

Prospecção geofísica aplicada à detecção de falhas activas – a falha de Vila Franca de Xira

J. Casacão^{1,*}, R. J. Oliveira², B. Caldeira², J. F. Borges² & J. Carvalho³

¹Centro de Geofísica de Évora, Colégio Luís António Verney, Rua Romão Ramalho 59, 7000 Évora; jcasacao@uevora.pt;

²Departamento de Física, Universidade de Évora, Colégio Luís António Verney, Rua Romão Ramalho 59, 7002-554 Évora;

³Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Estrada da Portela-Zambujal, Alfragide, Apartado 7686, 2610-999 Amadora;

*autor correspondente.

Resumo

A falha de Vila Franca de Xira é considerada como a mais provável fonte de sismos destrutivos que afectaram a região de Lisboa. Contudo, devido às altas taxas de erosão/sedimentação no Vale Inferior do Tejo (VIT), as evidências superficiais de deformações cossísmicas nos sedimentos Holocénicos rapidamente são apagadas. Estudos recentes mostram indícios do traçado desta falha sob a cobertura aluvionar e de deformações subsuperficiais a ela associadas. O objectivo deste trabalho é, através de métodos geofísicos, complementar esses estudos e verificar, se possível, se esta falha atingiu os primeiros metros da subsuperfície para, assim, contribuir para um modelo de análise de perigosidade e risco sísmico no VIT. A realização de um perfil de sísmica de reflexão de ondas P deu, inicialmente, a indicação da existência de quatro discontinuidades em profundidade, interpretadas como prováveis falhas. Para confirmar as suspeitas foram realizados, sobre esses locais específicos, perfis de georadar (com antenas de 200 MHz e 400 MHz) e tomografia de resistividade eléctrica. A interpretação dos perfis obtidos revela vários deslocamentos verticais, correspondendo aos traçados de falhas propostos em trabalhos anteriores.

Palavras-chave: Falhas activas; sísmica de reflexão; georadar; tomografia eléctrica; Vale Inferior do Tejo.

Abstract

The Vila Franca de Xira fault is considered to be the most probable source of several destructive earthquakes that affected the Lisbon area. However, there is no evidence of surface faulting in the Holocene sediments of the Lower Tagus Valley (LTV) due to low tectonic activity and high erosion/sedimentation rates. The main goal of this work is, using geophysical methods, to complement recent studies and verify how close the fault approached the subsurface, thus contributing for the seismic hazard model assessment in the LTV. The initial P-wave seismic reflection survey indicated four discontinuities, interpreted as possible faults, and for this reason ground-penetrating radar (200 MHz and 400 MHz antennas) and electrical tomography surveys were conducted on those specific locations. Several vertical displacements were observed, matching the theoretical fault traces proposed in previous studies.

Keywords

Active faults, seismic reflection; ground-penetrating radar; electrical tomography; Lower Tagus Valley.

1. Introdução

Os registos históricos da região de Lisboa apresentam sucessivas referências a sismos violentos, com elevados danos materiais e perda de vidas humanas. Actualmente sabe-se que o Vale Inferior do Tejo (VIT) alberga as falhas activas onde se produziram alguns desses sismos, nomeadamente os de 1909 (Teves, 1999) e 1531 (Justo, 1998), com magnitudes variando entre 6,0 a 7,0 na escala de Richter. O período de retorno médio estimado para a falha de Vila Franca

de Xira, para sismos com ruptura média de 0,7 m, é da ordem de 5000 anos, para magnitudes compreendidas entre 6 e 7 (Carvalho *et al.*, 2006). Actualmente, a localização exacta da(s) fonte(s) sismogénica(s) do VIT ainda está em discussão na comunidade académica.

A repetição de um evento semelhante teria efeitos devastadores. Para além da elevada densidade populacional, a região está edificada sobre uma bacia sedimentar de dimensão suficiente para produzir a amplificação das ondas sísmicas e, conseqüentemente, dilatar o efeito dos sismos.

