

# Prospecção Electromagnética em Geofísica – o método Transiente

Rui M. D. Gonçalves

Unidade Departamental de Matemática e Física Escola Superior de Tecnologia de Tomar Instituto Politécnico de Tomar

rui.goncalves@ipt.pt

## Introdução

Podemos afirmar que o conhecimento e descrição da estrutura sólida da Terra é a finalidade última da Geofísica Interna. Aplicando métodos físicos, é possível aceder ao interior da Terra de uma forma remota e indirecta, o que genericamente apelidamos de Prospecção Geofísica. O método Transiente é um dos métodos que faz uso dos campos electromagnéticos (EM) para obter informação sobre o subsolo.

A Geofísica é um dos ramos da Física. A tradicional divisão particulariza ainda este ramo em Geofísica Interna (parte sólida), Meteorologia (atmosfera) e Oceanografia Física (oceanos). É uma parte integrante das Ciências da Terra, conjuntamente com a Geologia, Geoquímica e demais disciplinas relacionadas com o globo terrestre. Na realidade há décadas que estes conhecimentos já não são exclusivos ao nosso planeta sendo vastamente aplicados noutros corpos do sistema solar.

## Prospecção Geofísica

Os vários métodos usados na Prospecção Geofísica do subsolo estão directamente relacionados com as propriedades físicas dos materiais. Este conhecimento pode ser adquirido “passivamente” ou “activamente”. “Passivamente” quando a aquisição é limitada ao registo temporal dos fenómenos naturais (como a Sismologia) e “activamente” quando actuamos directamente sobre o meio em estudo (como na Prospecção Sísmica, com a geração de pequenos “sismos artificiais”). Assim, por exemplo a gravimetria (prospecção gravimétrica) mede a interacção entre massas (massas terrestres e a “massa” do mecanismo do gravímetro) – equipamento que mede (em valor relativo ou absoluto) o valor da aceleração da gravidade. A propriedade física no cerne do método é a massa volúmica. A Física-Química dos Materiais fornece-nos também valores, via ensaios laboratoriais ou *in loco*, para as diferentes propriedades físicas dos múltiplos constituintes da crosta terrestre. A modelação Geofísica, conjuntamente com demais informações de outras disciplinas, indicará então

qual ou quais os modelos que melhor respondem aos dados adquiridos, em termos das distribuições espaciais das propriedades dos materiais. Em prospecção geoelectrica, nas suas múltiplas técnicas de aplicação, explora-se basicamente uma das propriedade eléctricas dos materiais – a sua condutividade eléctrica (ou o seu inverso, a resistividade eléctrica). Mais uma vez, sabendo os valores desta propriedade para os inúmeros constituintes da crosta terrestre, podemos mapear as suas distribuições espaciais para a região em estudo, através da modelação dos dados adquiridos.

## TDEM

O método de prospecção habitualmente conhecido por Transiente é baseado no princípio da indução electromagnética, regido pela conhecida lei de Faraday. São emitidas e recebidas ondas electromagnéticas sobre a área de estudo, sendo conhecida a distribuição da condutividade eléctrica, pela aplicação de técnicas de modelação. Os primeiros equipamentos foram desenvolvidos nos anos 50-60 do século passado, para prospecção de jazigos minerais. O método TEM - *Transient ElectroMagnetic* ou TDEM - *Time Domain ElectroMagnetic*, consiste na aplicação de um sinal eléctrico numa antena emissora (circuito eléctrico) instalada directamente sobre o solo, ou um pouco acima deste, ou mesmo aerotransportada. A antena receptora pode ser independente ou a própria antena emissora, dependendo da geometria usada na prospecção. Habitualmente, a antena é uma, ou várias, espiras quadradas, cujos lados podem ter desde alguns metros até centenas de metros de comprimento. O sinal eléctrico emitido é periódico consistindo numa onda quadrada simétrica modificada, em que a corrente contínua é abruptamente reduzida a zero e depois invertida em sentido (*on-time*). O valor da intensidade da corrente contínua da onda quadrada

varia entre um ampere a várias dezenas de ampere, consoante a potência do equipamento. A medição da diferença de potencial aos terminais da antena receptora é efectuada após o corte na corrente – durante o período de corrente nula (*off-time*) (Fig. 1). Este processo cíclico é repetido centenas ou milhares de vezes, durante alguns minutos, de modo a melhorar a razão sinal/ruído do registo.

