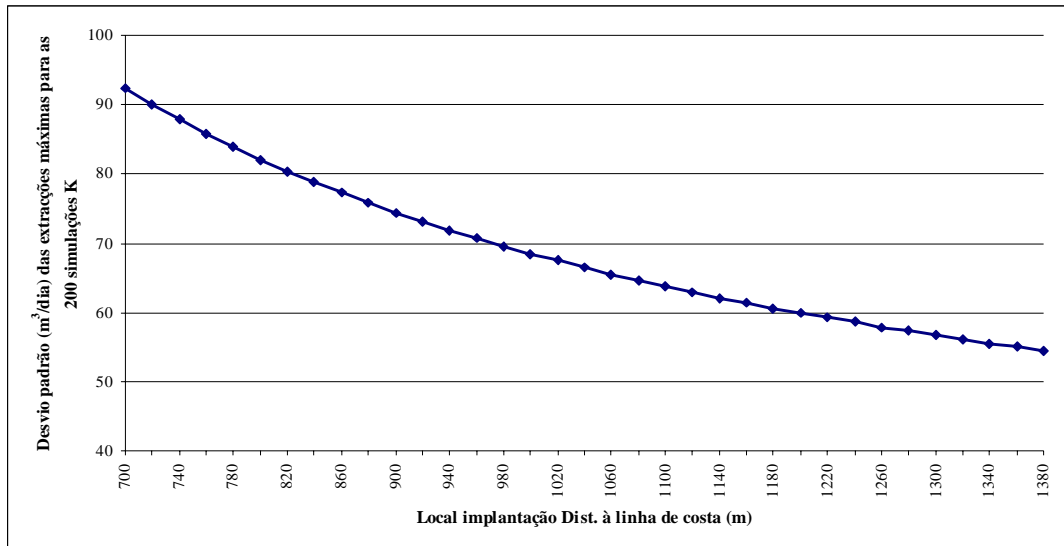
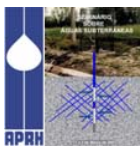


Figura 6 – Desvio padrão das extracções máximas em cada local com 200 simulações  $K$  e  $ds=200$  m

Este resultado indica que adoptando o conceito de distância de segurança as extracção máximas permitidas nos locais mais próximos do mar são mais sensíveis à variação do valor da condutividade  $K$  do que nos locais mais afastados do mar.

Na figura seguinte estão representados os valores médios das extracções máximas e respectivos limites de confiança para cada distância de segurança  $ds=100, 200, \dots, 700$  m versus cada eventual local de implantação.

