

A GEOFÍSICA NA DETECÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DE AQUÍFEROS ALGUMAS APLICAÇÕES

A. R. ANDRADE AFONSO⁽¹⁾; R. M. D. GONÇALVES⁽²⁾ e L. A. MENDES VICTOR⁽³⁾

RESUMO

A prospecção geofísica desempenha um papel importante na detecção, quantificação, e também na determinação de parâmetros hidrogeofísicos que permitem, a partir dos valores obtidos por métodos geofísicos, uma aproximação aos valores de parâmetros hidrológicos como a condutividade hidráulica, a porosidade, a transmissividade, etc. Permitem ainda, a delimitação de áreas de maior ou menor vulnerabilidade à poluição, pela detecção de zonas de fractura e/ou pela localização e quantificação da espessura das camadas de argila e bem assim pelas zonas de descontinuidade eventualmente existentes naquelas.

No presente trabalho apresentam-se alguns resultados obtidos pelos autores no Algarve em ambiente cársico e no aquífero poroso costeiro de Monte Gordo. Os modelos obtidos, confirmados por furos existentes ou posteriormente efectuados, levam-nos a afirmar que as metodologias utilizadas são eficazes para o estabelecimento da geometria da circulação das águas subterrâneas nos meios mencionados.

São ainda apresentados alguns resultados obtidos na Península de Setúbal, que permitem inferir, a partir da correlação existente entre parâmetros geofísicos e alguns parâmetros hidrológicos, a transmissividade, a porosidade e a condutividade hidráulica das formações geológicas nos aquíferos Pliocénico e Miocénico aí existentes.

Palavras chave: resistividade, aquíferos, meios cársicos, parâmetros hidrogeofísicos, parâmetros hidrológicos e poluição.

(1) Professor Auxiliar da Secção de Geofísica da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

(2) Estudante de Mestrado em Ciências Geofísicas

(3) Professor Catedrático da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

1 - INTRODUÇÃO

A detecção da circulação da água subterrânea em meios cársicos usando métodos geofísicos de superfície é extremamente difícil, sobretudo em carsos envelhecidos, onde a circulação se faz muitas vezes em galerias, ocupando a água uma parte diminuta do seu volume. Todavia, no Algarve o carso é em geral pouco desenvolvido, encontrando-se frequentemente as zonas carsificadas razoavelmente saturadas de água nas zonas de circulação.

As metodologias a usar neste tipo de meios têm de ser muito sensíveis (ANDRADE AFONSO *et al.*, 1987, 1989) às discontinuidades laterais dos parâmetros físicos usados para a identificação das formações que interessa detectar.

No método da resistividade, usado no presente trabalho, os dispositivos utilizados foram o dipolo-dipolo e o rectângulo sempre que o meio físico associado ao modelo geológico existente não podia ser aproximado por um modelo tabular. Nos restantes, dunas costeiras e terraços fluviais, usaram-se sobretudo sondagens eléctricas verticais tipo Schlumberger.

As zonas do Algarve apresentadas neste trabalho, enquadraram-se no estudo dos recursos hídricos subterrâneos dos concelhos de Vila Real de S^{to} António e Albufeira e foram efectuados em colaboração com o Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e as Câmaras Municipais dos concelhos mencionados.

Os estudos apresentados em meios cársicos foram efectuados (fig. 1) nas proximidades de Paderne.

Na área situada a nordeste daquela localidade as formações geológicas são constituídas, a norte da ribeira do Algibre, por terraços fluviais, dolomitos e calcários dolomíticos. A sul deste curso de água por dolomitos e calcários dolomíticos, por terraços fluviais e por calcários e margas. Na área a noroeste de Paderne as formações geológicas são constituídas sobretudo por dolomitos e calcários dolomíticos, aflorando na parte sul da área estudada calcários e margas do Peral.

Na primeira área mencionada, e em função do modelo físico previsível, foi usada (fig. 1) uma combinação de dispositivos dipolares e sondagens eléctricas verticais para a detecção das zonas de circulação de águas subterrâneas. Na segunda área foi usada uma combinação de dispositivos dipolares e dispositivos rectangulares. A inversão dos dados de campo permitiu a obtenção de modelos que estão

de acordo com os dados dos furos já existentes quando da realização do trabalho de campo e têm vindo a ser confirmados pelos furos entretanto efectuados.

