

PROSPECÇÃO DE RECURSOS HIDROMINERAIS EM TERRENOS CRISTALINOS caso de estudo em Caminha, noroeste de Portugal

Alberto da Silva LIMA

Doutor em Hidrogeologia, Centro de Investigação Geológica, Ordenamento e Valorização de Recursos, Departamento de Ciências da Terra, Universidade do Minho, 4710-057 Braga, Portugal, aslima@dct.uminho.pt

Susana BARBOSA

Mestre em Ordenamento e Valorização de Recursos Geológicos, Departamento de Ciências da Terra, Universidade do Minho, 4710-057 Braga, Portugal, susanabarbosa.um@gmail.com

Resumo

Grande parte dos recursos hidrominerais de Portugal continental está localizada no Maciço Ibérico, a porção ibérica do orógeno varisco, constituída essencialmente por granitos e metassedimentos, ou seja, rochas com porosidade e permeabilidade primárias negligenciáveis. Nestes terrenos cristalinos, a água subterrânea está essencialmente associada a descontinuidades dos maciços rochosos, pelo que a prospecção e pesquisa de águas subterrâneas nestes ambientes visa fundamentalmente a identificação e, se possível, a caracterização das zonas de fractura que afectam os maciços. Neste processo, os métodos geofísicos de superfície têm-se revelado ferramentas fundamentais. Entre os métodos geofísicos, a resistividade eléctrica tem sido utilizada com êxito em programas de prospecção e pesquisa de água subterrânea em meios fracturados. Do mesmo modo, também o método eletromagnético de muito baixa frequência (EM-VLF) tem-se mostrado bastante promissor na detecção de fracturas saturadas verticais e subverticais e apresenta vantagens em relação à resistividade eléctrica, sobretudo na simplicidade e economia da sua aplicação.

No âmbito de um trabalho de prospecção e pesquisa de águas minerais naturais na região de Caminha/Vila Nova de Cerveira (NW de Portugal), foram utilizados os métodos antes referidos. Na aplicação do método da resistividade eléctrica foi adoptado um protocolo baseado no dispositivo de Wenner, tendo sido usado um resistímetro ABEM SAS 1000 com sistema LUND acoplado, segundo um perfil com a extensão de 400 m. Os dados foram interpretados por modelação inversa, com recurso ao software RES2DINV. Para a realização dos perfis de VLF foi utilizado um equipamento ABEM Wadi, tendo sido efetuados 2 perfis, com extensões de 220 m e intervalos de aquisição de 5 m. Para a interpretação dos dados foi utilizado o software Ramag VLF.

Da interpretação dos perfis de resistividade e de VLF foi possível identificar zonas de baixa resistividade, provavelmente relacionadas com o contacto entre a rocha granítica e a formação metassedimentar e/ou com a faixa deformacional onde está parcialmente instalada a Ribeira das Amoladuras. Estas zonas afiguram-se como as mais promissoras para a realização de sondagens mecânicas de pesquisa e eventualmente para a construção de captações definitivas, visando a revelação e exploração do recurso hidromineral.

Palavras-chave: recursos hidrominerais; prospecção; métodos geofísicos.

1. Introdução

De acordo com o Decreto-Lei nº 90/90 de 16 de Março, os recursos hidrominerais incluem as águas minerais naturais e as águas mineroindustriais. Por sua vez, o mesmo diploma define água mineral natural como “uma água considerada bacteriologicamente próprias, de circulação profunda, com particularidades físico-químicas estáveis na origem dentro da gama de flutuações naturais, de que resultam propriedades terapêuticas ou simplesmente efeitos favoráveis à saúde”. A qualificação de uma água mineral natural baseia-se no reconhecimento, pelas entidades competentes, das suas características essenciais e da sua conformidade com a definição antes apresentada.

A exploração das águas minerais naturais visa satisfazer as necessidades em termos de matéria-prima das indústrias do engarrafamento e do termalismo. Atualmente, em Portugal, a maior parte das águas minerais naturais serve o sector do termalismo, mas são várias as concessões que exploram também os recursos na vertente do engarrafamento. Há ainda a referir as explorações destinadas exclusivamente à indústria do engarrafamento.

Segundo dados da Direcção-Geral de Energia e Geologia, a evolução da produção de águas minerais naturais na indústria do engarrafamento no decénio 2000-2009 apresenta um aumento até ao ano de 2006, onde se registou um volume de 658,2 milhões de litros. A partir deste ano, observa-se uma diminuição progressiva pouco acentuada, com uma produção de 599,6 milhões de litros no ano de 2009. Esta retração é parcialmente compensada pelo aumento da produção de águas de nascente, que atingiu, no ano de 2009, um volume de produção de 555,2 milhões de litros. Aliás, no conjunto, as águas minerais naturais e as águas de nascente registaram em 2009 a maior produção do decénio, com um volume que ascende a 1154,8 milhões de litros (DGEG, 2011).

Não obstante a oscilação antes referida, há um aumento líquido de produção de água mineral natural no decénio da ordem de 122,3 milhões de litros, comparando os anos de 2000 e 2009. A diferença é ainda mais significativa ao considerar a totalidade da água engarrafada (água mineral natural e água de nascente), verificando-se um aumento de produção de 398,6 milhões de litros entre os anos de 2000 e 2009, o que representa um incremento de aproximadamente 53% (DGEG, 2011).

Em termos económicos, segundo dados oficiais do Instituto Nacional de Estatística e da Direcção-Geral de Energia e Geologia relativos ao ano de 2008, o volume de negócios do sector das águas engarrafadas foi de, aproximadamente, 286 milhões de euros, o que representa cerca de 2,7% do conjunto da indústria alimentar (APIAM, 2011).

Dada a importância económica da indústria do engarrafamento de águas minerais naturais e de águas de nascente, a valorização do sector passa pela identificação de áreas com potencial hidrogeológico, visando criar novos polos de exploração. Pelas suas especificidades climáticas e geológicas, a região noroeste de Portugal continental afigura-se como uma das áreas mais promissoras a este nível, já que alia os mais elevados índices pluviométricos do território a um quadro geológico favorável à existência de águas subterrâneas de elevada qualidade.

Tratando-se de meios hidrogeológicos com porosidade e permeabilidade primárias negligenciáveis, a água subterrânea está maioritariamente associada a descontinuidades dos maciços rochosos, o que dificulta a seleção dos locais mais favoráveis à captação. Neste processo, os métodos geofísicos de superfície têm-se revelado ferramentas fundamentais. Entre os métodos geofísicos, a resistividade eléctrica tem sido utilizada com êxito em programas de prospecção e pesquisa de água subterrânea em meios fracturados. Do mesmo modo, também o método eletromagnético de muito baixa frequência (EM-VLF) tem-se mostrado bastante promissor na detecção de fracturas saturadas verticais e subverticais e apresenta vantagens em relação à resistividade eléctrica, sobretudo na simplicidade e economia da sua aplicação.

O presente estudo enquadra-se num programa de prospecção e pesquisa de águas minerais naturais numa área situada nos concelhos de Caminha e Vila Nova de Cerveira, ambos pertencentes ao distrito de Viana do Castelo (NW de Portugal). Este programa visa a construção de captações para a exploração de água subterrânea mineral destinada à indústria do engarrafamento.

Com a aplicação de métodos geofísicos, pretende-se identificar estruturas geológicas (falhas, fracturas, contactos geológicos) favoráveis à ocorrência de águas subterrâneas, através da interpretação e modelação dos resultados obtidos. Para tal, foram aplicados dois métodos de prospecção geofísica, nomeadamente, a resistividade eléctrica e o método electromagnético de muito baixa frequência (EM-VLF).

A área em estudo localiza-se no limite entre os concelhos de Caminha e Vila Nova de Cerveira. Além das características climáticas já mencionadas, o contexto geológico-estrutural da área seleccionada afigura-se favorável a circuitos subterrâneos relativamente profundos, dada a existência de fracturas de expressão regional que a atravessam. Além disso, ocorre ainda o contacto entre formações metassedimentares e o maciço granítico do Monte de Góis e diversas massas e filões aplito-pegmatíticos. Alguns destes filões seguem orientações concordantes com a fracturação regional, destacando-se as direcções N-S a NE-SW.

2. Prospecção de águas subterrâneas por métodos geofísicos

Os métodos geofísicos disponíveis para a detecção de anomalias relacionadas com a presença de águas no meio subterrâneo incluem métodos de superfície e métodos de subsuperfície. Entre os primeiros, incluem-se a gravimetria, a sísmica, os métodos eléctricos, magnéticos e eletromagnéticos e, ainda, os métodos radiológicos. Por sua vez, os métodos de subsuperfície consistem essencialmente na realização de diagrafias (Nath *et al.*, 2000).

Em contextos geológicos mais ou menos complexos, os métodos geofísicos têm-se revelado bastante importantes na localização e caracterização de estruturas geológicas susceptíveis de apresentar interesse na prospecção e pesquisa de águas subterrâneas (Custodio e Llamas, 1983; Martínez e Ruano, 1998).

A aplicação das técnicas geofísicas apresenta-se vantajosa, relativamente aos métodos tradicionais de investigação do subsolo (ex.: sondagens), essencialmente devido à sua rapidez na avaliação de grandes áreas e com custos relativamente menores. Além disso, os levantamentos geofísicos propiciam a execução de perfis mais ou menos contínuos, o que possibilita a identificação de variações laterais decorrentes das mudanças litológicas.

Na prospecção de águas subterrâneas em terrenos cristalinos importa principalmente identificar zonas de fractura saturadas, pois é nestas que se encontra armazenada a água subterrânea. Entre os métodos geofísicos disponíveis, a resistividade eléctrica e o método eletromagnético de muito baixa frequência (EM-VLF) são considerados os métodos de eleição para a prospecção de águas subterrâneas nestes meios hidrogeológicos (Nath *et al.*, 2000).