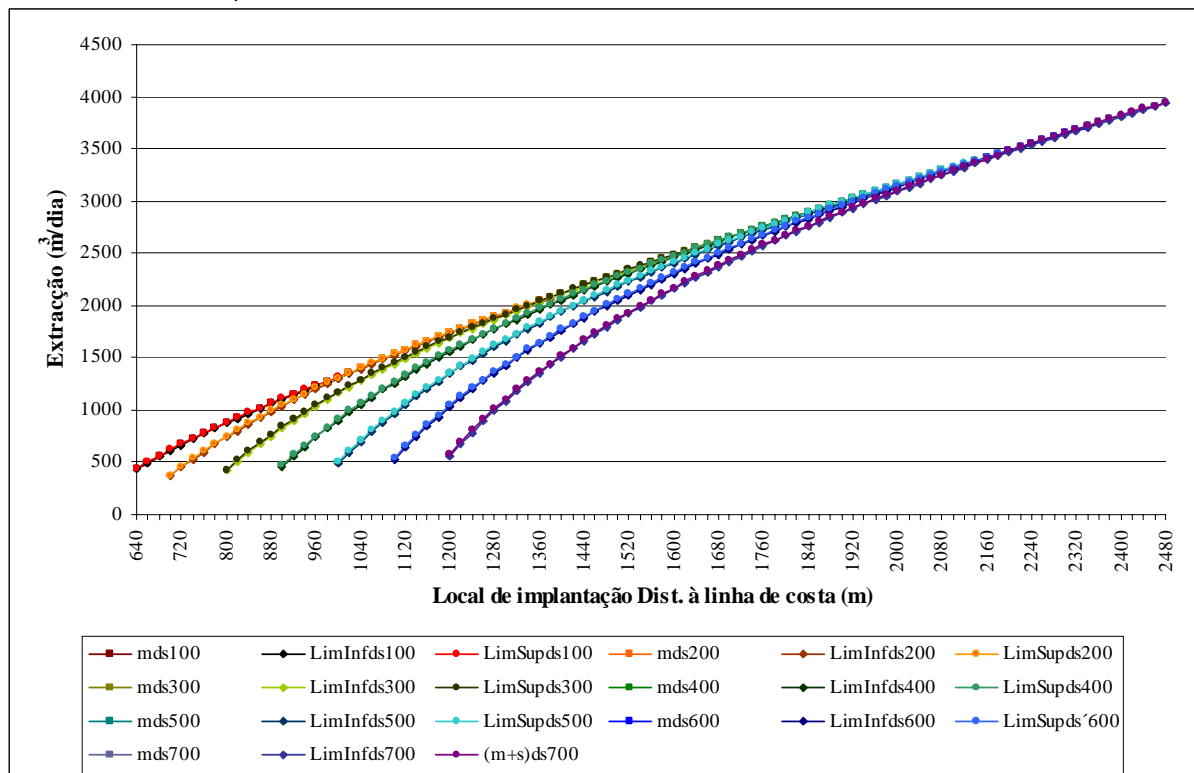


Figura 7 - Valores médios e limites da extracção com 200 simulações  $K$  e  $ds=100, 200, \dots, 700$  m

Na figura seguinte estão pormenorizados os resultados nos locais em que a distância de segurança  $ds = 100$  m conduz aos maiores valores da extracção.

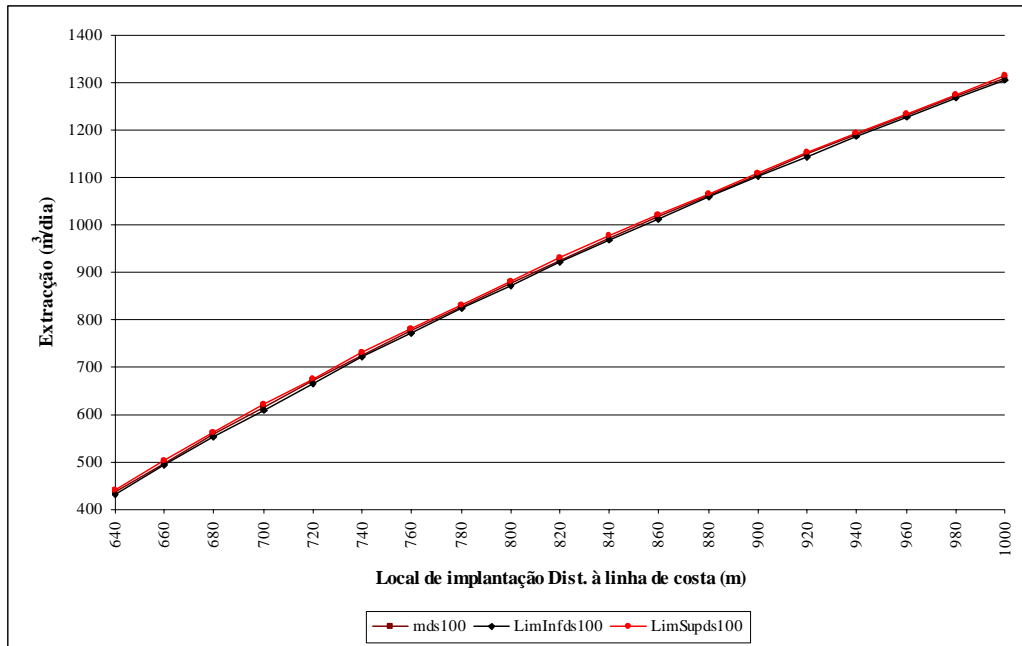
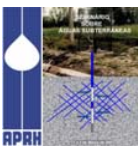


Figura 8 - Valores médios e limites da extracção com 200 simulações  $K$  e  $ds = 100$  m

A selecção entre as diversas distâncias de segurança dos maiores valores da extracção em cada eventual local de implantação conduz à elaboração da figura seguinte que nos permite definir o valor mais expectável da extracção máxima permitida em cada eventual local e a distância de segurança aconselhável.