No aquífero costeiro de Monte Gordo as formações superficiais são constituídas por areias de praia e de duna as quais constituem a matriz porosa do aquífero. Subjacente a esta formação encontra-se o substrato impermeável. A realização de sondagens eléctricas verticais teve, entre outros, o objectivo de estabelecer a geometria da zona ocupada pela água doce, a determinação da posição da interface água doce-água salgada e ainda o cálculo aproximado da porosidade do aquífero. Este problema foi abordado por vários autores, que usaram sobretudo o dispositivo de Schlumberger. Assim, MENDES VICTOR (1966) efectuou o estudo do aquífero do Planalto dos Cajueiros em Porto Amélia (Moçambique), tendo estabelecido a topografia do substrato impermeável e localizado a interface água doce-água salgada. KOEFOED (1977) apresenta um estudo efectuado na Holanda, tendo determinado a posição da interface água doce-água salgada. O primeiro autor do presente trabalho, usou uma metodologia idêntica na duna de Monte Gordo – Vila Real de S^{to} António (1984,1991) de que se apresentam aqui alguns resultados, com o intuito de apresentar uma metodologia que se tem revelado eficaz neste tipo de aquíferos.

O terceiro meio apresentado corresponde às bacias do baixo Tejo e Sado, onde se pretende estabelecer não só o modelo geológico, mas ainda e através das correlações existentes entre parâmetros geofísicos (resistividade, resistência transversal unitária, condutância longitudinal unitária, factor de formação, etc.) e os parâmetros hidrológicos (condutividade hidráulica, transmissividade, porosidade, etc.) calcular de forma expedita, com

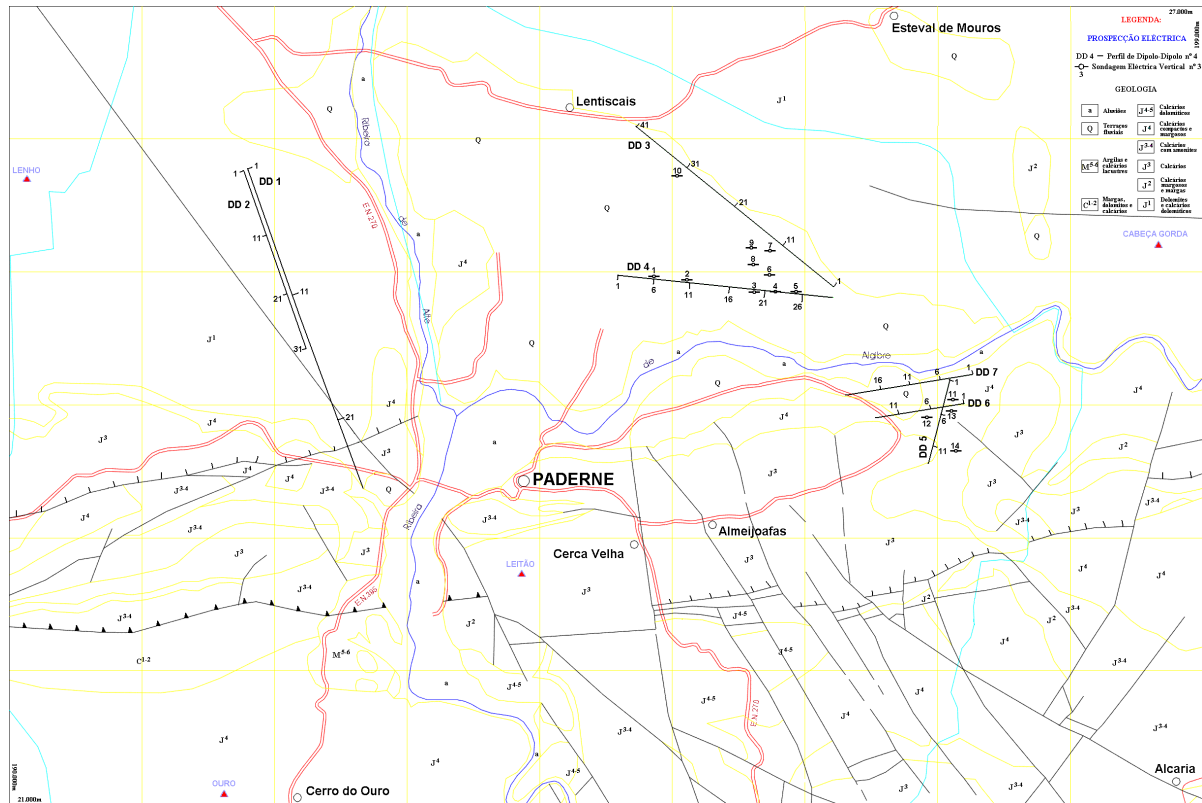


Figura 1 - Localização dos dispositivos na região de Paderne

recurso a métodos geofísicos de superfície, os parâmetros hidrológicos da zona estudada.