2.1. Resistividade eléctrica

A resistividade eléctrica dos terrenos é uma característica estreitamente ligada ao tipo, natureza e estado de alteração das formações geológicas, assim como à presença de águas subterrâneas e elementos contaminantes. Deste modo, o conhecimento da distribuição espacial da resistividade eléctrica em profundidade, a partir de registos efectuados à superfície, permite identificar e caracterizar estruturas geológicas subsuperficiais, deduzir zonas de percolação preferencial de águas subterrâneas e delimitar plumas de contaminantes (Graça e Mota, 2002).

No método da resistividade eléctrica, a grandeza física medida é a resistência que cada material apresenta perante a passagem de corrente eléctrica. Cada formação geológica apresenta um valor de resistividade diferente, consoante o tipo de minerais que a constituem, assim como da qualidade e quantidade de fluidos que preenchem os seus poros e fracturas.

A aplicação do método da resistividade eléctrica consiste na introdução de corrente eléctrica no terreno através de dois eléctrodos (A e B), denominados eléctrodos de corrente, sendo a queda de potencial medida através de outros dois eléctrodos (M e N), denominados eléctrodos de potencial (Figura 1).

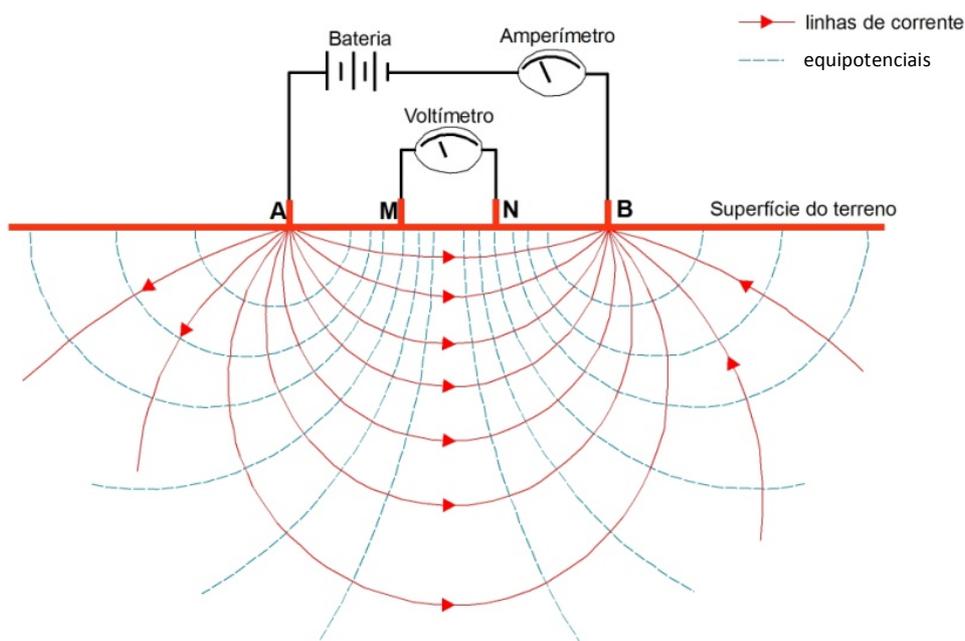


Figura 1 – Esquema representativo do princípio da resistividade eléctrica (A e B – eléctrodos de corrente; M e N – eléctrodos de potencial).

A resistividade é calculada multiplicando a razão entre a queda de potencial e a intensidade de corrente (resistência) pelo factor geométrico (k), que depende da distribuição espacial dos eléctrodos.

Se o meio em estudo não for homogéneo, o valor de resistividade que se obtém totaliza a contribuição de todas as formações presentes. A importância de cada uma destas contribuições depende da geometria do dispositivo, em particular da distância entre os eléctrodos. O valor de resistividade assim obtido corresponde à denominada resistividade aparente e é calculado pela expressão:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k = R \cdot k \quad (1)$$

em que:

ρ_a : resistividade aparente ($\Omega \cdot m$);

k : factor geométrico (m);

ΔV : diferença de potencial (V);

I : intensidade da corrente (A);

R : resistência (Ω).

O factor geométrico depende, como se disse, da disposição espacial dos eléctrodos. Os dispositivos mais utilizados são o de Wenner, o de Schlumberger, o dipolo-dipolo e o quadrado. O dispositivo de Wenner corresponde a um arranjo linear de eléctrodos igualmente espaçados, como se ilustra na Figura 2.

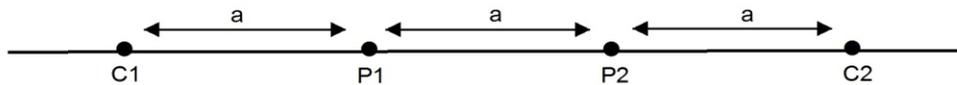


Figura 2 – Esquema representativo do dispositivo de Wenner (C1 e C2 - eléctrodos de corrente; P1 e P2 - eléctrodos de potencial; a - distância entre eléctrodos).

No dispositivo de Wenner, o factor geométrico é dado pela expressão:

$$k = 2\pi a \quad (2)$$

onde a é o espaçamento entre os eléctrodos.

Substituindo em (1) o factor geométrico descrito na expressão (2), a determinação da resistividade aparente, de acordo com o dispositivo de Wenner, é feita pela expressão:

$$\rho_a = R \cdot 2\pi a \quad (3)$$

Classicamente, a aplicação do dispositivo de Wenner é feita mediante a utilização de quatro eléctrodos (dois de corrente e dois de potencial), igualmente espaçados (Figura 2), mas cujas distâncias podem ser alteradas, em função da profundidade de investigação pretendida. Por exemplo, no caso de se pretender realizar uma sondagem eléctrica vertical (SEV), o espaçamento entre os eléctrodos vai sendo aumentado, de modo a atingir profundidades sucessivamente maiores (Figura 3). A realização de uma nova SEV num outro local implica a mudança de todo o equipamento para o novo local e a repetição de todo o procedimento.

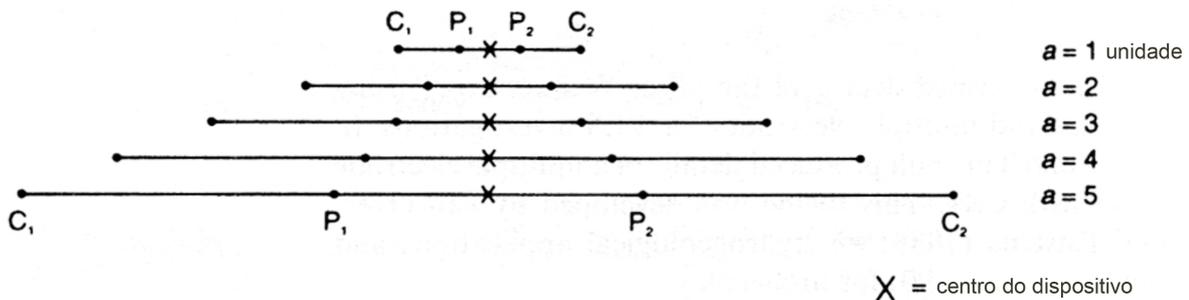


Figura 3 – Representação esquemática da posição dos eléctrodos na realização de uma sondagem eléctrica vertical segundo o dispositivo de Wenner.

aquisição automática das leituras por computador e o respectivo tratamento informático, atribuem também importantes vantagens a este método de prospecção. Porém, apresenta algumas limitações, tais como, a baixa resolução para meios com descontinuidades laterais, interpretação ambígua e limitada a configurações estruturais simples, profundidade de penetração do método limitada pela máxima potência eléctrica que pode ser introduzida no solo, além de que a topografia e as variações nas resistividades superficiais podem “mascarar” as variações mais profundas (Rocha *et al.*, 2003).

2.2. EM-VLF

O método electromagnético VLF (EM-VLF) é considerado um método electromagnético ativo, longínquo. Como o nome indica, utiliza radiação electromagnética de muito baixa frequência, usualmente na banda dos 15 kHz aos 25 kHz. Estas radiações são normalmente geradas por transmissores de rádio potentes, utilizados em comunicações a grandes distâncias e nos sistemas de navegação (Kearey *et al.*, 2002).

A nível global, existem várias estações que utilizam esta gama de frequências (Figura 5), muitas das quais operam em contínuo. No entanto, algumas encerram temporariamente para manutenção.

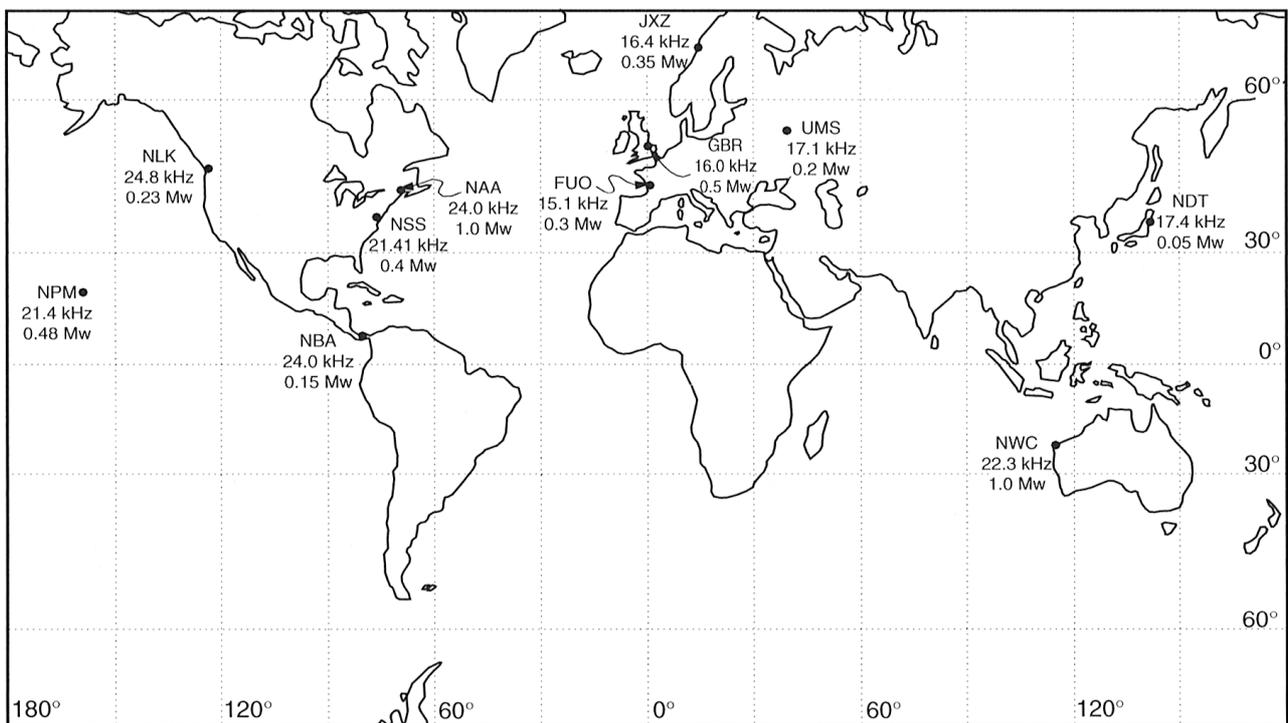


Figura 5 - Localização de algumas das mais importantes estações emissoras de radiação VLF e indicação das respectivas frequência e potência. Extraído de Milson (2003).