A caracterização das fontes sismogénicas implica o reconhecimento das falhas activas que geram sismicidade, e constitui uma tarefa essencial para o estudo do modelo de evolução tectónica regional e avaliação do risco sísmico. Este trabalho de prospecção geofísica é parte integrante do projecto de paleosismicidade ATESTA, que tem como objectivo localizar e caracterizar falhas activas aflorantes do VIT.

A área de estudo localiza-se junto à localidade de Vila Franca de Xira, na bacia Cenozóica do Baixo Tejo, 25 km a norte de Lisboa (Fig. 1). Do ponto de vista tectónico, faz parte da zona de falha Ota-Vila Franca de Xira-Lisboa-Sesimbra (Carvalho *et al.*, 2008). Há evidência que a falha de Vila Franca de Xira esteve activa ao longo do Holocénico (Ghose *et al.*, 2013), sendo a mais provável fonte do sismo catastrófico de 1531. A falha aflora em sedimentos Miocénicos, não existindo registo de falhas nos sedimentos holocénicos na zona do VIT. A baixa taxa de deslizamento (estimada em <1 mm/ano) que corresponde a baixo grau de actividade tectónica, e a alta taxa de sedimentação/erosão (com influência local de terrenos agrícolas remobilizados) são responsáveis pela inexistência de afloramentos geológicos na zona.

A região foi sujeita a vários estudos geofísicos desde a década de 50, para efeitos de exploração de hidrocarbonetos. Os perfis de sísmica de reflexão adquiridos para a prospecção de hidrocarbonetos indiciam grandes deformações geológicas em profundidade, mas a falta de resolução devido aos parâmetros de aquisição não permite verificar se a falha afecta os sedimentos Holocénicos.

Os ensaios geofísicos a baixa profundidade têm a faculdade de quantificar com precisão variações de parâmetros físicos do solo. Por esse facto têm vindo a ser aceites como apropriados para a detecção de estruturas geológicas (Demanet *et al.*, 2001; Meghraoui *et al.*, 2001; Slater & Niemi, 2003; Yalçiner *et al.*, 2013; Nguyen *et al.*, 2005). Segundo estes autores, a resistividade eléctrica, métodos electromagnéticos, sísmica de reflexão e georadar são os métodos mais apropriados para atingir este fim específico.

Tomando como base toda a informação disponível sobre a região, materializada nos registos geofísicos disponíveis, na sismicidade histórica e instrumental e no registo geológico, as equipas do Centro de Geofísica de Évora (CGE) e do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) decidiram utilizar métodos geofísicos de alta reso-