Quando a corrente eléctrica é abruptamente desligada (a designação *transiente* advém deste efeito), a intensidade do campo magnético gerado, dito primário, diminui igualmente. Esta variação (muito rápida) induz, de acordo com a lei de Faraday, uma corrente no solo condutor contíguo à antena. A intensidade desta corrente induzida vai decair no tempo, devido à resistividade finita do solo. Este processo de decaimento vai continuar a induzir, via variação do seu próprio campo magnético, correntes cada vez mais afastadas da antena e a maior profundidade. Estas correntes horizontais, induzidas no solo difundem-se verticalmente e são conhecidas como *ring smoke*, ou seja, anel de fumo (apenas devido à semelhança geométrica). É a variação do campo magnético, dito secundário, destas correntes *ring smoke* em decaimento, que é registada na antena receptora (Fig. 2). A cada ciclo, a tensão induzida nesta antena é amostrada em intervalos de tempo sucessivamente maiores, pois de início a variação é rápida e no final o sinal é de menor intensidade e de variação mais lenta. Os valores de tensão registados nos intervalos de amostragem correspondem a profundidades sucessivamente maiores, e resultam das respectivas correntes que são, por sua vez, função da condutividade eléctrica a essas profundidades.

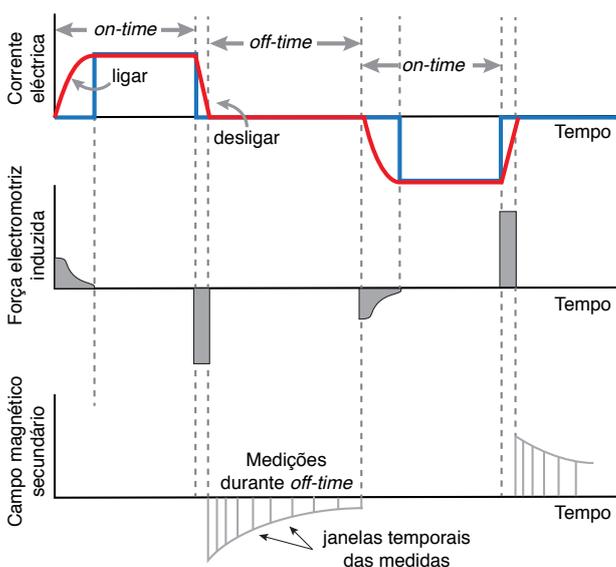


Fig. 1 – O princípio básico de funcionamento do método TEM. Onda quadrada teórica de corrente (azul) e corrente real (vermelha), as respectivas induções geradas no solo e a resposta registada, ao longo de cada ciclo de emissão e recepção. (Adaptado de Christiansen, 2006).

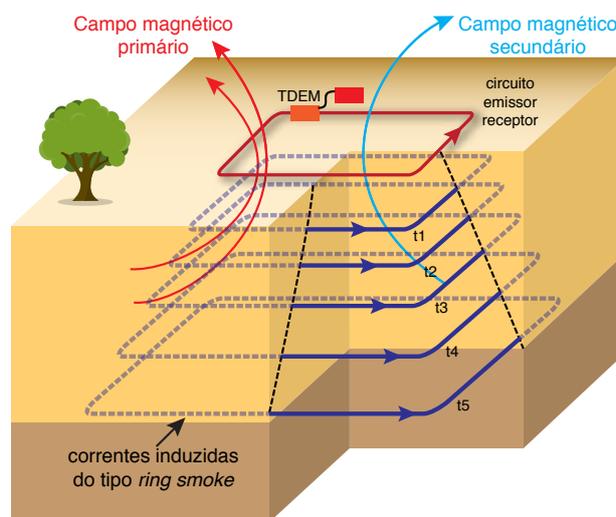


Fig. 2 – Propagação das correntes induzidas nos sucessivos instantes ( $t_1$ ,  $t_2$ , tempos iniciais,  $t_5$ , ... tempos finais). (Adaptado de Gonçalves, 2012).