O estudo da geometria de aquíferos em bacias sedimentares, situadas em zonas perturbadas por ruído electromagnético originado pela actividade humana, pode efectuar-se com êxito recorrendo ao método da resistividade. O aquífero existente encontra-se num meio geológico constituído essencialmente por três camadas, tendo-se a partir da superfície, formações quaternárias, seguidas de formações Pliocénicas e Miocénicas, nos locais onde as formações Pliocénicas não afloram. As sondagens eléctricas verticais efectuadas permitiram o estabelecimento da geometria destas formações na margem esquerda do baixo Tejo, com especial incidência na Península de Setubal. O modelo obtido está de acordo com as sondagens mecânicas existentes, tendo-se, no entanto, atingido em muitos casos, profundidades de investigação muito superiores à profundidade da generalidade dos furos existentes.

O estudo das relações existentes entre parâmetros geofísicos e parâmetros hidrológicos tem sido abordado por vários autores (ARCHIE, G. M., 1942; MAZAC, O. *et al.*, 1989; KWADER, T., 1986; SHEPHERD, R. G., 1989; etc.).

Na zona mencionada foi possível, apesar da grande dispersão dos dados, estabelecer a transmissividade, a condutividade hidráulica e a porosidade para as várias zonas em que se subdividiu a Península de Setúbal.

2 - FUNDAMENTO TEÓRICO

Para meios horizontalmente estratificados, a inversão das sondagens eléctricas verticais pode

efectuarse por um ajustamento de mínimos quadrados entre as resistividades obtidas no campo e as obtidas a partir de um modelo inicialmente arbitrado (JOHANSEN, H. K., 1977) e usando a técnica da inversa generalizada.

A inversão dos perfis dipolo-dipolo para estruturas 2D é apresentada na literatura por vários autores (DEY, A. and MORRISON, H. F., 1979; SASAKI, Y., 1989; etc.)

Todavia, as condições limite impostas na resolução da equação de Poisson que relaciona a intensidade de corrente injectada à superfície de um semi-espaco infinito, com os potenciais gerados à superfície ou em profundidade pela excitação introduzida impõe a existência de um meio contínuo. Contudo, nos meios cárscicos, existem por vezes cavernas não preenchidas, tornando portanto o meio a simular descontínuo. SPIEGEL *et al.*, (1980) apresentaram um método directo para a simulação de cavidades vazias para o dispositivo polo-dipolo que pode facilmente ser adaptado ao dispositivo dipolo-dipolo. Os potenciais gerados à superfície do solo obtêm-se pela soma do potencial primário e do potencial secundário, sendo este calculado a partir da distribuição de carga eléctrica superficial gerada pelas fontes do campo eléctrico na multiplicidade de pequenas superfícies em que foi subdividida a superfície da “caverna”. Todavia, esta metodologia é bastante pesada em termos computacionais e não permite a simulação de heterogeneidades próximas da superfície do terreno.

ANDRADE AFONSO *et al.* (1987 e 1989), admitiram que os meios cárscicos podiam ser aproximados por meios contínuos desde que a resistividade das cavernas vazias fosse pelo menos duas ordens de grandeza superior à resistividade do meio encaixante. A simulação de “vazios” num tanque de simulação analógica e a comparação dos resultados obtidos experimentalmente, com resultados calculados usando usando um método directo (A. DEY *et al.*, 1979) ou um método inverso (N. C. SMITH *et al.*, 1984), onde o modelo é obtido pelo ajustamento entre as resistividades obtidas por meios experimentais e as calculadas a partir de um modelo arbitrado à “priori” (A. DEY *et al.*, 1979) por um ajustamento de mínimos quadrados e usando uma combinação dos métodos Marquardt com o da truncatura, vieram confirmar a hipótese já enunciada. Portanto, os meios cárscicos, podem para efeitos de simulação numérica ser aproximados a meios contínuos.

Todavia, os meios cárscicos são fortemente heterogéneos, pelo que a inversão dos perfis polo-dipolo ou dipolo-dipolo usando o método de mínimos quadrados e a técnica da inversa generalizada conduz frequentemente a que o jacobiano da relação entre os erros residuais do modelo e os erros entre os dados experimentais e os calculados seja “mal comportado”, conduzindo a soluções espúrias ou à existência de problemas de divergência. SASAKI, Y. (1989) apresentou um método de mínimos quadrados “amortecido” que calcula a variação dos parâmetros do modelo pela minimização da “rugosidade” total do modelo. Este método produz uma solução estável, mas os modelos obtidos apresentam fundamentalmente aspectos estruturais da zona estudada.