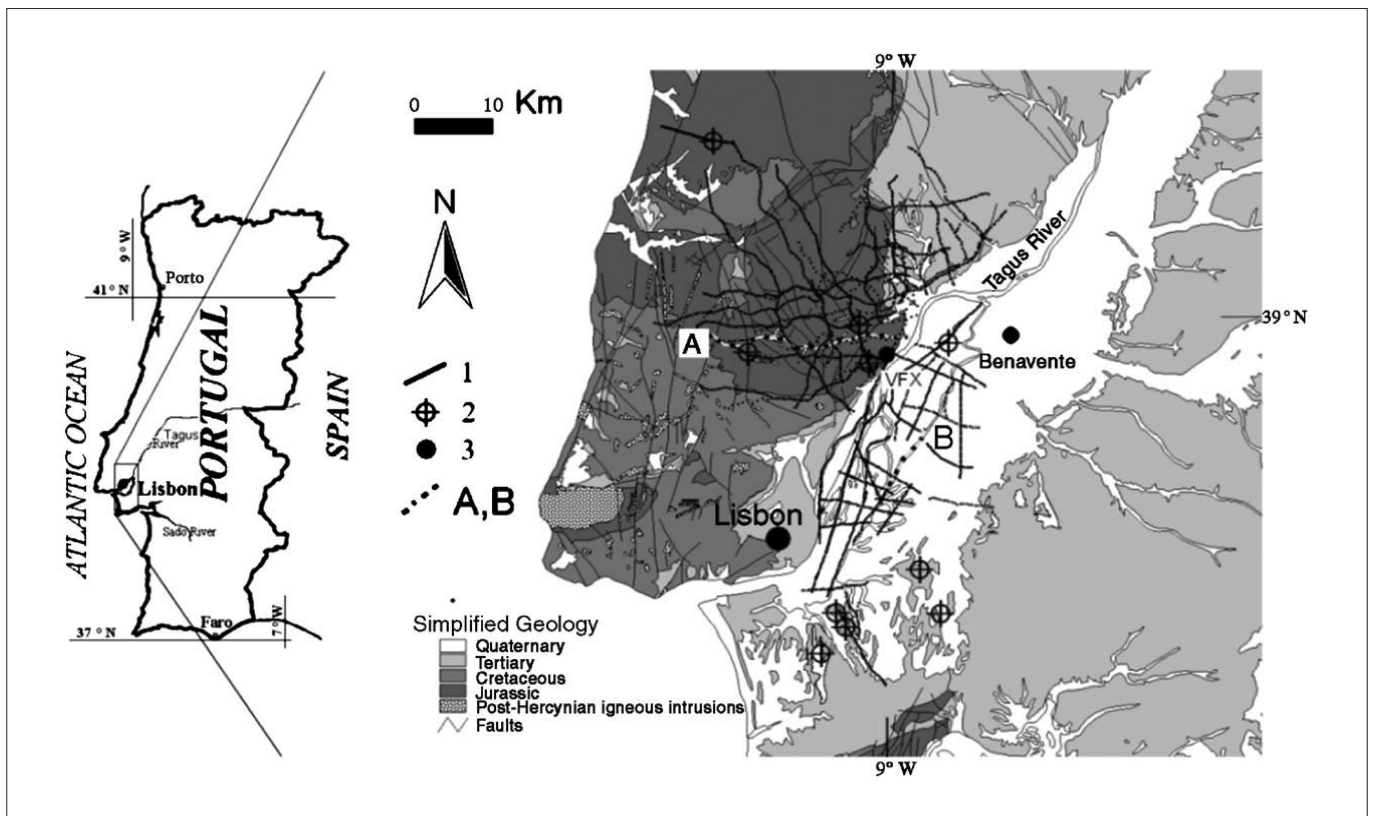


Figura 1 – Enquadramento geológico da bacia Cenozóica do Vale Inferior do Tejo (adaptado de Carvalho *et al.*, 2006).
Figure 1 – Geological framework of the Cenozoic Lower Tagus Valley basin (adapted from Carvalho *et al.*, 2006).

lução, como a sísmica de reflexão, tomografia de resistividade eléctrica e georadar (*ground-penetrating radar – GPR*) para a identificação de traços de falha sob a cobertura aluvionar, originados através de actividade tectónica recente.

2. Ensaios geofísicos no Vale Inferior do Tejo

Tem sido demonstrado por Carvalho *et al.* (2012), que o método da sísmica de reflexão garante uma interpretação fiável da estrutura geológica. A execução inicial do perfil de sísmica de reflexão e a sua posterior interpretação, forneceu a indicação de quatro potenciais segmentos de falha que se aproximam da superfície.

Tendo em conta esta informação foram então aplicadas as técnicas de georadar e tomografia eléc-

trica ao longo de todo o perfil de sísmica, com especial atenção nos quatro locais especificados. Desta forma, foi possível produzir uma interpretação geológica, a baixa profundidade.