O alcance dos emissores de radiação VLF é variável e depende da sua potência. A estação NAA (Cutler, Maine, EUA) possui o emissor mais potente conhecido, podendo alcançar os 5 600 km (ABEM, 1989). Aliás, o facto do sinal de VLF poder ser usado a milhares de quilómetros de distância do emissor é importante na aplicação do método em prospecção, já que, a estas distâncias, o campo electromagnético é essencialmente planar e horizontal, com a componente eléctrica no plano vertical e a componente magnética perpendicular à direcção de propagação, no plano horizontal (Figura 6). É também por aquela razão que o método é considerado longínquo.

Um condutor orientado segundo a direcção do transmissor é interceptado pelo vector magnético e as correntes eléctricas induzidas produzem um campo magnético secundário. No entanto, os condutores orientados perpendicularmente à direcção de propagação não são interceptados de forma eficiente pelo vector magnético, não produzindo distorção significativa do campo primário. Como tal, a orientação do emissor é determinante na aplicação do método de VLF. Além disso, para que um objecto, como uma zona de fractura, produza uma anomalia, ele deverá ter uma certa dimensão. Na prática, o objecto deverá ter um comprimento superior a 50 m e estender-se por uma profundidade não inferior a 10 m. No entanto, a espessura do mesmo poderá ter dimensões da ordem de 0,5 m a 1 m (ABEM, 1989). Por isso, o método de VLF pode ser utilizado na detecção de estruturas planares penetrativas com baixas resistividades, como por

exemplo fracturas verticais ou subverticais profundas, saturadas em água. É, portanto, um método de eleição na prospecção de águas subterrâneas em terrenos fracturados, particularmente se a rede de fracturação for vertical ou muito inclinada, como é frequente em muitos meios geológicos.

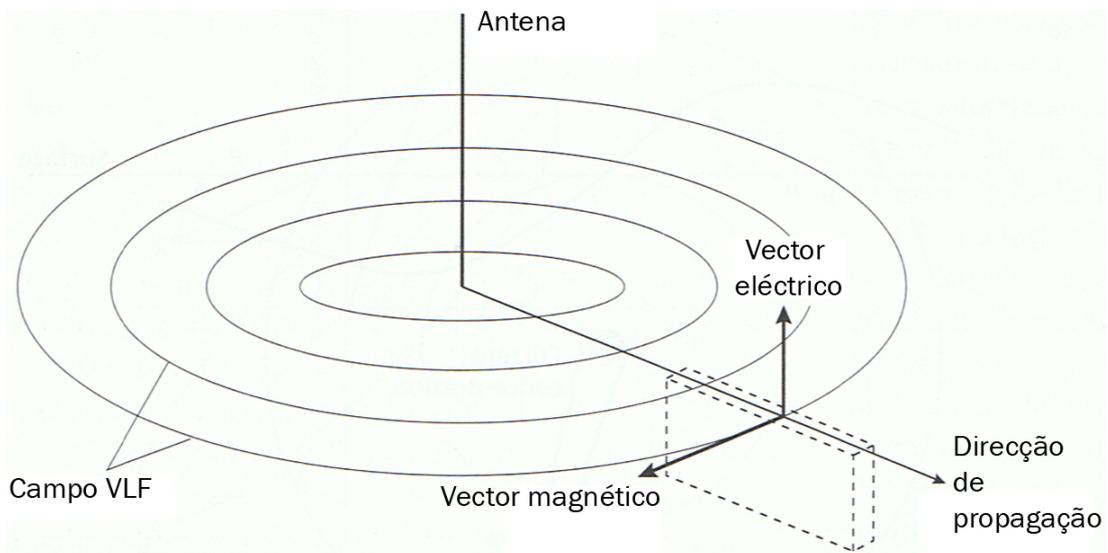


Figura 6 - Propagação do campo magnético a partir da antena emissora. Adaptado de Kearey *et al.* (2000).

Uma antena de VLF (emissor) consiste basicamente num longo cabo metálico vertical, podendo atingir centenas de metros de comprimento (Figura 6). Por sua vez, o receptor deverá possuir duas antenas, uma vertical e outra horizontal, de modo a medir as componentes horizontal e vertical do campo electromagnético, sendo normalmente registada a inclinação da resultante dos campos primário e secundário, medidos ao nível da superfície do terreno.

Em condições normais, e uma vez que o campo primário é horizontal, o ângulo da resultante deverá ser próximo de zero. À medida que as medições são feitas mais próximas do corpo condutor, o campo secundário é, inicialmente, quase vertical, daí que a resultante seja também muito inclinada. A aproximação ao corpo condutor é acompanhada de uma diminuição da inclinação do campo secundário, pelo que a resultante vai diminuindo até atingir o valor zero sobre o ponto de concentração de corrente do corpo condutor. O afastamento a este corpo faz aumentar o ângulo do campo secundário, mas no sentido inverso, conduzindo a valores negativos do ângulo da resultante. Fora dos limites de ação de capacidade indutora do corpo condutor, o ângulo de inclinação retoma um valor próximo de zero. A Figura 7 representa a anomalia de VLF típica antes descrita.

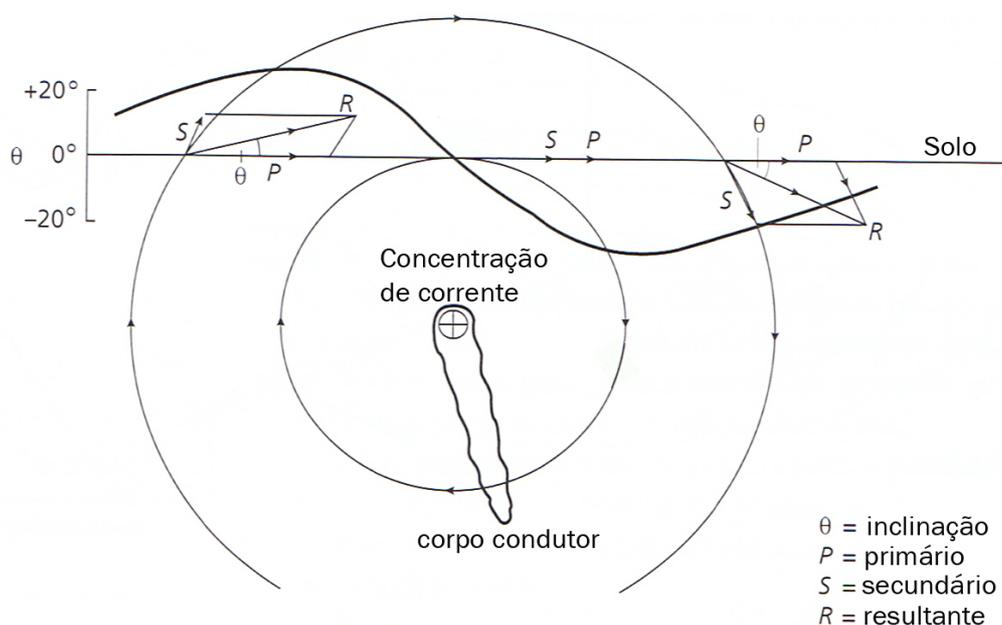


Figura 7 - Perfil do ângulo de inclinação gerado por um corpo condutor. Adaptado de Kearey *et al.* (2000).

Como referido oportunamente, um receptor electromagnético responde à resultante dos campos primário e secundário, não só em termos de intensidade (ângulo de inclinação), mas também em termos de defasamento em relação ao campo primário. Em VLF é usual referir os conceitos de intensidade e fase em termos de partes real e imaginária, respectivamente. Desta forma, a anomalia apresentada na Figura 7 diz respeito apenas à parte real. A parte imaginária pode também indicar uma anomalia positiva, dependendo da extensão e da resistividade dos materiais que recobrem o corpo condutor (ABEM, 1989). A interpretação da parte imaginária é mais complexa que a da parte real, mas pode fornecer informação sobre a condutividade eléctrica do corpo condutor (Lima, 2009a). Na Figura 8 apresenta-se um perfil de VLF, incluindo as partes real e imaginária. A anomalia mais significativa evidenciada não está relacionada com a presença de estruturas condutoras naturais, resultando antes da interferência de condutores metálicos artificiais.

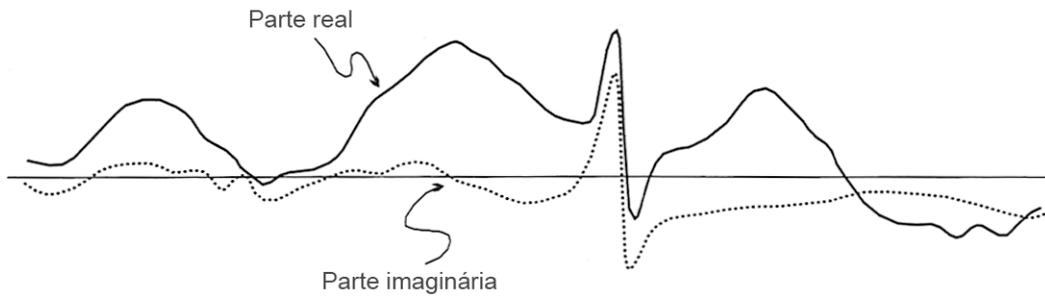


Figura 8 – Perfil típico de VLF, com representação das partes real e imaginária. Adaptado de Milson (2003).