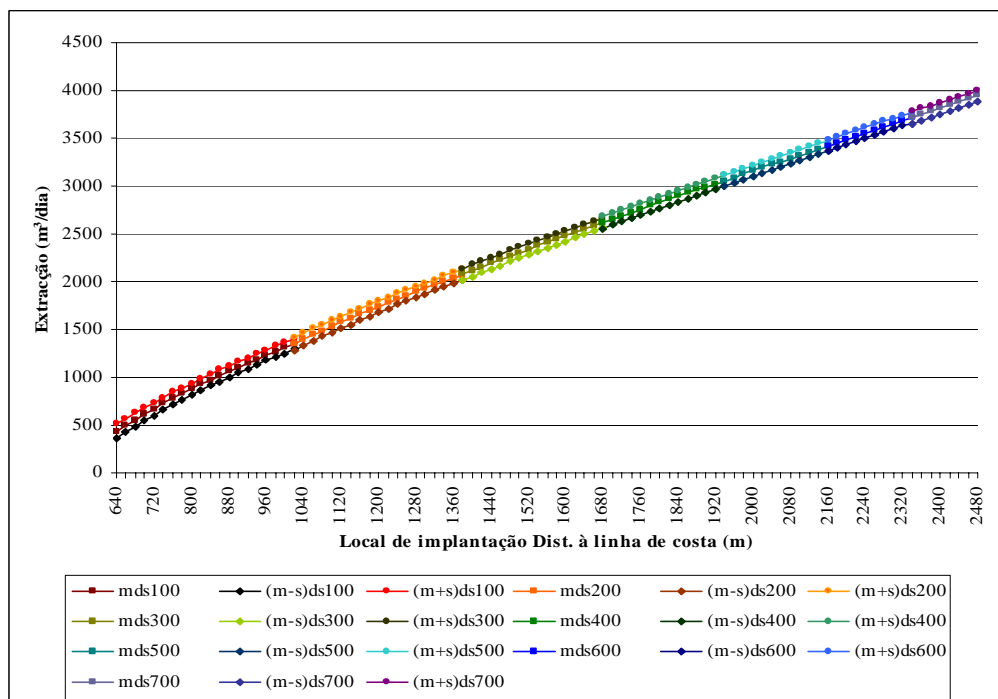


Figura 9 - Valores médios da extracção máxima e limites definidos com  $\mu \pm \sigma$  com 200 simulações  $K$

Por razões relacionadas com a selecção dos grupos de electrobomba e com a sua posterior manutenção poderá ser interessante extrair a mesma quantidade diária em cada uma das três captação. Na figura 10 encontram-se representados os valores médios expectáveis da extracção máxima permitida em cada local para as 200 simulações  $K$  quando  $Q_{S1} = Q_{S2} = Q_{S3}$ .