Nas condições práticas de aplicação, e como os equipamentos funcionam a baixas frequências de emissão do sinal electromagnético (100 Hz a 1 MHz) ou seja perturbações entre 1  $\mu$ s a 10 ms, nas equações de onda de Maxwell:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (1a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (1b)$$

onde  $\mathbf{E}$  é o vector campo eléctrico [ $V m^{-1}$ ],  $\mathbf{H}$  é o vector campo magnético [ $A m^{-1}$ ],  $\sigma$  a condutividade eléctrica [ $S m^{-1}$ ],  $\epsilon$  a permissividade eléctrica [ $F m^{-1}$ ],  $\mu$  a permeabilidade magnética [ $H m^{-1}$ ], e  $t$  o tempo [s]. O termo de dissipação energética é várias ordens de grandeza superior ao termo da energia. Nesse caso, as equações representam então equações de difusão – o método TDEM é estritamente um método associado a um fenómeno de difusão, o que é verdade nestes intervalos de tempo e para condutividades eléctricas superiores a 0,0001  $S m^{-1}$ . Assim, as equações (1) podem escrever-se como,

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (2a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (2b)$$

Para a análise dos dados, várias simplificações são assumidas de início: que o meio em estudo é linear, isotrópico e homogéneo e que as propriedades eléctricas não variam no tempo e são independentes da temperatura e da pressão. Assume-se, ainda, que o valor da permeabilidade magnética é igual ao do vazio,  $\mu = \mu_0$  (o que pode não ser uma boa aproximação se se estiver em presença de formações geológicas eruptivas).

As profundidades de investigação dependem dos valores dos parâmetros eléctricos do solo, do equipamento, nomeadamente do seu momento magnético aplicado (intensi-

dade da corrente  $\times$  área da antena) e do ruído electromagnético instrumental e ambiental. No máximo a profundidade atingida pode ser três vezes o comprimento do lado da antena, na geometria quadrada e usando a mesma antena como emissor/receptor, com uma razão sinal/ruído pequena.

O cálculo da solução geral da equação de difusão (2b), aplicando as respectivas condições de fronteira, dará a resposta (dita transiente) da distribuição da condutividade eléctrica (modelo geoelectrico), em função do tempo de amostragem (profundidade)<sup>1</sup>. A Figura 3 mostra a resposta da componente magnética vertical e da sua derivada, pois esta direcção é a que é registada na antena colocada horizontalmente sobre o solo. Verificamos que o decaimento é praticamente constante após uns  $\mu$ s, intervalo que apelidamos de *late stage* (os equipamentos TDEM obtêm registos num intervalo de tempo cuja largura varia de  $\mu$ s a dezenas de ms). Nesta faixa *late stage* os declives da componente vertical do campo magnético e da sua derivada temporal são respectivamente,  $-3/2$  e  $-5/2$ .

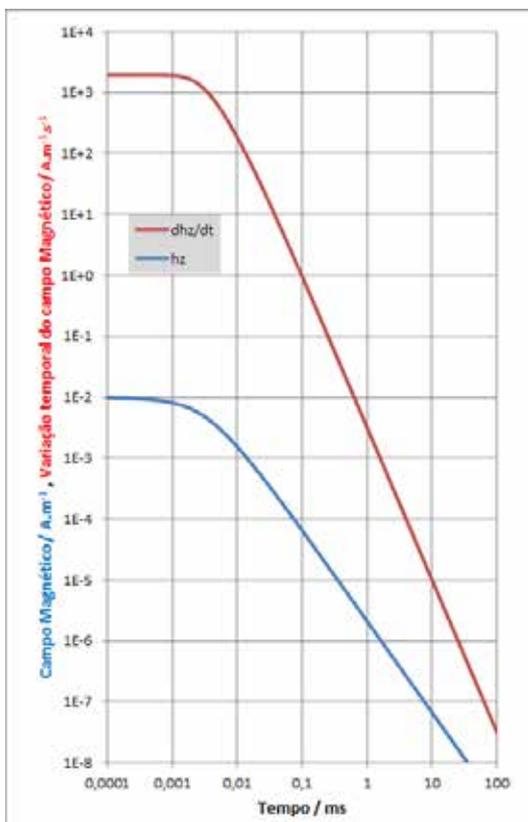


Fig. 3 – Comportamento do campo magnético vertical e da sua derivada temporal, ao longo do tempo, no centro de uma antena circular com 50 m de raio, sobre um meio homogéneo com 100  $\Omega$ .m de resistividade. A corrente aplicada é de 1 A, desligada no instante  $t = 0$  s. (Adaptado de Ward e Hohmann, 1988).