As formações geológicas que constituem a matriz do sistema aquífero existente na Península de Setúbal, são formadas essencialmente por camadas lenticulares de argilas alternando com areias, originadas durante as várias transgressões e regressões do mar naquela zona. A interpretação das sondagens eléctricas verticais permite calcular a resistividade e a

possança quer do aquífero miocénico, quer do aquífero Pliocénico. Todavia, os valores obtidos não permitem separar as camadas de argila das arenosas, devido à sua pequena espessura. A existência de “logs” de furos eventualmente existentes possibilita a determinação da percentagem de argila, sendo possível estabelecer uma relação que permite o cálculo da resistividade que teria a formação se esta não tivesse camadas argilosas. A lei de Archie possibilita então o cálculo do factor de formação, do qual pode obter-se (KELLY, W. E., 1978 ; SHEPHERD, R. G., 1989) a porosidade e ainda a condutividade hidráulica. A influência da presença de argila na vulnerabilidade dos aquíferos, assim como a influência da poluição química, originada por componentes orgânicos e inorgânicos, na resistividade daqueles é conhecida. O cálculo da resistividade das formações pode pois ser um auxiliar precioso na determinação da vulnerabilidade, bem como no cálculo de uma primeira aproximação à poluição química das águas subterrâneas.

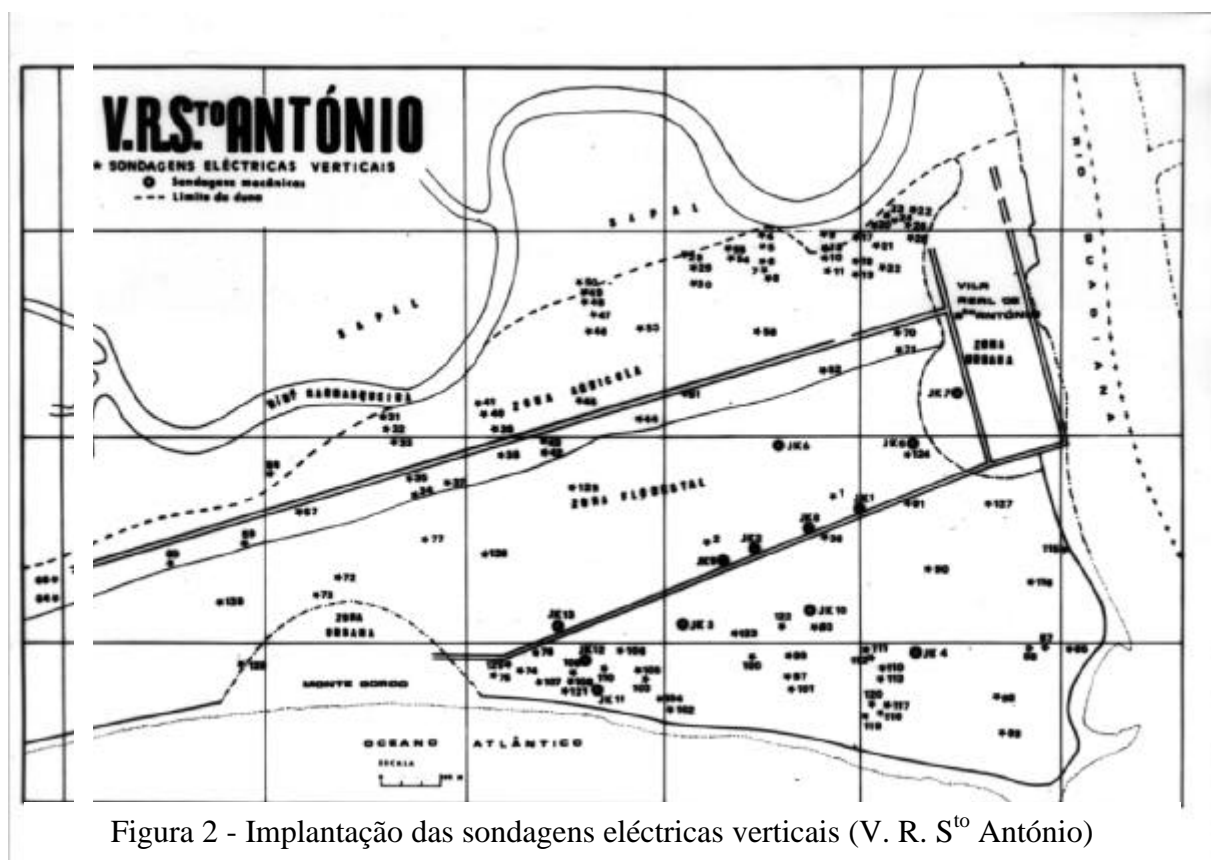


Figura 2 - Implantação das sondagens eléctricas verticais (V. R. S^{to} António)