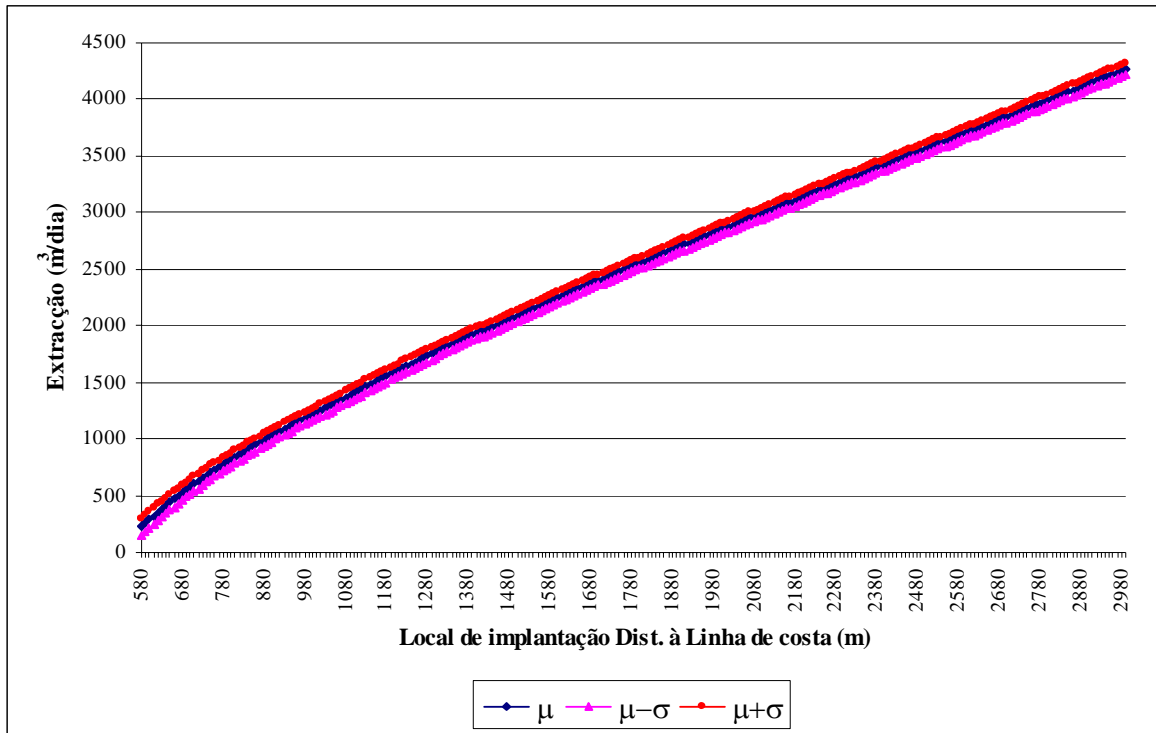
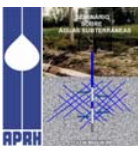


Figura 10 - Valores médios expectáveis da extracção máxima permitida em cada local para as 200 simulações  $K$  quando  $Q_{S1} = Q_{S2} = Q_{S3}$  e admitindo distâncias de segurança.

Não adoptando o conceito de distância de segurança pode o decisor pretender saber qual será a extracção máxima absoluta imediatamente antes dos pontos de controlo serem invadidos pela água salobra / salgada e qual a distância do pé da interface água doce / água salgada a essas captações de controlo. A figura 11 disponibiliza essa informação depois das 200 simulações de  $K$ .