Na prática, em prospecção geoelectrica e electromagnética, o parâmetro usado é a resistividade eléctrica ( $\rho$ ), sendo os dados de campo obtidos expressos em termos da resistividade aparente ( $\rho_a$ ). A expressão que se obtém para a  $\rho_a$  a partir da tensão induzida na antena receptora na faixa temporal *late stage* é dada por:

<sup>1</sup> A formulação físico-matemática detalhada da solução para o caso de um modelo 1D, pode ser encontrada em manuais de geofísica, como Ward e Hohmann, 1988

$$\rho_a \approx \left( \frac{Ia^2}{20 \frac{\partial b_z}{\partial t}} \right)^{2/3} \frac{\mu_0^{5/3}}{\pi^{1/3}} t^{-5/3}$$

onde  $b_z$  é a componente vertical do vector indução magnético [T],  $I$  é a intensidade da corrente na antena [A], e  $a$  é o comprimento da aresta da antena [m].

Neste método verificamos uma diferença relativamente ao método de prospecção conhecido por resistividade. Na resistividade, a tensão medida varia linearmente com a resistividade do meio. No TDEM, a tensão medida varia com a condutividade elevada a 3/2, o que indica ser o método TDEM mais sensível a pequenas variações na condutividade do meio.

### Sondagem TDEM

Feita a amostragem num local, obtemos então valores da  $\rho_a$  versus tempo, o que designamos como sondagem, pois os valores da resistividade correspondem a profundidades sucessivamente maiores (Fig. 4). A modelação mais simples corresponde a considerar o meio em estudo como unidimensional (1D), (Fig. 5). Significa que não há variações laterais da resistividade, apenas estratificação horizontal. Esta aproximação de modelação é bastante razoável, mesmo com estratificação sub-horizontal. A sondagem TDEM amostra basicamente o volume sob e nas imediações da antena. Em campanhas de prospecção e em especial nos locais com variações laterais, 2D e 3D, a solução será sempre realizar muitas sondagens em linha (perfis) ou em malha. Em locais com grandes variações laterais, as sondagens em linha devem ser obtidas contiguamente, por vezes com sobreposição da área amostrada. A modelação dos dados de cada sondagem, nestes casos de dimensionalidade 2D e 3D é bastante mais complexa (exigindo bastante mais capacidade de cálculo e tempo).

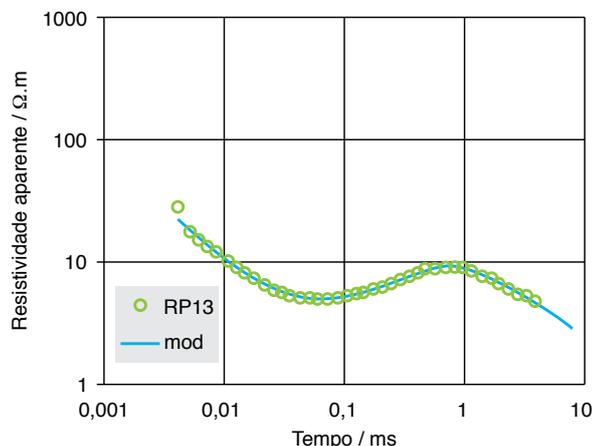


Fig. 4 – Resistividade aparente versus tempo de uma sondagem TDEM (círculos – dados de campo, linha contínua – resposta do modelo 1D). (Gonçalves, 2012).