2.1 Georadar (*ground-penetrating radar*)

Esta técnica funciona por emissão de sequências de impulsos electromagnéticos (EM) para o solo, que após reflectidos em cada contraste físico (ex.: solo/litologia), emergem e são registados. O processamento destes registos redonda em figuras (radargramas) passíveis de interpretação geológica. Foram realizados ensaios com antenas de 100, 200 e 400 MHz de forma a garantir resoluções e profundidades diferentes, ao longo dos locais de interesse (A – D) definidos no perfil de sísmica de

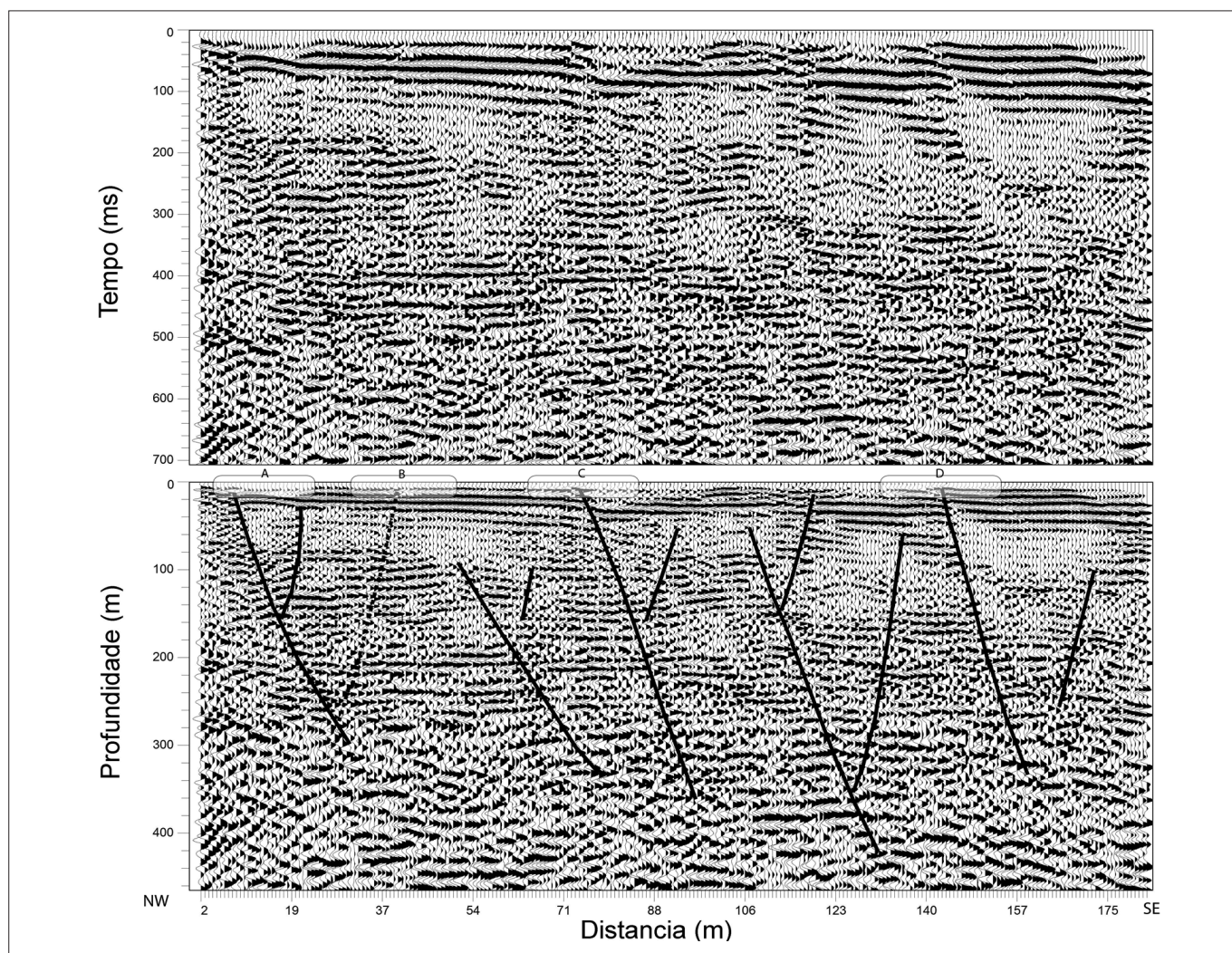


Figura 2 – Secção sísmica migrada no tempo (topo) e conversão para profundidades usando uma função de velocidades 1D a partir das velocidades de processamento, com interpretação das principais falhas sobreposta (fundo). Estão definidas quatro zonas de interesse, marcadas de A – D .