3 - TRABALHO DE CAMPO

3.1 - Meios cársicos

Foram efectuados, na zona seleccionada (fig1) para o presente trabalho, sete perfis dipolo-dipolo, sendo seis com distâncias dipolares de 50 metros (com um comprimento total de 7 quilómetros) e um com distâncias dipolares de 100 metros e com o comprimento total de 2500 metros. Os perfis foram orientados, sempre que possível, perpendicularmente quer às direcções de carsificação previsíveis, quer às direcções de camada e às falhas conhecidas. Foram também efectuados dois rectângulos sobrepostos, com valores AB (distância entre os

eléctrodos de injeção) de 300 e 500 metros, respectivamente, numa zona previamente seleccionada a partir dos dados de campo de DD1 e DD2. Nas zonas de terraços fluviais ou nas zonas de alteração superficiais foram ainda efectuadas catorze sondagens Schlumberger com valores de AB variando entre os 500 e os 800 metros.

3.2 - Meios porosos:

3.2.1 - Aquíferos costeiros

Foram efectuadas (fig. 2) 129 sondagens eléctricas verticais (SEV), orientadas paralelamente ao mar e centradas, sempre que possível, em perfis perpendiculares à linha de costa. Os valores de AB variaram entre 200 e 1500 metros. A orientação escolhida foi imposta de modo a manter sempre, (mesmo junto ao mar) um modelo físico tão próximo quanto possível de um modelo estratificado horizontalmente.

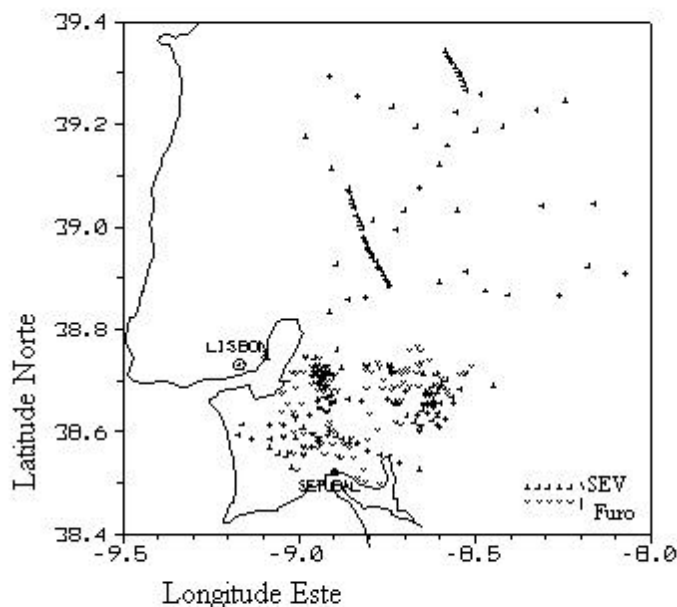


Fig.3 - Localização de furos e sondagens eléctricas (Bacia do Tejo)

3.2.2 - Bacia do Tejo

O trabalho de campo constou da realização de sondagens eléctricas verticais (Schlumberger) com distâncias AB que variam entre os 1000 e os 4000 metros. O número de sondagens é de cerca de uma centena, sendo uma parte destas cedida pelo Instituto Nacional da Água (INAG). A localização das sondagens (fig. 3) não tem distribuição uniforme, pelo que um conhecimento mais detalhado de algumas zonas implica a realização de novas sondagens com o estabelecimento de uma quadrícula adequada à precisão que se pretende obter e à heterogeneidade das várias zonas que compõem as Bacia do Baixo Tejo e Sado.

Na figura 3 apresenta-se a localização das sondagens eléctricas disponíveis nos vales do Tejo e do Sado. No entanto, neste trabalho são apresentados unicamente resultados obtidos com o processamento dos dados das sondagens localizadas na região da Península de Setúbal.