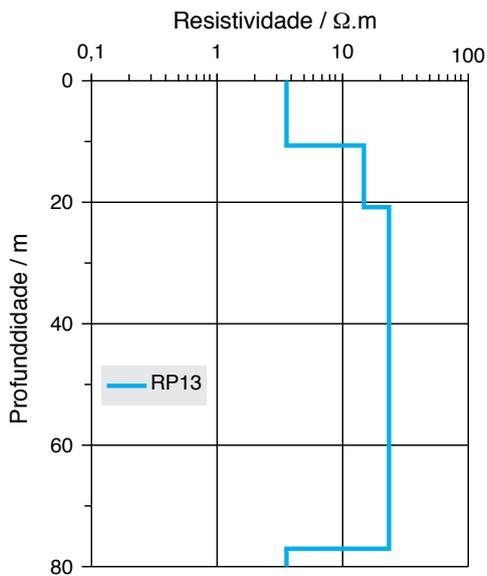


Fig. 5 – Modelo 1D da sondagem TDEM da Figura 4. Resistividade e profundidade das interfaces das camadas. (Gonçalves, 2012).

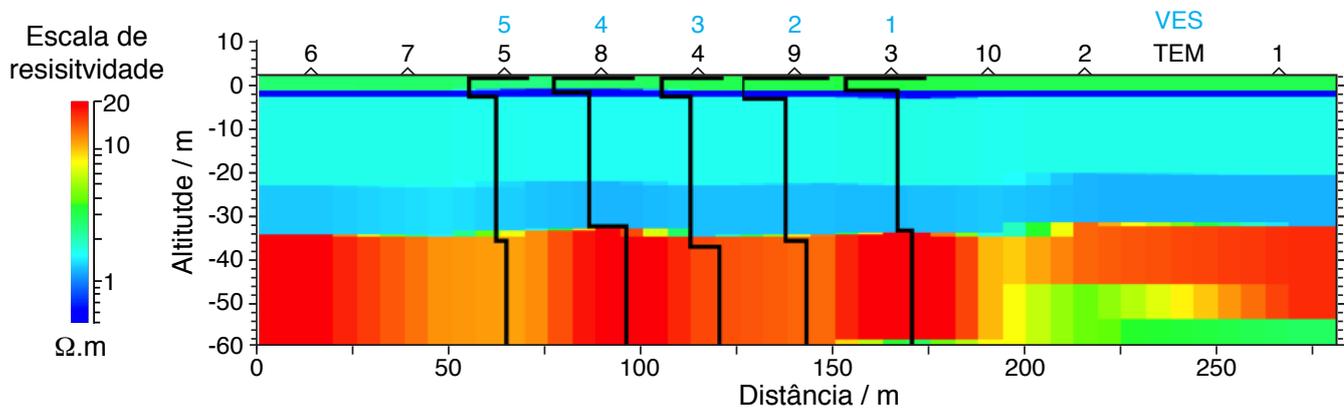


Fig. 6 – Perfil de sondagens contíguas TDEM (antena 25 m x 25 m) e comparação directa com modelos de Sondagens Eléctricas Verticais (VES). (Gonçalves, 2012).

A “modelação da sondagem”, isto é a obtenção de um modelo cuja resposta “coincida” com os dados de campo obtidos, é o que se pretende. Para tal o processo habitual é usar uma técnica de “inversão” dos dados, isto é, resolver o chamado problema inverso, como detalhado em F. Santos *et al* (2013). Enquanto que no problema directo temos os parâmetros do meio e calculamos a sua resposta, no problema inverso temos a resposta do meio (dados de campo) e queremos saber que valores têm de ter os parâmetros do meio que originaram tal resposta. O conhecimento da resposta do meio (problema directo) é então integrado num dos vários processos iterativos de convergência, sendo que, devido principalmente ao limitado número de dados e aos erros de observação, poderão existir várias respostas (vários modelos equivalentes) para os dados observados. Minimizamos a diferença entre a resposta do modelo e os dados de campo, aplicando técnicas de mínimos quadrados de inversão não-linear, pois usualmente existem mais dados do que parâmetros a definir. Usualmente, os vários modelos obtidos não são

muito diferentes, e a escolha de um modelo final pode ser feita simplesmente a partir da média de vários modelos ou, havendo informação complementar (de sondagens mecânicas, geologia, etc), integrando esses dados na escolha do modelo. Existindo mais dados obtidos por outros métodos geofísicos, por exemplo sondagens de resistividade, estes podem (e devem) ser integrados numa inversão conjunta dos dados, obtendo-se um modelo que responde igualmente bem aos vários conjuntos de dados de campo. Na Figura 6 está exemplificado um perfil de sondagens TDEM contíguas, juntamente com os modelos obtidos via resistividade (método Schlumberger, sondagem eléctrica vertical VES). A coincidência de modelos é perfeita, com a detecção das superfícies livre e fundo do aquífero, e o seu baixo valor da resistividade, por se tratar de um ambiente estuarino em contacto com a água salgada do mar. De notar uma pequena diferenciação na resistividade do aquífero junto à sua base, não detectada pelo método resistivo.