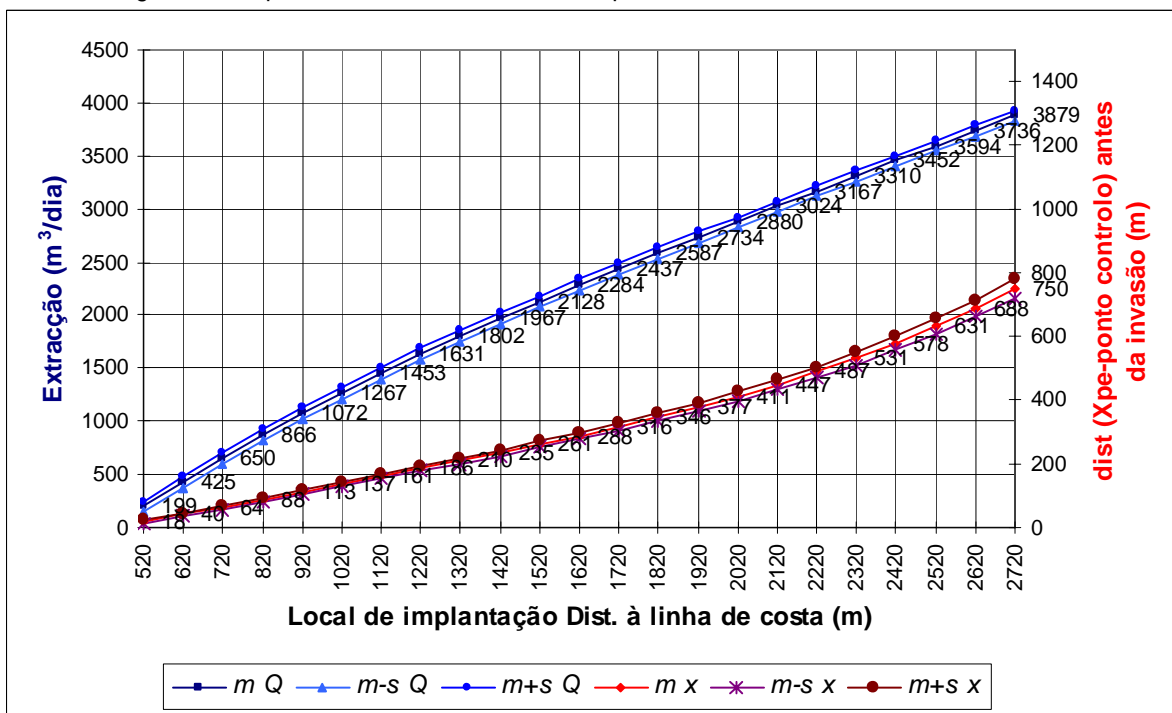


Figura 11 - Valores médios expectáveis da extracção máxima permitida imediatamente antes da invasão das captações em cada local para as 200 simulações  $K$  quando  $Q_{S1} = Q_{S2} = Q_{S3}$ .



Para analisar os efeitos da admissão de incerteza associada ao escoamento natural  $q$  foi realizado um trabalho semelhante ao anteriormente descrito. Foram gerados 200 valores de  $q$  com média 0,6 e coeficiente de variação  $cv=\sigma/\mu=5\%$ , tendo como mínimo e máximo, respectivamente, 0,53 e 0,68. Os primeiros valores gerados estão registados no quadro seguinte:

Quadro 6 - Primeiros valores gerados para o escoamento natural  $q$  (m<sup>2</sup>/dia)

0,60	0,56	0,58	0,63	0,59	0,55	0,57	0,58	0,61	0,58	0,59	0,61	(...)
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

Os resultados que indicam os valores médios da extracção máxima e respectivos limites encontram-se nas figuras seguintes:

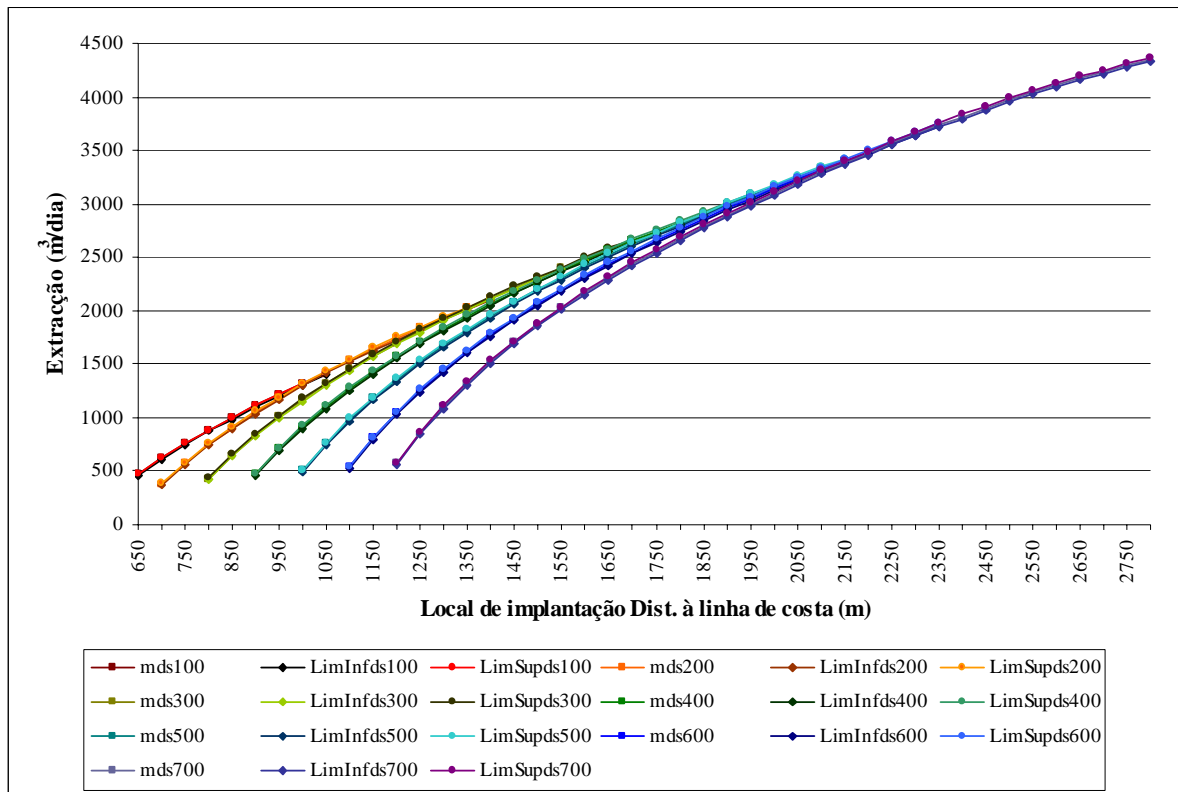


Figura 12 - Valores médios e limites da extracção com 200 simulações  $q$  e  $ds=100, 200, \dots, 700$  m

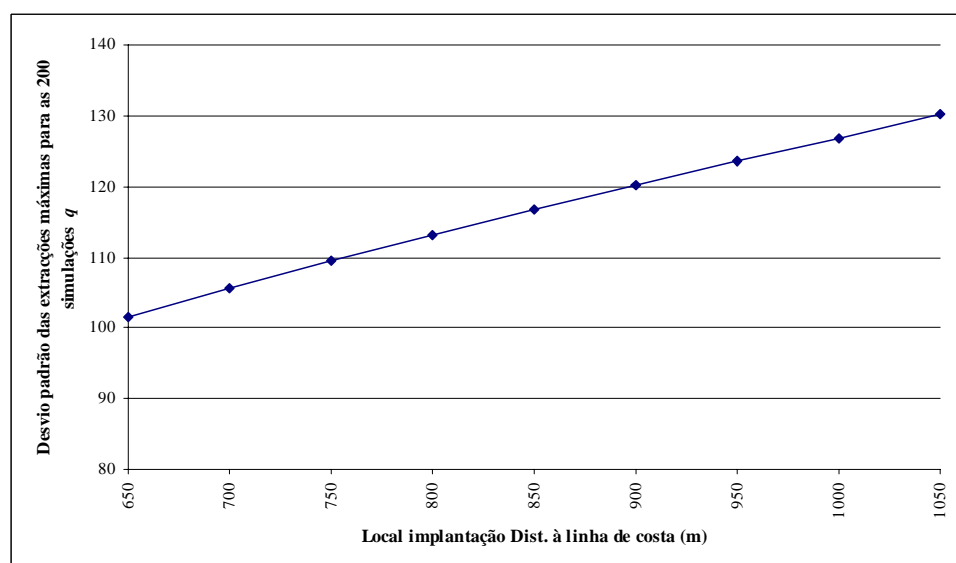


Figura 13 – Desvio padrão das extracções máximas em cada local com 200 simulações  $q$  e  $ds=100$  m