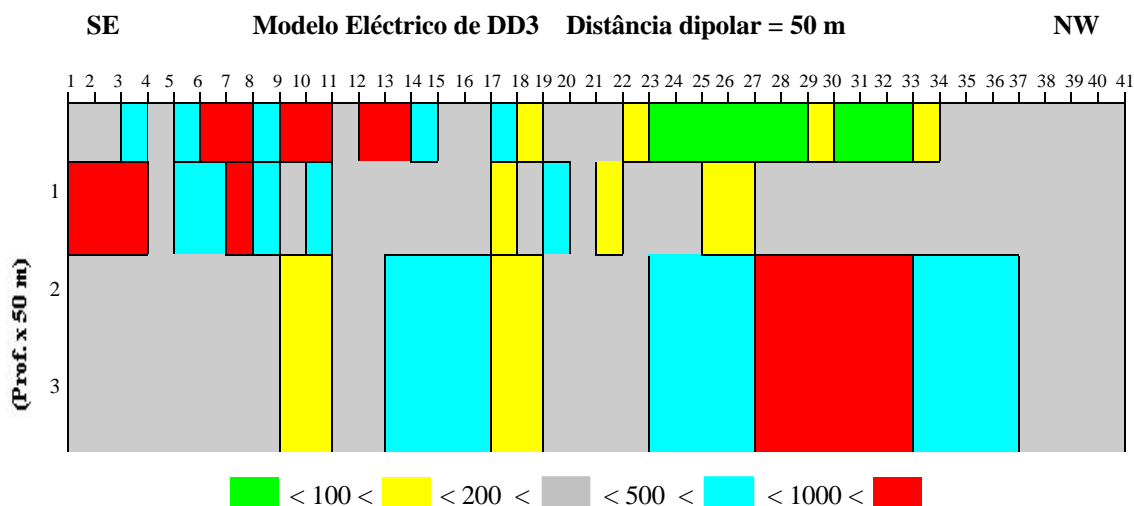


Figura 5 - Lentiscais Resistividade em Ω . m

O modelo (fig. 5) obtido a partir do perfil DD3 apresenta, em profundidade, várias zonas de baixa resistividade associadas à circulação de águas subterrâneas (entre os polos 9 e 10; 17 e 19; 21e 23; 25 e 27).

O perfil DD4, pelo contrário, não mostra grandes variações laterais da resistividade, sendo no entanto posta em evidência a geometria do paleo-relevo, correspondente ao topo dos calcários dolomíticos e a litologia dos terraços cujas resistividades, (muito baixas) apontam para a existência de uma grande percentagem de argila na sua constituição.

Foram ainda efectuadas (fig. 1) 10 sondagens eléctricas verticais que permitiram determinar a espessura dos terraços, bem como a existência de zonas interessantes do ponto de vista da existência de recursos hídricos subterrâneos.

Os furos que têm vindo a ser efectuados confirmam a interpretação efectuada.

O trabalho efectuado (fig. 1) na margem esquerda da ribeira do Algibre não aponta para a existência de recursos hídricos subterrâneos importantes, pelo menos na área abrangida pelos dispositivos efectuados, excepto nas proximidades da zona situada entre os polos 9 e 10 de DD5.

4.2 - Aquíferos porosos costeiros

As sondagens Schlumberger efectuadas (fig. 2) puseram em evidência a existência de uma zona superficial não saturada de água doce e com resistividades muito elevadas, de uma zona correspondente ao aquífero com uma possança próxima dos 15 metros, subjacente à qual se encontra o substrato impermeável constituído por lodos ou argilas, mais ou menos impregnados em água salgada.

A posição da interface água doce-água salgada foi também posta em evidência (fig. 6) a partir da interpretação das sondagens Schlumberger.

A aplicação da lei de Archie possibilitou ainda a obtenção das porosidades do meio poroso, sendo menor junto ao mar e na zona agricultada (12%) e maior na zona central da duna, atingindo aí valores próximos dos 35%.