Figure 2 – Time migrated seismic section (top) and depth conversion using a 1D speed function derived from processing speeds, with interpretation of the main overlay problems (bottom). Four interest zones are defined, labeled A to D.

reflexão. Desde logo, foi possível observar que os perfis 2D resultantes do varrimento (*array*) com a antena de 100 MHz não foram claros, tendo sido descartada a utilização desta antena. Após a obtenção dos dados georadar no campo, foi necessário realizar processamento através de *software* RADAN e do *plugin* matGPR para MATLAB, daqui resultando vários radargramas.

2.2 Tomografia de resistividade eléctrica

Este método consiste na injeção de corrente eléctrica no solo por dois eléctrodos de corrente e na posterior leitura da diferença de potencial entre outros dois eléctrodos. Através da corrente (I) e diferença de potencial (V), é possível calcular a resistividade aparente. Utilizando o *software* Res2DInv procedeu-se à inversão dos dados, de forma a obter

o perfil 2D final. De todos os tipos de varrimento (*array*) disponíveis no equipamento PASI I6G-N foi escolhido o Dipolo-Dipolo, visto ser um bom método para identificar estruturas verticais como cavidades e falhas geológicas, tendo ainda uma boa resolução horizontal. O perfil resultante foi realizado na zona B (Fig. 3), que tem um comprimento de 46,5 m e profundidade máxima de 5,0 m.

3. Resultados

Após o processamento dos dados de campo de georadar e de tomografia eléctrica são apresentados os resultados sob a forma de perfis 2D.

Os radargramas revelam algumas deformações e descontinuidades, que podem relacionar-se com potenciais falhas geológicas, correspondentes a deslocamentos sub-verticais abruptos. Algumas destas