Numa situação normal e na ausência de interferências significativas, um perfil do tipo do representado na Figura 8 pode ser de difícil interpretação, já que pequenas anomalias poderão não ser detectadas, devido à sobreposição do “ruído” natural das formações geológicas. Além disso, o carácter assimétrico das anomalias poderá dificultar a localização precisa das fontes geradoras. A redução do “ruído” e a remoção da assimetria poderá fazer-se pela aplicação de filtros, ou seja, pela transformação dos dados originais através da aplicação de fórmulas matemáticas simples que produzem gradientes horizontais. A Figura 9 mostra os perfis de VLF elaborados com dados originais e com dados transformados pela aplicação dos filtros Karous-Hjelt e Fraser (Milson, 2003).

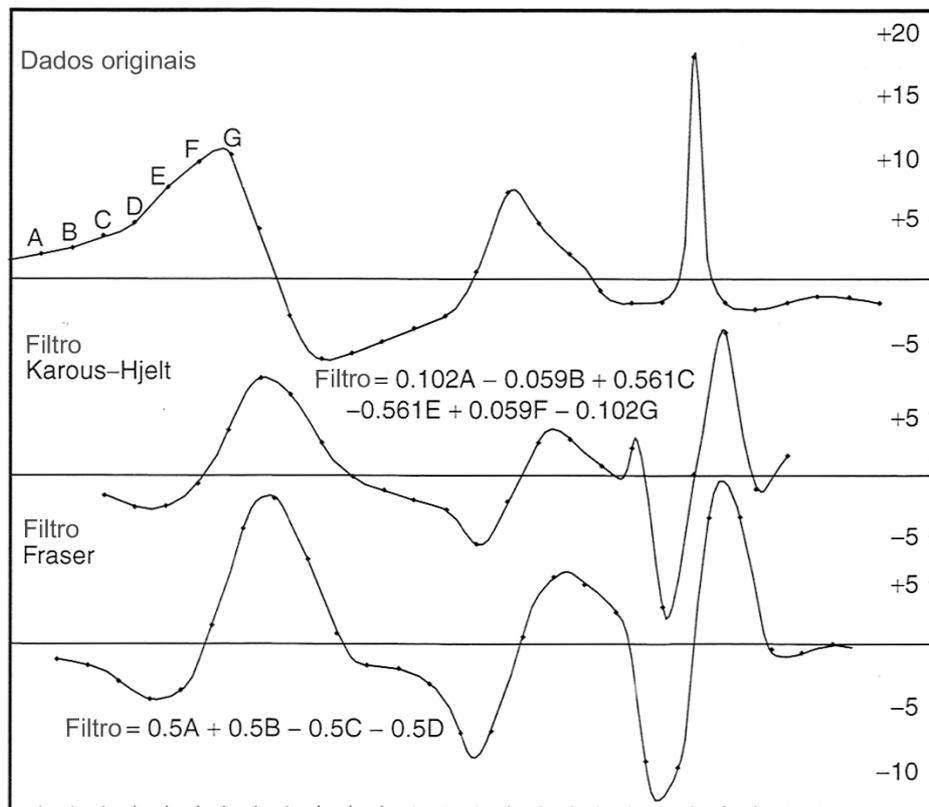


Figura 9 – Perfil de VLF e efeito dos filtros Karous-Hjelt e Fraser. Adaptado de Milson (2003).

A apresentação e a interpretação dos dados de VLF podem ser efectuadas através de perfis como os representados na Figura 9. Com perfis a diferentes profundidades podem construir-se pseudosecções, de modo a proporcionar uma perspectiva bidimensional da distribuição.

O método electromagnético de VLF constitui o estado da arte no que respeita à prospecção de águas subterrâneas em terrenos cristalinos fracturados. Apresenta como principais vantagens a simplicidade, a rapidez e a economia das operações no terreno. Além disso, normalmente não necessita de um emissor específico, já que existem potentes transmissores em muitas partes do globo capazes de enviar radiação electromagnética a distâncias da ordem dos milhares de quilómetros. Acresce que, os modernos equipamentos são de extrema portabilidade, o que favorece a aplicação do método, mesmo em locais de difícil acesso.

Como principais limitações do método EM-VLF podem referir-se: (i) a sensibilidade a interferências “culturais”, nomeadamente a existência de condutores aéreos ou subterrâneos; (ii) a influência da topografia, particularmente quando os perfis são efectuados transversalmente a vales; (iii) a eventual indisponibilidade de emissores em determinados locais ou a sua inadequação à orientação dos perfis; (iv) a influência das condições ionosféricas na transmissão da radiação electromagnética; (v) a limitação na interpretação dos dados, uma vez que em muitas situações terá de ser apenas de tipo qualitativo (Lima, 2009b).

3. Área de estudo

3.1. Localização

A área em estudo desenvolve-se à volta do Regato das Amoladouras, abrangendo uma boa parte da sua bacia de drenagem, desde as cabeceiras até à confluência com o Rio Coura, localizando-se nos concelhos de Vila Nova de Cerveira e Caminha, ambos pertencentes ao distrito de Viana do Castelo. Toda esta área está coberta pela folha nº 14 da Carta Militar de Portugal à escala 1/25 000. Trata-se de uma área alongada segundo a direcção NNE-SSW, seguindo a orientação do Regato das Amoladouras. Esta área inclui, ainda, uma porção do Rio Coura, uma vez que a orientação da rede hidrográfica sugere que tanto o Regato das Amoladouras, como parte do Rio Coura, junto à zona de confluência, estão condicionados por fracturação com a orientação NNE-SSW (Figura 10). As campanhas geofísicas (resistividade eléctrica e VLF) foram desenvolvidas nesta área de confluência das duas linhas de água.

3.2. Geomorfologia

A região de Caminha-Vila Nova de Cerveira, na qual se insere a área em estudo, é de natureza essencialmente montanhosa (Figura 10), tal como toda a região minhota. Situada na zona de encontro de três bacias hidrográficas, a do Minho, a do Lima e a do Âncora, atravessada longitudinalmente pelo rio Coura e sulcada pelos afluentes de todos estes rios, esta região é caracterizada por uma sucessão de relevos, alguns de certa imponentia, separados por vales estreitos e declivosos ou por pequenas depressões originadas por erosão diferencial (Teixeira, 1961).

Quer o Minho e o Lima, quer as partes terminais do Âncora e Coura, são rios cujo leito atingiu o perfil de equilíbrio, nesta região. O vale do Minho apresenta-se amplo e largo, embora com estreitamentos, como os de Lanhelas e Cerveira, e largas enseadas ou alvéolos originados por erosão diferencial. Contrariamente, o rio Coura, a partir de Argela e Vilar de Mouros, corre em vale estreito e encaixado, com relevos importantes de ambos os lados. É, sobretudo, na zona xistenta que o vale é mais apertado. Quanto aos afluentes deste rio, verifica-se que correm em leitos de perfis muito inclinados, cheios de rápidos e quedas (Teixeira, 1961).

Entre os rios Minho e Coura, rodeado pelas povoações de Lanhelas, Gondarém e Vilar de Mouros, destaca-se o monte de Góis, uma elevação granítica de vertentes íngremes, com uma altitude de 344 m (Figuras 10 e 11).

A rodear a região de Vila Nova de Cerveira existe um importante relevo granítico, disposto em arco de círculo. O seu ponto culminante encontra-se no Alto da Pena, a cerca de 638 m de altitude. Separados deste ponto por uma estreita faixa de xistos metamórficos, existem os cimos graníticos da Costa da Castanheira, que constituem a orla da mancha granítica de Covas. Na zona xistenta situada entre estes dois afloramentos graníticos existem alguns relevos que merecem destaque, tais como o de Penedos das Casinhas (390 m de altitude), situado entre o Sopo e o rio Coura e os Penedos da Castanheira (550 m de altitude) sobranceiros a Covas (Teixeira, 1961).