## Aplicações e limitações

As sondagens TDEM são, devido à física subjacente, especialmente eficazes na detecção de corpos/camadas condutoras. São assim empregues na prospecção de minérios, recursos aquíferos (incluindo intrusão salina) e geotérmicos, monitorização ambiental do solo, etc. Obtendo basicamente o mesmo parâmetro – resistividade eléctrica – como o método da resistividade, o TDEM, em comparação, tem a vantagem de ser mais rápido e eficaz na aplicação em campo (portanto mais económico), tem uma melhor resolução das zonas condutoras e não necessita de um contacto galvânico com o solo, o que facilita a sondagem em solos secos ou muito secos (zonas áridas). Como limitações, há a apontar o fraco sinal em zonas muito resistivas (que necessitam então de antenas com áreas muito grandes), a menor disponibilidade de software para resolução dos problemas 2D e 3D, e o custo e complexidade do equipamento, que é maior que o da resistividade.

O método TDEM tem ainda limitações relacionadas com o meio em estudo e o meio envolvente. Se no meio em estudo a permitividade eléctrica for dependente da fre-

quência, teremos um efeito de polarização induzida (IP). Se o meio em estudo tiver uma permeabilidade magnética muito superior ao valor do vazio, temos o chamado efeito superparamagnético (SPM). Estes efeitos são reconhecidos nos dados de campo das várias sondagens e podem ser modelados. O ruído EM afecta também as sondagens TDEM. Temos ruído EM natural – por exemplo, as descargas eléctricas na atmosfera ou ruído geológico – e ruído EM artificial – por exemplo, as linhas de alta tensão, emissões em AM e VLF, vedações/cercas metálicas com ligação ao solo e a própria geometria incorrecta das antenas. Devido a isto, em alguns locais e com condições inadequadas o método TDEM pode não ser possível de aplicar.

Apesar destas limitações o método TDEM é cada vez mais usado em prospecção geofísica; quer nas tradicionais sondagens, em modo contínuo com pequenas antenas em deslocação sobre o solo (PATEM) ou suspensas em helicóptero (SkyTEM) para cobertura rápida de vastas áreas (Christiansen et al, 2003).

#### Referências

1. A. V. Christiansen, *Application of airborne TEM methods in Denmark and layered 2D inversion of resistivity data*, Tese de Doutoramento, Universidade de Aarhus, Dinamarca (2003)
2. A. V. Christiansen, E. Auken, K. Sørensen, “The transient electromagnetic method”, Cap. 6, in *Groundwater Geophysics, A Tool for Hydrogeology*, R. Kirsch (Ed.), Springer, 493 p. (2006).
3. F. Santos, G. Silveira e L. Matias, “Resolver o problema inverso para encontrar recursos e investigar o Interior da Terra”, in *Matemática do Planeta Terra*, F. P. Costa, J. T. Pinto e J. Buescu (Eds.), IST Press (2013), ISBN: 978-989-8481-26-9.
4. Rui. M. D. Gonçalves, *Hydrochemical water prediction (water quality) with Transient Electromagnetic Soundings (TEM)*, Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Portugal (2012).
5. S. H. Ward, e G. W. Hohmann, “Electromagnetic Theory for Geophysical Applications, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics – theory”, in M. N. Nabighian (Ed.), Vol. 1, *Investigation in Geophysics 3*, Society of Exploration Geophysicists, págs. 131-311 (1988).



**Rui Gonçalves** nasceu em 1967 e é docente no I. P. Tomar desde 1999. Licenciado e Mestre em Ciências Geofísicas – ramo Geofísica Interna, e Doutor em Ciências Geofísicas e da Geoinformação – especialidade em Geofísica, sempre pela Universidade de Lisboa. Tem-se dedicado à prospecção e caracterização geofísica do subsolo com os métodos eléctricos, electromagnéticos e de georradar.