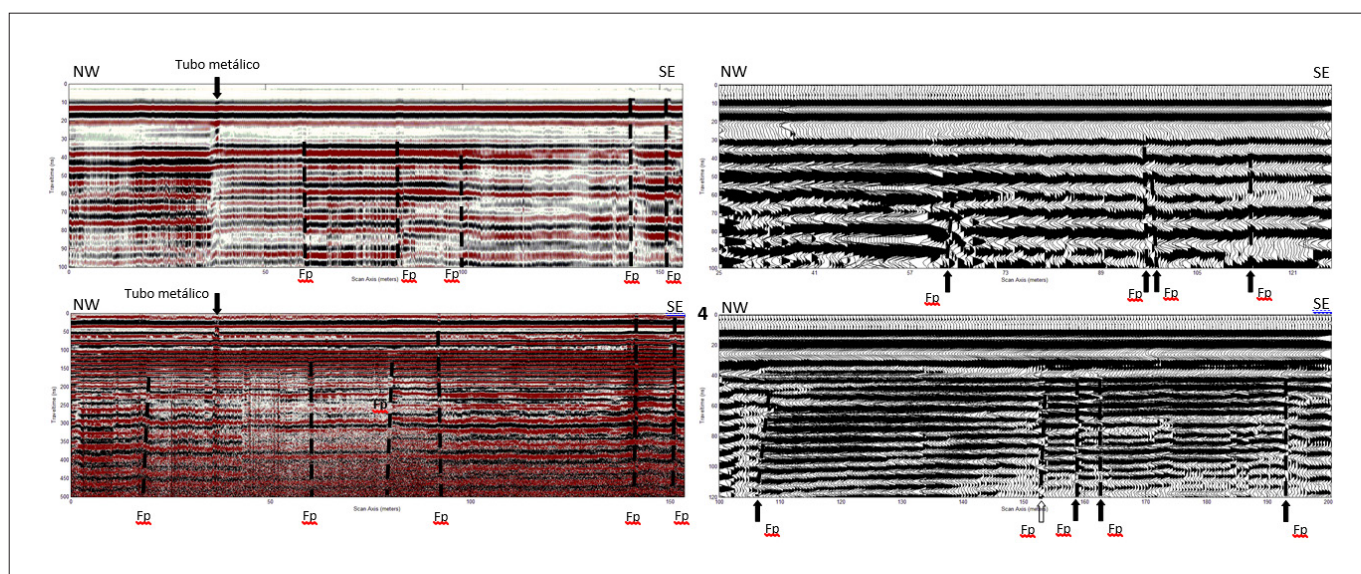


Figura 3 – Radargramas interpretados, obtidos após processamento dos dados de campo. a) Antena 200 MHz (modo distância); b) Antena 100 MHz (modo distância); c) Antena 200 MHz (modo ponto – wiggle); d) Antena 200 MHz (modo ponto – wiggle). Fp – Falha provável.

Figure 3 – Interpreted radargrams, obtained after the field data processing. a) Antenna 200 MHz (distance mode); b) 100 MHz antenna (distance mode); c) 200 MHz antenna (point mode - wiggle); d) Antenna 200 MHz (point mode - wiggle). Fp – Probable fault.

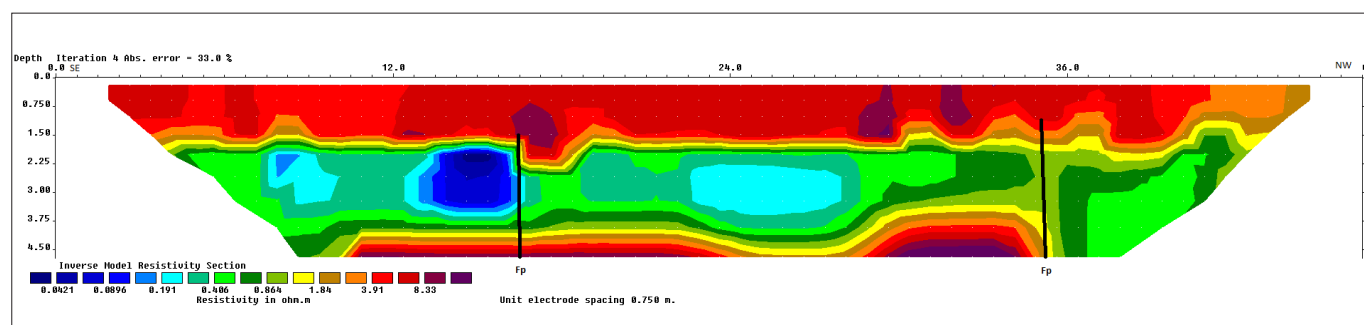


Figura 4 – Secção interpretada de tomografia de resistividade eléctrica, usando o *array* Dipolo-Dipolo. Fp – Falha provável.

Figure 4 – Electrical resistivity tomography section interpreted using the dipole-dipole array. Fp – Probable fault.

deformações têm expressão mais profunda (como sugere a sísmica de reflexão) e terminam junto à superfície. No perfil de tomografia eléctrica surgiram valores de resistividade baixa ($<10 \Omega \text{ m}$), típicos de solos areno-argilosos. Embora o perfil apresente diferenças de valores de resistividade, não parece haver disparidades significativas que indiquem com clareza deformações sub-verticais, semelhantes às que foram observadas nos radargramas de GPR. Apesar disto, as poucas variações existentes têm correspondência com deslocamentos verticais observados no perfil de sísmica de reflexão de ondas P.

Em geral, ficou demonstrado o bom resultado das campanhas de sísmica de reflexão de ondas P, que constituíram a base de trabalho, e que serviram para orientar os restantes métodos geofísicos de forma a investigar detalhadamente as áreas de interesse seleccionadas. Concluiu-se que o georadar ofereceu melhores resultados para este caso específico de detecção de segmentos de falhas activas. É, ao mesmo tempo, o que apresenta melhor resolução, e onde é possível observar a horizontalidade dos reflectores a baixa profundidade, que correspondem às estratificações típicas de deposição sedimentar em regime de baixa energia. Esta disposição horizontal permite, também, denotar com maior clareza as interrupções verticais entre os reflectores, deslocamentos aqui interpretados como falhas geológicas.