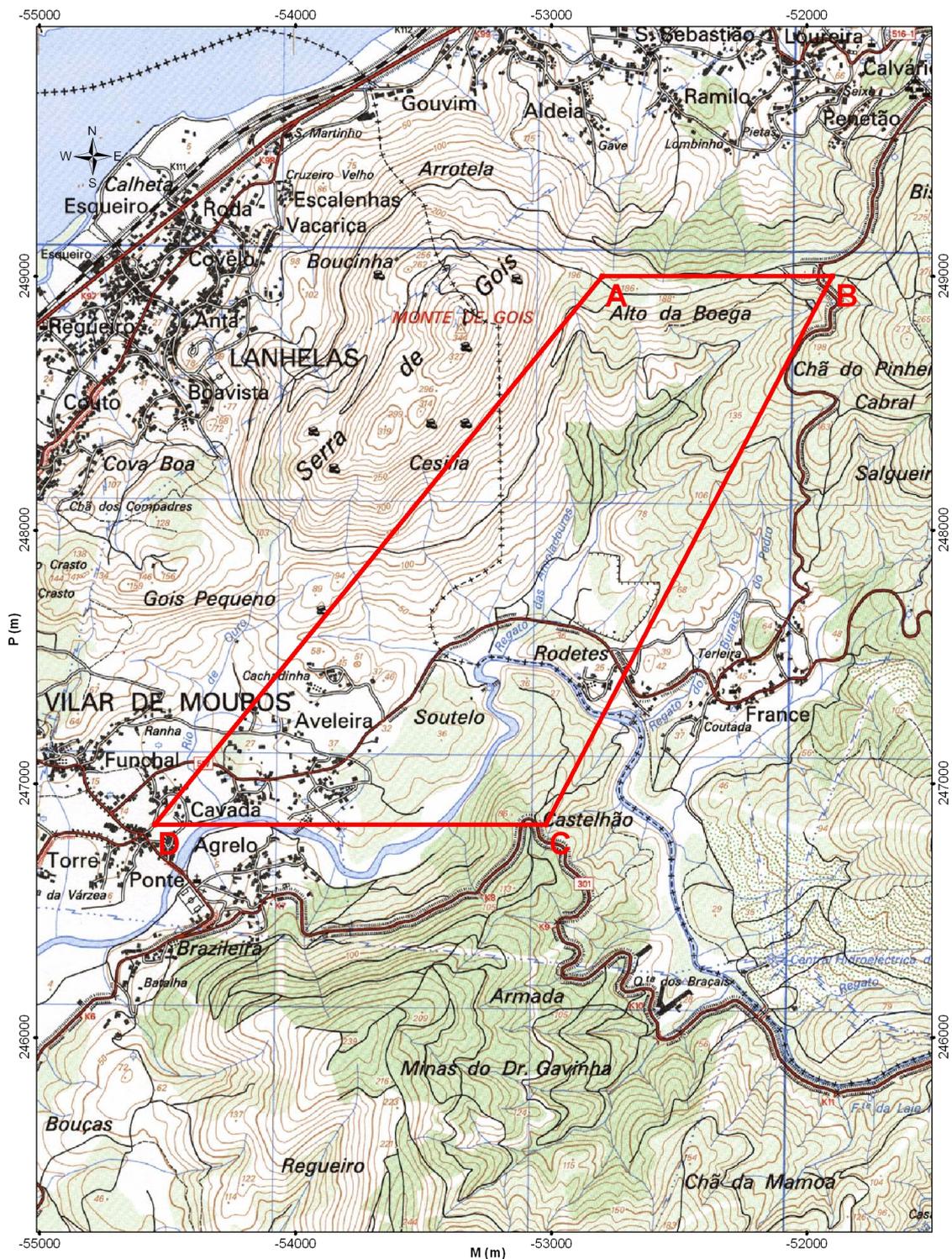


Figura 10 – Localização da área em estudo (polígono vermelho). Mapa adaptado da folha nº 14 da Carta Militar de Portugal à escala 1/25 000 (IGE, 1997).

De um modo geral, pode-se afirmar que o relevo da região de Caminha se deve, essencialmente, a diferenças de constituição geológica do terreno: numerosas zonas graníticas, no geral, constituem as maiores elevações; e terrenos xistentos, geralmente muito metamorfizados e alterados, sendo erodidos com facilidade, formam relevos de pouca importância. Em alguns casos, contudo, os xistos resistem à erosão, devido à existência de intercalações, tais como filões aplito-pegmatíticos.

A Figura 11 mostra uma reconstituição tridimensional da geomorfologia da região onde se insere a área de estudo. Nela se incluem as manchas correspondentes às litologias aflorantes, de acordo com Teixeira (1961).

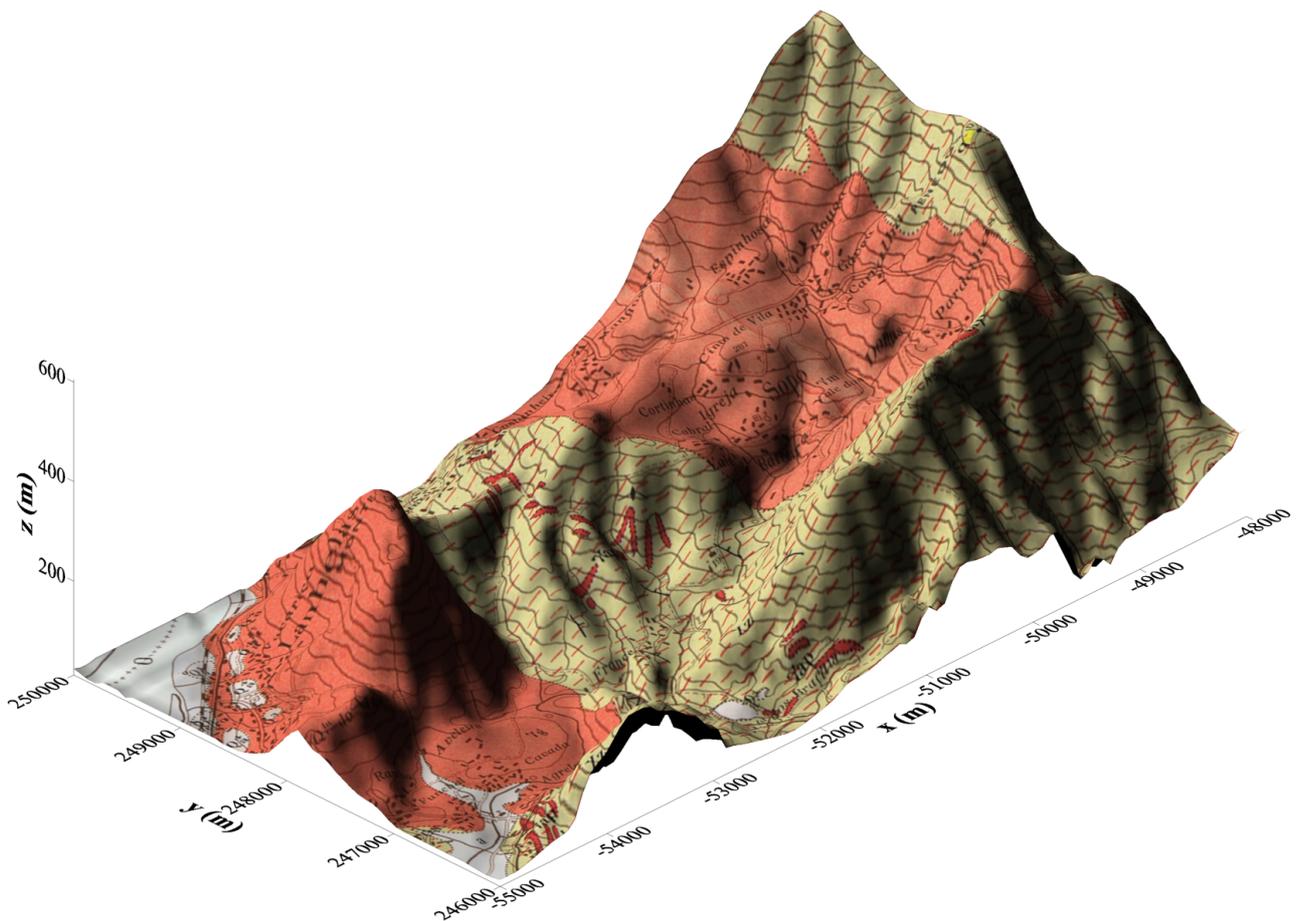


Figura 11 – Representação tridimensional da geomorfologia da região de Caminha-Vila Nova de Cerveira. Projeção ortográfica com rotação de 45° e inclinação de 30°. Referenciação Hayford-Gauss, datum 1973, ponto central. Base geológica extraída da Folha 1-C (Caminha) da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000 (Teixeira, 1961). A legenda litológica está representada na Figura 12.

3.3. Quadro geológico-estrutural

Como se referiu previamente, a região onde está inserida a área de estudo é dominada por rochas paleozoicas, embora possam ocorrer terrenos mais recentes correspondentes a depósitos atuais, do tipo siltoso e arenoso (Figuras 11 e 12). As rochas paleozoicas estão materializadas por xistos andaluzíticos e granitos.

Os xistos andaluzíticos, pertencentes à Unidade do Minho Central e Ocidental (Pereira, coord., 1992), apresentam-se bem desenvolvidos na área de Caminha, com uma direção preferencial NW-SE e inclinações para SW ou NE, conforme os casos. Geralmente, estes xistos são luzentes, com elevada quantidade de cristais de andaluzite (Teixeira, 1961).

As rochas graníticas, com duas micas ou só com biotite, apresentam texturas variadas, geralmente não porfiróides. Formam diferentes afloramentos na área de Caminha, com predomínio da fácies de grão grosseiro, apesar de serem frequentes as diferenciações de grão médio e fino. Na mancha do Monte de Góis, o afloramento granítico constitui uma elevação de forma cônica, sobranceira às povoações de Lanhelas e Vilar de Mouros, apresentando um contorno grosseiramente circular, rodeado por formações xistentas (Figuras 11 e 12). Aqui, a rocha é um granito de duas micas, de grão grosseiro, frequentemente com turmalina e concentrações biotíticas. A mancha de Gondarém e Sopo corresponde a um afloramento de granito de grão médio, com diferenciações na fácies textural (Teixeira, 1961).

Além dos granitos, afloram também numerosos filões aplito-pegmatíticos. Estes encontram-se encaixados nos xistos (apresentando, frequentemente, uma orientação concordante com a xistosidade), preferencialmente na periferia de alguns maciços graníticos, como ocorre na bordadura do Monte de Góis e em Gondarém e Sopo (Figuras 11 e 12). A maioria destes filões tem grande espessura e forma relevo no terreno. Os aplitos apresentam, muitas vezes, granadas, enquanto que os pegmatitos exibem grandes cristais de feldspato, quartzo, micas (geralmente, moscovite) e turmalina (Teixeira, 1961).