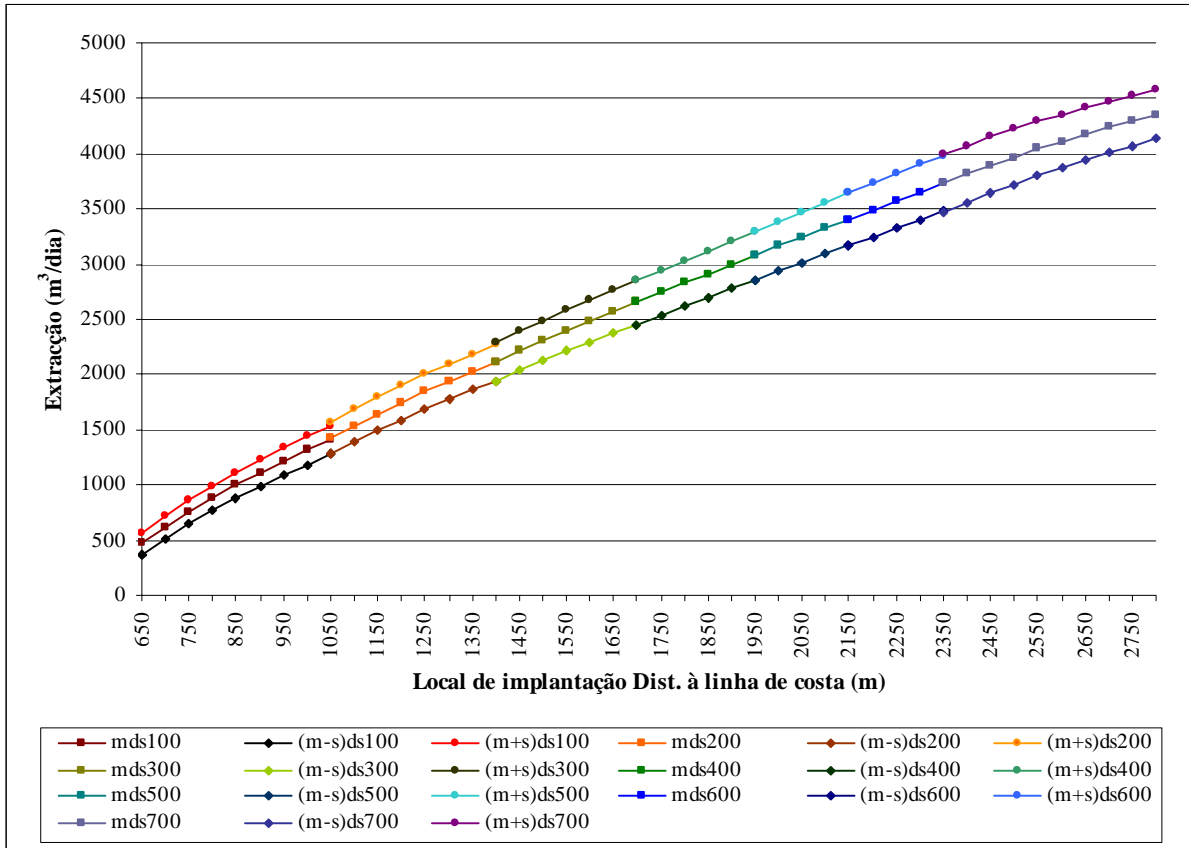
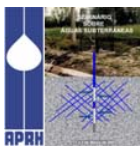


Figura 14 - Valores médios da extracção máxima e limites definidos com  $\mu \pm \sigma$  com 200 simulações  $q$