Numa fase posterior, serão abertas trincheiras ao longo destes perfis geofísicos. Este processo terá como objectivo confirmar a existência das falhas e caracterizá-las, medindo o rejeito co-sísmico, recolhendo amostras para determinar as suas datações absolutas e comparando os dados geofísicos com o registo dos logs das paredes das trincheiras. Confirmando-se a existência de falhas nestes sectores, a sua caracterização detalhada irá contribuir significativamente para o estudo da avaliação da perigosidade e, posteriormente do risco sísmico na região do VIT.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia, por financiar o projecto ATESTA (PTDC/CTE-GIX/099540/2008). Agradecemos também ao colaborador do Centro de Geofísica de Évora, Samuel Neves o seu contributo, em especial no decurso do trabalho de campo realizado, ao proprietário dos terrenos onde se efectuaram os trabalhos de campo, João Lopes, e à equipa de campo de sísmica, Daniela Alves, Jaime Leote e Fernando Caneiras.

Bibliografia

- Carvalho, J., Cabral, J., Gonçalves, R., Torres, L. & Mendes-Victor, L., 2006. Geophysical Methods Applied to Fault Characterization and Earthquake Potential Assessment in the Lower Tagus Valley, Portugal. *Tectonophysics*, 418: 277-297.
- Carvalho, J., Taha, R., Cabral, J., Carrilho, F. & Miranda, M., 2008. Geophysical characterization of the Ota-Vila Franca de Xira-Lisbon-Sesimbra fault zone, Portugal. *Geophysical Journal International*, 174: 567-584.
- Carvalho, J., Ghose, R., Loureiro, A. V., Pinto, C. C. & Borges, J. F., 2012. Is the Vila Franca de Xira fault still active? A shallow seismic reflection shear-wave study in an intraplate environment. 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012, Copenhagen.
- Demant, D., Renardy, F., Vanneste, K., Jongmans, D., Camelbeeck, T. & Megrahoui, M., 2001. The use of geophysical prospecting for imaging active faults In the Roer Graben, Belgium. *Geophysics*, 66(1): 78-89.
- Ghose, R., Carvalho, J. & Loureiro, A., 2013. Signature of fault deformation in near-surface soil visible in shear seismic reflections. *Geophysical Research Letters*, 40: 1074-1078.
- Justo, J.L., Salwa, C., 1998. The 1531 Lisbon earthquake. *Bulletin Seismological Society of America*, 88: 319-328.
- Meghraoui, M., Camelbeeck, T., Vanneste, K., Brondeel, M. & Jongmans, D., 2001. Active faulting and paleoseismology along the Bree fault, lower Rhine graben, Belgium. *Journal of Geophysical Research*, 105(B6): 13,809-13,841.
- Nguyen, F., Garambois, S., Jongmans, D., Pirard, E. & Loke, M. H., 2005. Image processing of 2D resistivity data for imaging faults. *Journal of Applied Geophysics*, 57: 260-277.
- Slater, L. & Niemi, T. M., 2003. Ground-penetrating radar investigations of active faults along the Dead Sea Transform and implications for seismic hazards within the city of Aqaba, Jordan. *Tectonophysics*, 368: 33-50.
- Teves, P., Rio, I., Marreiros, C., Ribeiro, R., Borges, J. F., 1999. Source Parameters of old earthquakes: semi-automatic digitalization of analog records and seismic moment assessment. *Natural Hazards*, 19, 205-220.
- Yalçiner, C. Ç., Altunel, E., Bano, M., Meghraoui, M., Karabacak, V. & Akyuz, H. S., 2013. Application of GPR to normal faults in the Büyük Menderes Graben, western Turkey. *Journal of Geodynamics*, 65: 218-227.