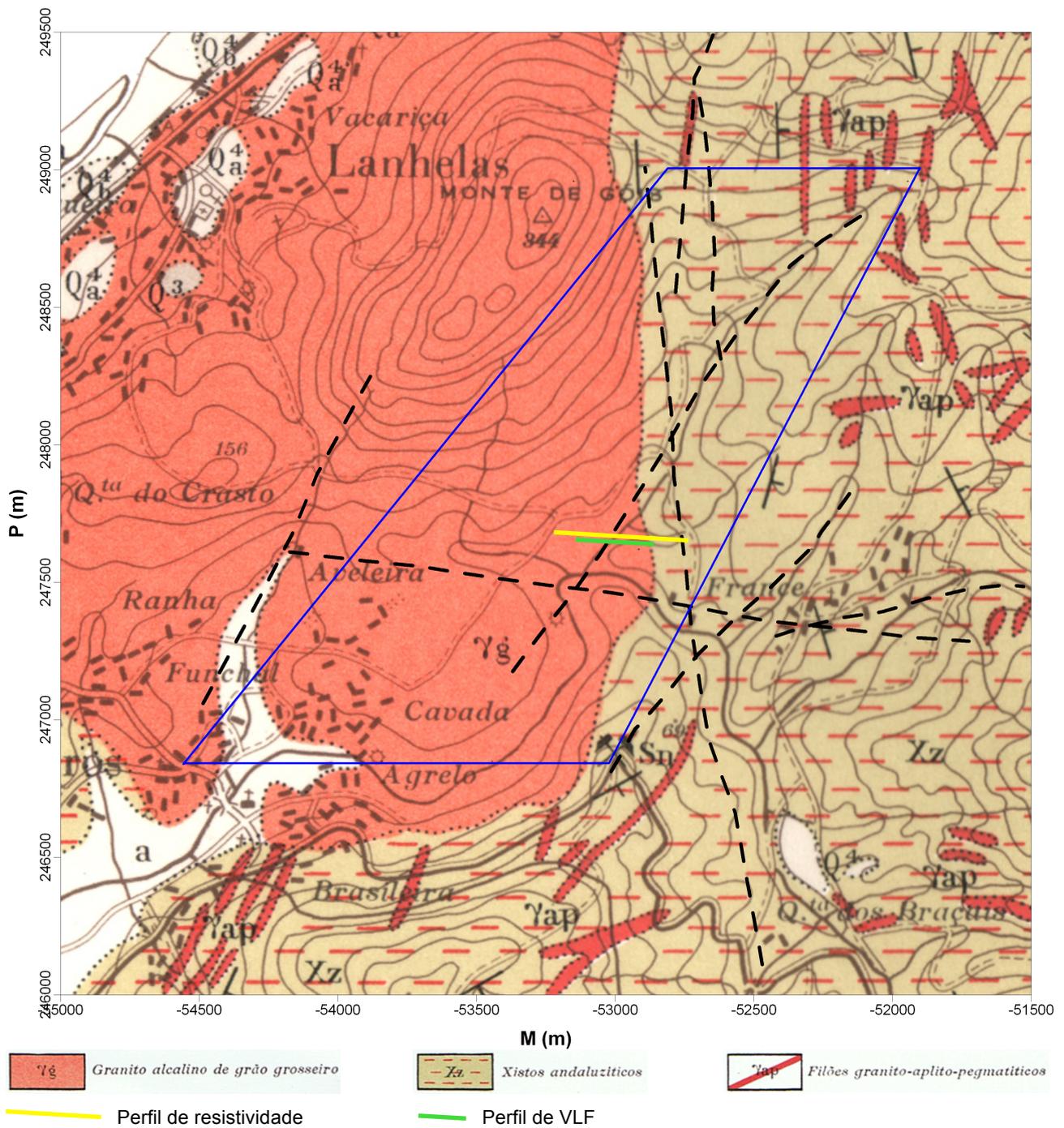


Figura 12 – Enquadramento geológico-estrutural da área de estudo. Estão assinalados os locais de realização dos perfis de resistividade e VLF. Mapa adaptado da folha 1-C (Caminha) da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000 (Teixeira, 1961).

O padrão de fracturação da área em estudo segue, em traços gerais, a arquitetura frágil regional, edificada nas fases tardias da orogenia varisca, mas sucessivamente reativada até à atualidade. Os principais alinhamentos estruturais orientam-se segundo a direção N-S a NNW-SSE, sendo também frequentes as orientações NE-SW e, mais raramente, as rupturas em torno da direção W-E. Como se referiu oportunamente, algumas das fracturas estão parcialmente cicatrizadas por filões aplito-pegmatíticos de espessura variável, como se observa, por exemplo, no sector setentrional da área cartografada na Figura 12.

Nas imediações da zona onde foram efectuados os perfis de resistividade eléctrica e VLF, ocorre a intersecção de diversas fracturas, incluindo a fractura submeridiana na vertente oriental do Monte de Góis, provavelmente associada ao contacto entre o granito e a formação metassedimentar (Figura 12).

4. Métodos e Equipamentos

Para além do reconhecimento geológico da área de estudo e da utilização de técnicas de detecção remota, foram aplicados dois métodos geofísicos: a resistividade eléctrica e o método electromagnético de muito baixa frequência (EM-VLF). A localização dos perfis realizados está assinalada na Figura 12.

4.1. Resistividade eléctrica

Para a aplicação do método da resistividade eléctrica foi usado um resistímetro ABEM SAS 1000 com sistema LUND acoplado, tendo sido adoptada uma combinação de dois protocolos baseados no dispositivo de Wenner: Wenner_L+Wenner-S. Tratando-se de um protocolo linear, a disposição dos eléctrodos foi efectuada segundo um perfil com a extensão de 400 m e com a orientação indicada na Figura 12.

A aplicação dos protocolos referidos requer a colocação dos eléctrodos da forma indicada na Figura 13. Consiste basicamente na disposição em linha, no terreno, de um conjunto de quarenta e um eléctrodos e quatro bobines (de 100 m cada), ligadas em série de acordo com a numeração. Nas duas bobines centrais (2 e 3) os eléctrodos são colocados de 5 em 5 metros, enquanto que nas restantes bobines (1 e 4) a distância entre eléctrodos é aumentada para 10 metros. Esta disposição dos eléctrodos é necessária para os protocolos Wenner_S (short) e Wenner_L (long), respectivamente. De forma a favorecer o contacto dos eléctrodos com o solo, foi colocada em redor dos eléctrodos uma mistura de argila com solução salina.

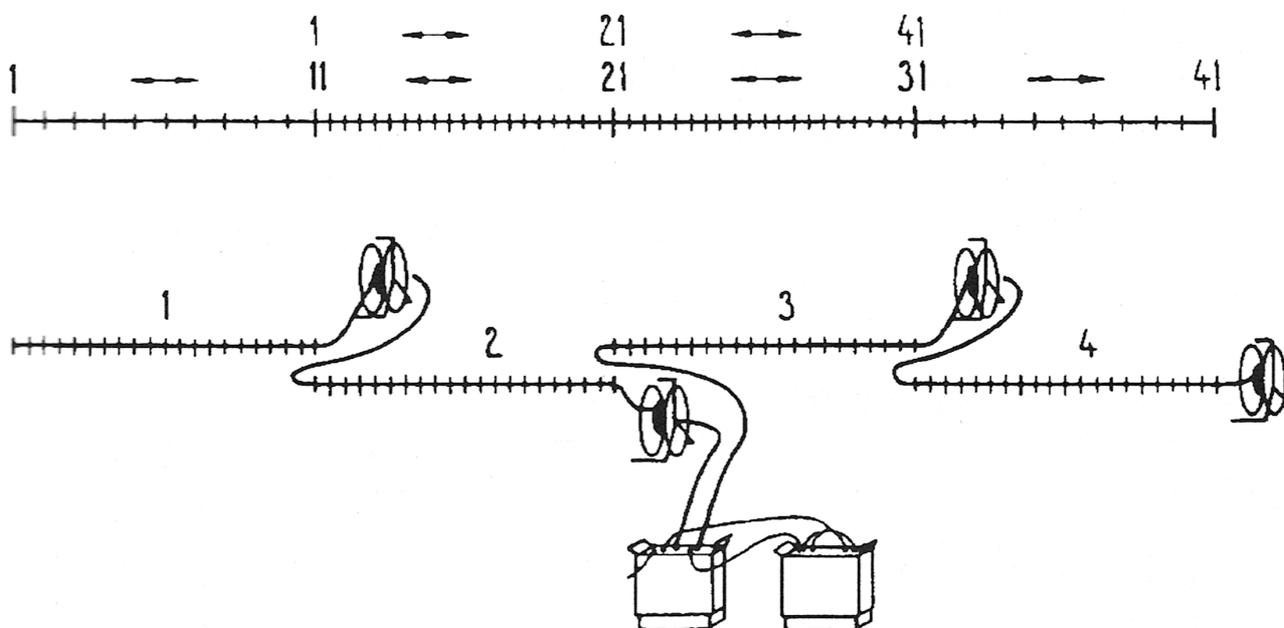


Figura 13 – Esquema representativo da disposição dos eléctrodos para aplicação dos protocolos Wenner_S e Wenner_L (extraído de ABEM, 2007).

Após instalação dos eléctrodos, foram introduzidos no resistímetro os diversos parâmetros de aquisição de dados. Os dados obtidos foram interpretados por modelação inversa, com recurso ao software RES2DINV.

4.2. EM-VLF

Para a aplicação do método EM-VLF foi utilizado o equipamento portátil ABEM Wadi, tendo sido efectuados dois perfis, com extensão de 220 m cada um e com intervalos de aquisição de 5 m. Os perfis foram realizados no local e com a orientação indicados na Figura 12. Os dois perfis seguiram a mesma direcção, mas foram realizados em sentidos opostos. Foi seleccionado o emissor DHO38 (Saterland, Alemanha), utilizado para comunicações submarinas a uma frequência de 23,4 kHz. Este emissor tem uma potência de 800 kW e um alcance de 1910 km. Dista 1745 km do local de realização do perfil segundo a direcção N39°E.

Para a interpretação dos dados foi utilizado o software Ramag VLF.

5. Resultados e discussão

5.1. Resistividade elétrica

Como referido anteriormente, os dados de resistividade obtidos em campo foram interpretados pelo software RES2DINV. Os resultados estão representados graficamente na Figura 14.