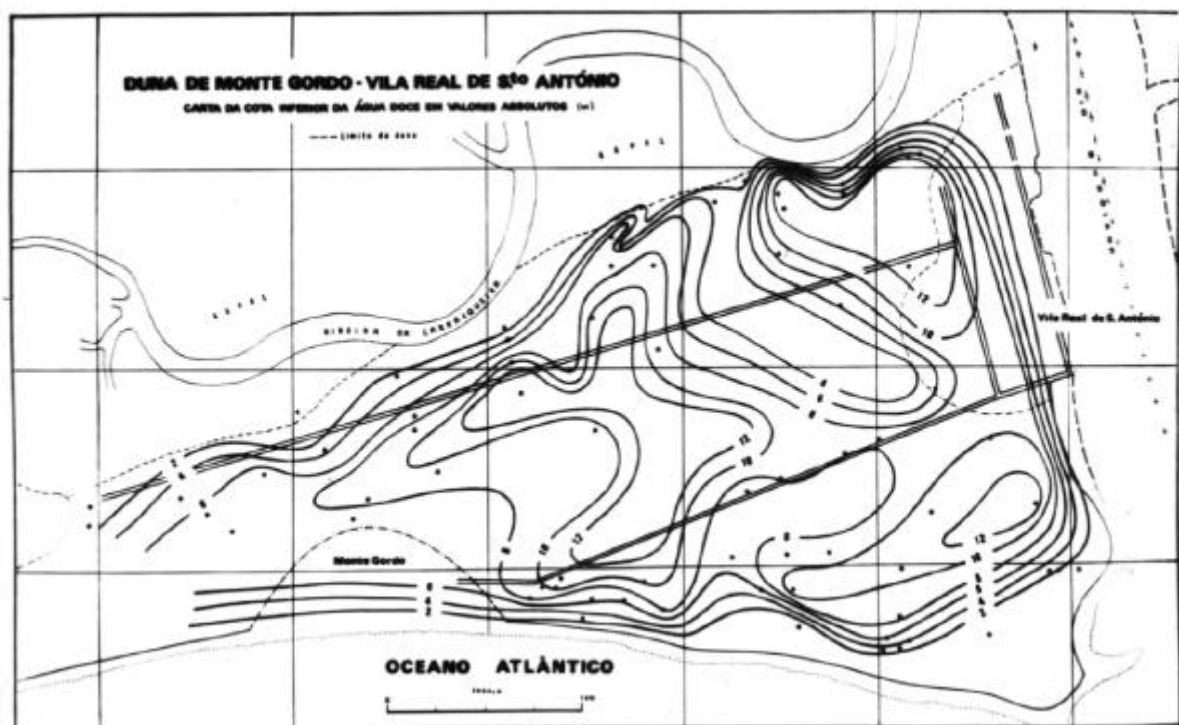


Figura 6 - Carta da cota inferior da água doce (V. R. S^o António)

4.3 - Península de Setúbal

A interpretação dos dados de campo permitiu determinar, com uma precisão dependente da densidade de sondagens e da heterogeneidade das zonas que constituem a Península de Setúbal, a geometria das formações quaternárias, Pliocénicas e Miocénicas. As formações Pliocénicas prolongam-se em profundidade, em relação à cota do terreno, até cerca dos 200 metros a oeste, atingindo uma profundidade inferior a 100 metros a leste. As formações Miocénicas, subjacentes às Pliocénicas, atingem profundidades variáveis, mas que chegam a atingir valores próximos dos 800 metros na zona central da Península. A existência de informação litológica ("logs" de furos), valores de parâmetros hidrológicos, resistividade da água e ainda alguma informação sobre a granulometria das formações, permitiu em combinação com os modelos geoelectricos (espessuras e resistividades das zonas produtivas) um conhecimento mais aprofundado das características dos aquíferos existentes. Assim, foi possível calcular o factor de formação, a porosidade e a condutividade hidráulica das camadas produtivas.

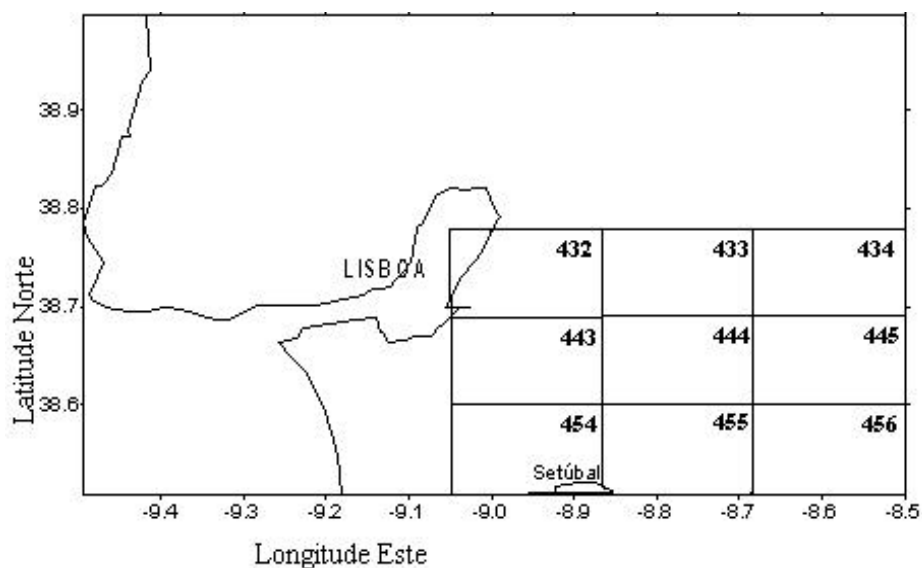


Figura 7 - Discretização da área estudada (Península de Setúbal)

Devido à grande dispersão nos valores dos parâmetros hidrológicos obtidos, originada previsivelmente pela forma lenticular das camadas de argila e ainda por diferenças de granulometria, a área estudada foi dividida em áreas menores (fig. 7), tendo-se obtido o seguinte mapa .

Quadro I.
Valores médios dos parâmetros para cada mapa.

Mapa	T (m ² /d)	K (m/d)	Res. Água (Ω.m)	Res. Cam. (Ω.m)	Res. areia (Ω.m)	F	Porosidade (%)
432	650	29	34	65	140	7.0	24
433	366	12	---	120	210	----	---
434	420	16	67	75	140	3.5	38
443	700	39	50	95	195	6.7	24
444	830	34	72	110	250	7.0	21
445	320	10	39	80	170	3.3	25
454	254	17	33	75	140	10.5	15
455	530	33	65	125	210	9.0	14

Verifica-se que a condutividade hidráulica é maior na zona central e menor a NW da área estudada e a porosidade diminui de NE para W-SW. Na zona central da Península existe uma relação quase linear ($K = 9.5 F^{0.93}$) entre o factor de formação e a condutividade hidráulica.