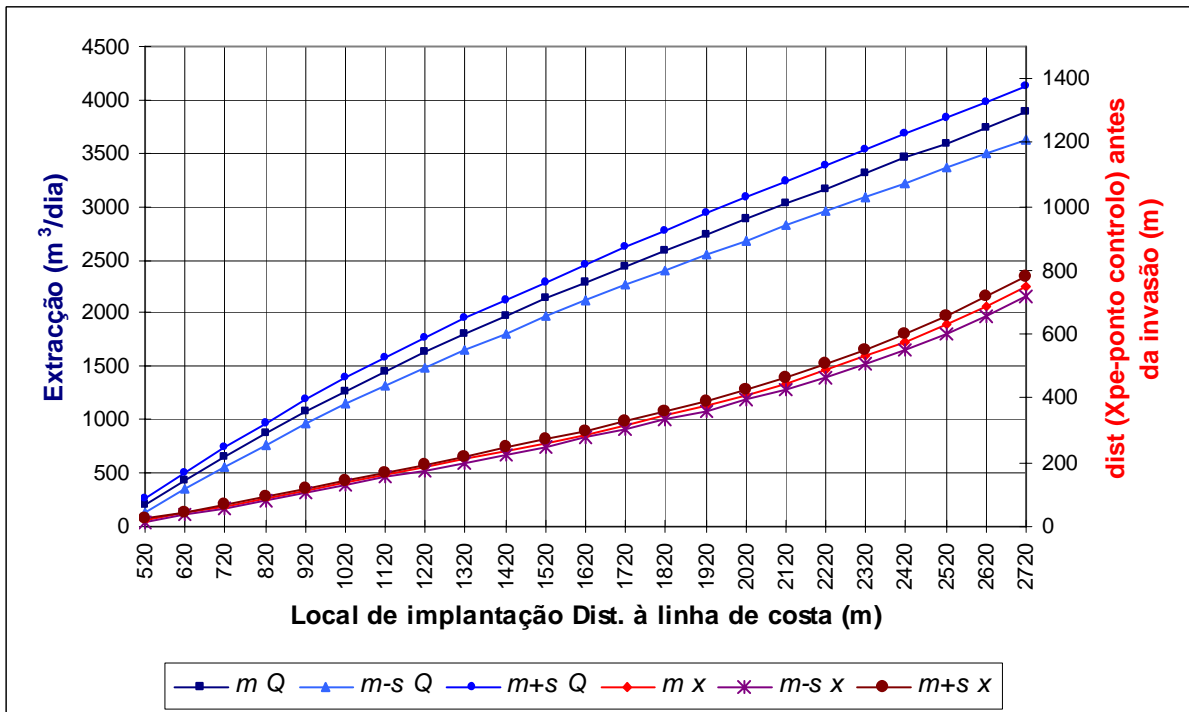
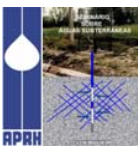


Figura 15 - Valores médios expectáveis da extracção máxima permitida imediatamente antes da invasão das captações em cada local para as 200 simulações  $q$  quando  $Q_{S1} = Q_{S2} = Q_{S3}$ .



## 4 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi descrito um modelo estocástico-determinístico para a localização e gestão de sistemas de captação em aquíferos do litoral potencialmente sujeitos à intrusão salina. O procedimento adoptado permite considerar a incerteza associada aos diversos elementos base que caracterizam o sistema hídrico costeiro (por exemplo: condutividade hidráulica, escoamento natural). O modelo global é composto pelas ferramentas de análise e modelação estocástica dos elementos base, por uma técnica simulação estocástica (método de Monte Carlo), por técnicas de optimização e modelos de simulação do comportamento do aquífero.

Admitindo incerteza na caracterização da condutividade hidráulica, quanto mais próximo do mar for o local de implantação maior é a incerteza associada aos valores máximos permitidos para extracção. Realizando estudo semelhante, mas considerando como parâmetro base o escoamento natural, o intervalo que define os limites de confiança para as extracções máximas é maior nos locais mais afastados do mar.

Este modelo global revela-se como uma ferramenta prática para a determinação do local de implantação e da respectiva extracção máxima permitida mais expectável e respectivos limites, mantendo sob controlo o fenómeno intrusão salina, ou seja a aplicação do modelo permitirá a gestão sustentável de recursos hídricos face a um ambiente incerto. Ao disponibilizar resultados para diversas distâncias de segurança o modelo permite ao decisor uma melhor fundamentação das decisões e eventualmente ponderar o controlo do fenómeno da intrusão salina com outros eventuais critérios.

## 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 2, Dezembro, 2002;
2. LAW, A. M. e W. D. Kelton, - "Simulation Modeling & Analysis", 3ed, McGraw-Hill, New York, 2000;
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 costeiras", Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil - Hidráulica, Universidade do Minho, 2003;
4. 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;
5. FERREIRA DA SILVA, Júlio F., "Planeamento optimizado conjunto de sistemas de captação e de controlo da intrusão marinha em aquíferos costeiros", 5.º Congresso Ibérico de Gestão e Planeamento da água, Faro, 4-8 Dezembro; 2006;
6. STRACK, O. D. L. - "A Single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers", Water Resources Research, 12, 1165-1174, 1976;
7. STRACK, O. D. L. - "Groundwater Mechanics", Prentice Hall, 1989.