O modelo de inversão aplicado mostra a existência de três domínios com características distintas. Na parte inicial (oeste) ocorrem formações com valores de resistividade muito elevados (superiores a 5000 ohm.m), seguindo-se uma zona central menos resistiva (frequentemente inferior a 1000 ohm.m). Finalmente, o sector oriental é novamente caracterizado por valores de resistividade muito elevados, da ordem dos valores encontrados no sector ocidental. A adequação deste modelo geofísico à geologia local permite considerar que os domínios de alta resistividade deverão corresponder ao maciço granítico, enquanto o domínio de menor resistividade deverá estar associado à formação metassedimentar.

Na parte superficial da zona central ocorrem os mais baixos valores de resistividade, normalmente inferiores a 200 ohm.m (Figura 14 C). Esta pequena faixa (azul) deverá estar relacionada com a presença de uma zona húmida à volta do Regato das Amoladouras. A referida faixa é descontínua, sendo interrompida na parte central por um pequeno hiato de maior resistividade, associado ao próprio canal por onde corre a linha de água.

A configuração do modelo de resistividade sugere que o contacto ocidental entre o granito e a formação metassedimentar inclina para E (este). Por sua vez, o contacto litológico do sector oriental parece mais irregular. É provável que a mancha de elevada resistividade que ocorre neste sector não seja o resultado da presença de um maciço granítico tal como no sector ocidental, mas apenas de uma massa granito-aplito-pegmatítica subaflorante. De facto, como se pode observar na Figura 12, para este do maciço granítico do Monte de Góis, desenvolve-se uma extensa faixa xistenta, apenas interrompida por massas e filões de filiação granítica.

Admitindo que entre o maciço granítico (Monte de Góis) e o xisto se estabelece um contacto por falha (tal como evidenciado no mapa da Figura 12 e no modelo de resistividade da Figura 14 C), esta zona de contacto poderá mostrar-se como a mais indicada para a realização de sondagens mecânicas de pesquisa de água subterrânea. Dada a limitação da profundidade de investigação (aproximadamente 60 m), desconhece-se a geometria do contacto para além dos 60 m de profundidade. No entanto, a forma aflorante do maciço granítico do Monte de Góis sugere que o contacto deverá prolongar-se de acordo com a mesma orientação.

Não obstante os contrastes de resistividade elétrica identificados, os valores mais baixos na zona de contacto são ainda muito elevados, invariavelmente superiores a 1000 ohm.m. Valores desta ordem de grandeza não são muito promissores no que respeita à ocorrência de grandes massas de água subterrânea. Contudo, importa referir que as águas subterrâneas da região se caracterizam por mineralizações muito baixas, apresentando um valor médio de condutividade eléctrica de 55 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ou seja, possuem uma resistividade de, aproximadamente, 180 ohm.m. Além disso, estarão associadas a estruturas (falhas e outras fracturas) de pequena espessura, pelo que, os dois aspectos em conjunto, conduzem à produção de anomalias de difícil identificação. Portanto, o facto antes referido não retira, por si, potencial hidrogeológico à área estudada, em particular à zona de contacto que, como se disse, deverá constituir a zona mais promissora. Do exposto, é ainda possível prever que, a existir em quantidade explorável, a água subterrânea deverá apresentar uma mineralização total muito baixa, consistente, aliás, com o padrão hidroquímico regional e com a tipologia das formações geológicas.

5.2. EM-VLF

Como referido previamente, os dados obtidos nos perfis de VLF efectuados em campo foram interpretados com recurso ao software Ramag VLF, estando os respectivos resultados representados na Figura 15. De salientar, desde já, que a extensão de cada um dos perfis (220 m) é inferior à do perfil de resistividade elétrica (400 m). Acresce que as extremidades dos perfis de VLF não coincidem com o início ou o fim do perfil de resistividade. No entanto, o ponto central é praticamente comum (Figuras 14 e 15).

O perfil 1500 (Figura 15 A), realizado no sentido W-E, mostra uma zona inicial de elevada densidade de corrente, seguindo-se uma zona de menor densidade (Figura 15 A). A primeira parece inclinar para oeste, denotando a presença de uma falha com a mesma inclinação, mas contrariando a interpretação do modelo de resistividade elétrica (Figura 14 C), de acordo com a qual, o contacto por falha inclina para este. Considerando que o método de VLF é mais sensível a estruturas verticais ou muito inclinadas e menos sensível a variações litológicas, admite-se que a anomalia presente na pseudosecção relativa ao perfil 1500 (Figura 15 A) não seja devida ao contacto entre o granito e o xisto, mas antes à fractura NE-SW onde se instalou o Regato das Amoladouras (Figura 12).

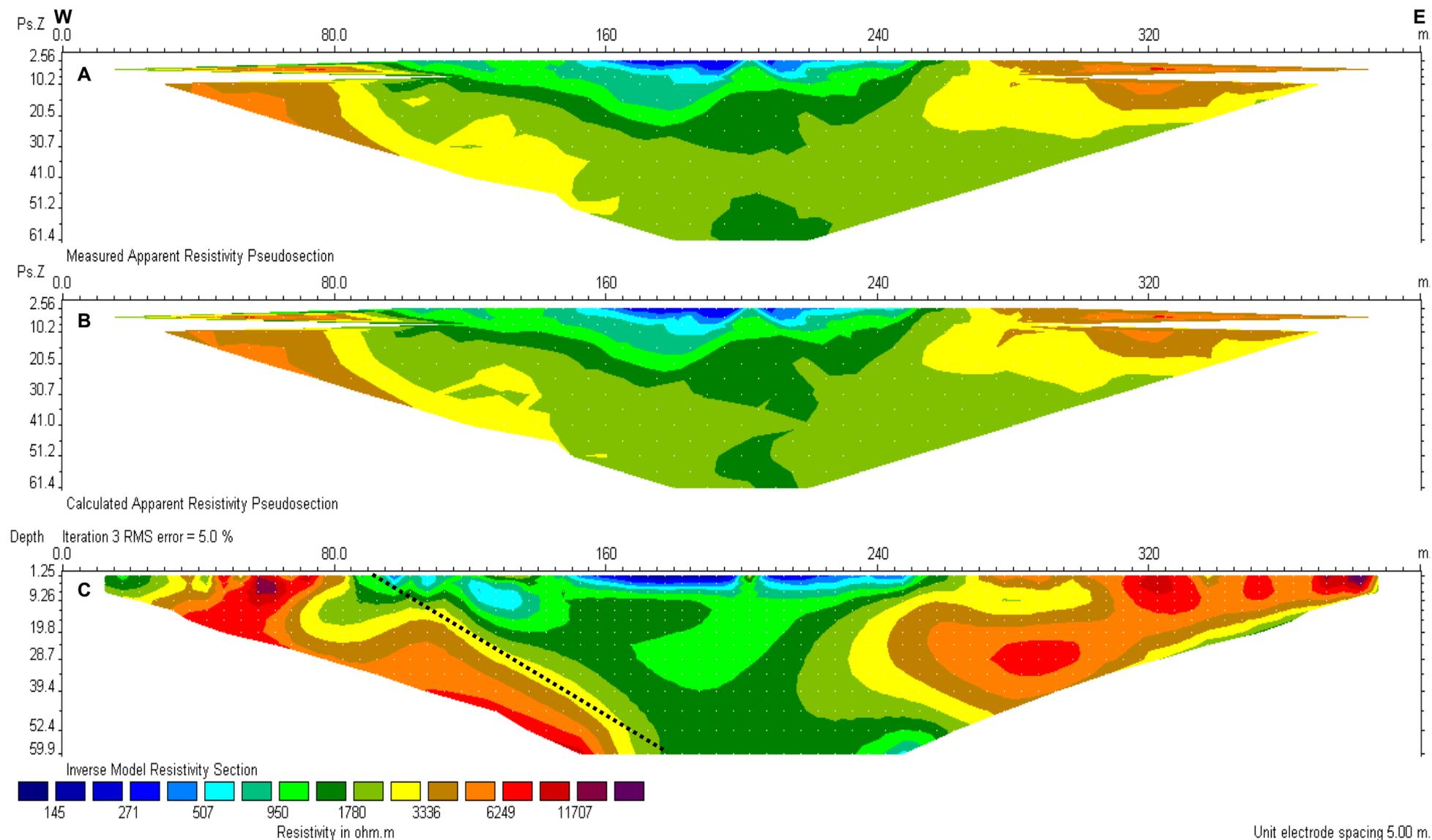


Figura 14 – Modelação inversa dos dados de resistividade elétrica relativos ao perfil de resistividade obtida com o software RES2DINV. **A** - pseudosecção de resistividade aparente medida; **B** - pseudosecção de resistividade aparente calculada; **C** - modelo de inversão da secção de resistividade. A linha pontuada representa a falha provável associada ao contacto entre o granito e o metassedimento.

A zona de menor densidade de corrente que ocorre no perfil 1500 a partir dos 130 m é concordante com os dados expressos no modelo de resistividade elétrica. De facto, a provável massa granito-aplito-pegmatítica revelada no perfil de resistividade elétrica (Figura 14 C), tem uma geometria compatível com a configuração da anomalia negativa do perfil de VLF (Figura 15 A).

O contacto entre o maciço granítico e a formação metassedimentar deverá estar relacionado com a variação do sinal da anomalia. Assim, embora de forma algo irregular, observa-se que tal variação apresenta uma inclinação tendencialmente para este, o que está de acordo com os dados de resistividade elétrica (Figura 14 C). Como tal, admite-se que o perfil de VLF 1500 põs em destaque, não só a zona de contacto entre as diferentes formações geológicas mas, sobretudo, a falha de direção NE-SW, onde está instalado o Regato das Amoladuras (Figura 12), deduzindo-se que esta fractura apresenta inclinação para oeste.