5 - CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram que os métodos geofísicos são um auxiliar precioso em hidrologia. A detecção e avaliação de recursos em meios geológicos complexos, como sejam os ambientes cárnicos, podem ser efectuados com êxito desde que haja um conhecimento adequado da geologia e conseqüentemente do modelo físico associado.

O estudo de problemas de intrusão salina, bem como uma primeira aproximação à concentração de poluentes químicos nas águas subterrâneas pode efectuar-se de forma expedita usando, por exemplo, o método da resistividade.

A parametrização dos aquíferos e nomeadamente a determinação da geometria, porosidade, condutividade hidráulica e transmissividade podem calcular-se de forma detalhada nos aquíferos porosos, nos aquíferos em que a sua matriz é constituída por camadas alternadas de argila e areia e ainda naqueles cuja matriz porosa contém argila em maior ou menor percentagem.

AGRADECIMENTOS:

O presente trabalho só foi possível pelo apoio recebido de várias instituições, e nomeadamente:

Secção de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Camaras Municipais de Albufeira e V. R. de S^{to} António.

Instituto Nacional da Água e nomeadamente do seu Presidente Eng. Pedro Serra e do Eng. Sérgio Lopes pela cedência dos dados de resistividade cuja aquisição fez na zona da Península de Setúbal.

O trabalho apresentado na área da Península de Setúbal foi efectuado no âmbito do projecto " Capacidade de Carga do Ecosistema Costeiro " , subsidiado pelo "PRAXIS XXI".

BIBLIOGRAFIA

ANDRADE AFONSO, A. R.. *Prospecção Geoeléctrica em Meios Cárcnicos*. Geolis, Vol. 1, p.124-133, 1987.

ANDRADE AFONSO, A. R. E SANTOS, F. A. M.. *A Prospecção Geoeléctrica na Detecção da Circulação da Água Subterrânea em Meios Cárcnicos*. Proceedinds do IV Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos. Vol. 1, p.13-24, 1989.

ANDRADE AFONSO, A. R.. *Prospecção Geoeléctrica em Zonas Costeiras*. Revista Brasileira de Geofísica. Vol. 9(2), p.177-185, 1991.

ARCHIE, G. E.. *The Electrical Resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. Trans AIME, Petrol. Br. V. 146, p.54-62, 1942.

DEY, A. E H. F. MORRISON. *Resistivity Modelingfor Arbitrarilly Shaped Two Dimensional Structures*. Geophysical Prospecting, 27, 1979.

HUNTLEY, D.. *Relations Between Permeability and Electrical Resistivity in Granular Aquifers*. Ground Water. v. 24, no. 4, pp. 466-474,1987.

- Johansen, H. K.. *A Man/Computer Interpretation System for Resistivity Soundings over a Horizontally Stratified Earth*. Geophysical Prospecting, Vol.25, p. 667-691, 1977.
- Kelly, W.. *Geoelectric Sounding for Estimating Aquifer Hydraulic Conductivity*. Ground Water. v. 15, no. 6, pp. 420-425, 1978.
- Koefoed, O., 1979, *Geosounding Principles*. N° 1, Elsevier, Amsterdam.
- Kwader, T.. *Estimating Aquifer Permeability from Formation Resistivity Factors*. Ground Water. v. 23, no. 6, pp. 762-766, 1986.
- Mazac, O., Kelly W. E. e Landa. *Surface Geoelectrics for Groundwater Pollution and Protection Studies*. Journal of Hydrology, 93, p.277-294, 1987.
- Mendes Victor, L. A.,. *Recherches Hydrologiques dans le Plateau de Cajueiros, Porto Amélia, Moçambique*. Diplome d' Ingénieur Geophysicien, Institut de Physique du Globe, Université de Strasbourg, 99 p., 1966.
- Sasaki, Y.. *Two Dimensional Joint Inversion of Magnetotelluric and Dipole-Dipole Resistivity Data*. Geophysics, Vol. 54, p. 254-262, 1989.
- Smith, N. C. e Vozoff, K.. *Two Dimensional D. C. Resistivity Inversion for Dipole -Dipole Data*. I. E. E. E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. Ge. 22 n°1, 1984.
- Spiegel, R. J., Sturdivant, V. R. e Owen, T, E.. *Modeling Resistivity Anomalies from Localized Voids Under Irregular Terrain*. Geophysics, 45, 1980.