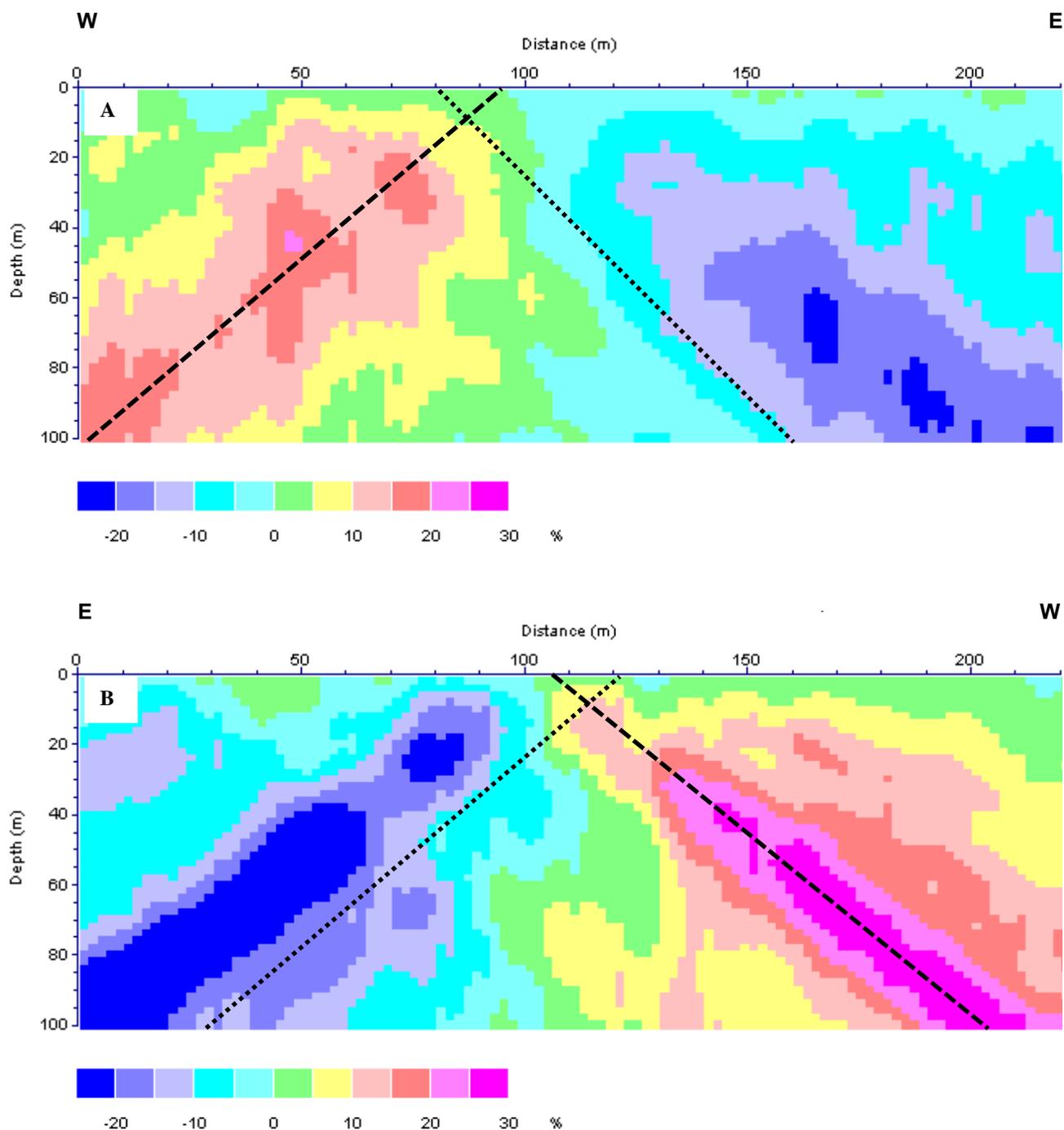


Figura 15 – Secções de densidade aparente de corrente relativas aos perfis de VLF realizados: **A** – perfil 1500; **B** - perfil 1600. As linhas a traço descontinuo representam falhas prováveis; as linhas ponteadas representam a possível falha associada ao contacto entre o granito e o xisto.

O perfil 1600 (Figura 15 B), realizado no sentido E-W, apresenta um padrão de distribuição da densidade simétrico em relação ao do perfil 1500, sendo, portanto, compatíveis entre si (Figura 15 A), o que corrobora as interpretações anteriormente aduzidas. Assim, a mancha de maior densidade de corrente surge na parte final do perfil 1600, com uma inclinação semelhante à observada no perfil 1500, embora a anomalia seja mais significativa no perfil 1600.

Em função do exposto, parece poder admitir-se que o sector oeste da zona estudada se apresenta mais promissor em relação ao propósito do estudo, isto é, a identificação de estruturas de baixa resistividade, potencialmente com interesse hidrogeológico.

6. Conclusões

No sentido de seleccionar locais para a realização de sondagens mecânicas no âmbito de um programa de prospecção e pesquisa de águas minerais naturais numa área pertencente aos concelhos de Caminha e Vila Nova de Cerveira (NW de Portugal), foi efectuado um estudo hidrogeológico, envolvendo a aplicação de métodos geofísicos, nomeadamente, a resistividade elétrica e o método eletromagnético de VLF.

A topografia da região constituiu um óbice à aplicação daqueles métodos, em particular ao VLF, pela sua maior sensibilidade a este tipo de interferência. Como tal, a aplicação dos métodos restringiu-se a uma área muito limitada, junto ao contacto entre o granito e a formação metassedimentar (Figura 12). Por isso, algumas estruturas geológicas previamente identificadas através de técnicas de detecção remota, não puderam ser confirmadas e caracterizadas pelos métodos geofísicos.

Não obstante as limitações referidas, a interpretação dos resultados obtidos pôs em evidência a existência de áreas mais condutivas e, portanto, com maior potencial hidrogeológico. Estas áreas situam-se junto ao contacto entre o maciço granito do Monte de Góis e o xisto encaixante. Do ponto de vista hidrogeológico, admite-se que este contacto pode funcionar como uma barreira hidráulica à água subterrânea infiltrada na bacia hidrográfica do Regato das Amoladuras ou em áreas mais longínquas, constituindo também a principal estrutura do escoamento subterrâneo. Como tal, as sondagens mecânicas deverão ser realizadas nas imediações deste contacto, a uma distância compatível com a profundidade a que se pretende intersectar a estrutura hidrogeológica principal. Considerando que se pretende explorar uma água com características compatíveis com a sua qualificação como água mineral natural, sugere-se que as sondagens de pesquisa e eventuais captações sejam realizadas de forma a que a principal estrutura seja intersectada a profundidades não inferiores a 100 m.

Finalmente, importa salientar que, não obstante as limitações intrínsecas dos métodos utilizados e os condicionalismos externos, foi possível identificar áreas potencialmente mais promissoras no que respeita à eventual captação e exploração de água mineral natural.

Referências Bibliográficas

- ABEM (1989) – *Theory, Practice and Case Stories for WADI Operators. ABEM WADI VLF Instrument. Interpretation Guide*. ABEM AB, Sweden, 36 p.
- ABEM (2007) – *Intruction Manual: Terrameter SAS 1000/4000*. Sweden, 135 p.
- Associação Portuguesa dos Industrias de Águas Minerais Naturais e de Nascente (2011). Documento disponível em <http://www.apiam.pt/default.aspx?Menu=OSector&SubMenu=NosContamos>.
- Custodio, E.; Llamas, M. R. (1983) – *Hidrología Subterránea*. 2ª ed., Ed. Omega, 2 vols., 2350 p.
- Direcção-Geral de Energia e Geologia (2011) – Gráfico de Produção de Águas Engarrafadas no Decénio 2000-2009. Documento disponível em <http://www.dgge.pt/>.
- Graça, H. ; Mota, R. (2002) - *Tomografias Geoeléctricas de Superfície*. Prospecção, Pesquisa e Captação de Águas Minerais Naturais, Recursos Geotérmicos e Águas de Nascente. IGM. Versão *Online* no site do INETI: http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/prosp_pesq/indice.htm

- Instituto Geográfico do Exército (1997) – *Carta Militar de Portugal à Escala 1/25 000. Folha nº 14. Série M 888.*
- Kearey, P.; Brooks, M.; Hill, I. (2002) – *An Introduction to Geophysical Exploration.* Blackwell Publishing, Oxford, 262 p.
- Lima, A. S. (2009a) – Prospecção Hidrogeológica por EM-VLF: caso de estudo no Palmarejo, Praia, Cabo Verde. In: *Comunicações do 9º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*, Benguela, Angola, 28-30 de Outubro. Publicação em formato digital.
- Lima, A. S. (2009b) – Possibilidades e Limitações do Método EM-VLF em Prospecção Hidrogeológica em Terrenos Vulcânicos: Caso de Estudo no Palmarejo, Praia, Cabo Verde. In: *Comunicações do 1º Simpósio Nacional dos Recursos Hídricos de Cabo Verde*. Praia, Cabo Verde, 16-17 de Julho. Publicação em formato digital.
- Lobarinhas, D.; Gomes, R.; Lima, A.; Silva, J. (2011) - Determinação da interface água doce/água salgada no litoral de Viana do Castelo (NW de Portugal) com recurso ao método da resistividade eléctrica. In: *Resumos do VI Congresso Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*. Ilha da Boavista, Cabo Verde, 6-8 de Abril. Publicação em formato digital.
- Martínez, J.; Ruano, P. (1998) – *Aguas Subterráneas. Captación y Aprovechamiento.* 1ª ed., PROGENSA, 408 p.
- Milson, J. (2003) – *Field Geophysics.* Wiley, Chichester, 232 p.
- Nath, S. K.; Patra, H. P.; Shahid, S. (2000) – *Geophysical Prospecting for Groundwater.* A.A. Balkema, Rotterdam, 256 p.
- Pereira, E. (coord.) (1992) – *Carta Geológica de Portugal à Escala 1/200 000. Notícia Explicativa da Folha 1.* Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 83p.
- Rocha, R.; Ramalho, E.; Paralta, E.; Afonso, A. (2003) – *Métodos geofísicos aplicados à prospecção de águas subterrâneas em rochas cristalinas do Alentejo – vantagens e limitações.* Ciências da Terra (UNL), Lisboa, nº especial, CD-ROM, D73-D76.
- Teixeira, C. (1961) – *Carta Geológica de Portugal à Escala 1/50 000, Folha 1-C (Caminha).* Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 41p.