

Ondas do mar que iluminam o interior da Terra

Graça Silveira¹, Susana Custódio²

¹ Área Dep. de Física, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa e Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, Edifício C8, 1749-016 Lisboa

² Instituto Dom Luiz, Dep. Eng. Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa

m silveira@fc.ul.pt

Resumo

Estações sísmicas em todo o mundo registam permanentemente uma vibração de fundo que resulta do acoplamento de energia entre os oceanos e a Terra sólida – o ruído microssísmico. Apesar deste ruído ser bem conhecido desde o início do século XX, foi apenas no início deste século que a qualidade e densidade de observações sísmicas permitiu o desenvolvimento de técnicas que utilizam eficientemente esta energia para observar tempestades oceânicas, mapear o interior da Terra e – algo que até aqui nunca tinha sido possível – mapear a evolução no tempo, à escala humana, da estrutura interior do nosso planeta.

Introdução

O ruído microssísmico é registado de forma persistente em todo o globo e consiste em vibrações do solo com alguns micrómetros de amplitude. As primeiras observações do ruído microssísmico remontam à época do desenvolvimento dos primeiros sismómetros, no final do século XIX. Durante a primeira metade do século XX, foi-se constatando que o ruído microssísmico consistia em vibrações do solo que: 1) tinham períodos semelhantes aos da ondulação (swell) oceânica, 2) mostravam direccionalidade, 3) eram moduladas sazonalmente, com maiores amplitudes registadas no Inverno, 4) eram compostas maioritariamente por ondas superficiais de Rayleigh, 5) tinham maiores amplitudes durante tempestades oceânicas, e 6) tinham maiores amplitudes em estações junto à costa [1].

As redes sísmicas de elevada qualidade de que dispomos hoje em dia confirmam estas observações, mostrando ainda que o ruído microssísmico é composto por dois tipos de vibrações fundamentalmente diferentes: o ruído microssísmico primário e o secundário. O ruído microssísmico primário tem um período dominante entre 8 e 20 segundos (Figura 1), idêntico ao período da ondulação oceânica. Has-

selmann [2] propôs que o ruído microssísmico primário pode ser eficientemente gerado pela pressão direta da ondulação oceânica no fundo do mar. Como a amplitude das ondas oceânicas decai significativamente com a profundidade, este mecanismo só é eficiente em zonas de mar pouco profundo, como em regiões costeiras. O ruído microssísmico secundário é mais energético do que o primário e tem períodos dominantes entre os 4 e os 10 segundos (Figura 1) – metade do período da ondulação oceânica. Longuet-Higgins [3] mostrou que o ruído microssísmico secundário pode ser gerado por ondas oceânicas de iguais períodos, que colidem ao viajar em direções opostas. Desta interferência resultam ondas estacionárias com um período que é metade do período das ondas originais. A perturbação de pressão gerada pela onda estacionária é independente da profundidade, conseguindo propagar-se até ao fundo do mar – mesmo em oceano profundo – onde a oscilação de pressão se transforma em energia sísmica.

O ruído microssísmico secundário é produzido eficientemente em três cenários diferentes:

- 1) em tempestades oceânicas que avançam rapidamente, quando a perturbação atmosférica avança mais rapidamente do que a ondulação oceânica, gerando nova ondulação que interfere com a ondulação gerada mais atrás;
- 2) em regiões costeiras, quando a ondulação refletida na costa colide com a ondulação que se aproxima da costa, e
- 3) quando ondulações geradas em regiões diferentes, por tempestades diferentes, mas de períodos idênticos, se encontram.

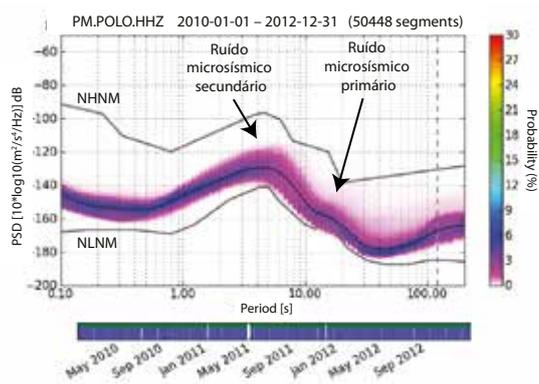


Fig. 1 – Características espectrais do ruído sísmico de fundo. O gráfico mostra a distribuição probabilística da densidade de potência espectral (*Probabilistic Power Spectral Density*, PPSD) da aceleração vertical do solo observada na estação POLO, em Portugal continental, entre 2010 e 2012. Os valores espectrais representados com cores do topo da escala são os registados mais frequentemente, enquanto que os que estão representados com cores da base da escala são os observados menos frequentemente. As curvas cinzentas grossas representam o *New High Noise Model* (NHNM) e o *New Low Noise Model* (NLNM), que balizam o intervalo em que o ruído sísmico de fundo é habitualmente observado.

Nos últimos anos, a qualidade e quantidade de observações sísmicas disponíveis, a par com uma melhor capacidade de cálculo e de processamento de grandes quantidades de dados, permitiu que o ruído microsísmico deixasse de ser visto como ruído e passasse a ser visto também como sinal...

Monitorização dos oceanos

Os primeiros esforços para utilizar a energia microsísmica para observar tempestades oceânicas surgiram no final da II Guerra Mundial, quando a previsão das tempestades oceânicas se tornou uma prioridade. Gutenberg [4] descreveu uma tentativa da força naval Americana baseada na utilização de estações tripartidas distribuídas na região do Oceano Pacífico. Cada estação tripartida era composta por três estações sísmicas, dispostas num triângulo com poucos quilómetros de lado. A informação recolhida em cada estação tripartida era analisada em conjunto, de forma a inferir a direção de origem da energia microsísmica. As direções obtidas a partir das várias estações tripartidas eram depois cruzadas, de forma a localizar as tempestades.

No final do século XX, surgiram os primeiros trabalhos que utilizavam pequenas redes densas (*arrays*) para localizar com precisão a direção do local de geração da energia microsísmica (e.g.: [5]). Estes estudos mostravam ainda como era possível cruzar esta informação com as direções obtidas a partir de outros *arrays* para localizar as fontes de energia microsísmica.

Como existem dados sísmicos desde o início do século XX, vários autores têm estudado a possibilidade de caracterizar as tempestades oceânicas

do século XX a partir de sismogramas históricos registados em papel. Bromirski e co-autores [6] desenvolveram uma função de transferência entre o ruído microsísmico registado na estação de Berkeley e a altura significativa das ondas registada em quatro boias na costa da Califórnia, durante um período de três meses em 1995. Estes autores sugeriram que a função de transferência desenvolvida poderia ser utilizada para estudar a ondulação junto à costa californiana desde 1930, altura em que começa a haver um registo sísmico com a qualidade necessária em Berkeley.

Grevemeyer e co-autores [7] analisaram dados sísmicos registados em Hamburgo entre 1953 e 2000, e concluíram que o número de dias com ruído microsísmico de elevada amplitude aumentou no período analisado. Estes autores sugeriram que o aumento corresponde a um aumento de tempestades oceânicas, que pode estar relacionado com o aumento da temperatura global registado no mesmo período.

Mais recentemente, Davy e co-autores [8] estudaram registos sísmicos obtidos no fundo do Oceano Índico, ao largo de Madagáscar, obtidos durante a passagem de ciclones tropicais. Os autores realçaram que este tipo de dados poderá ser considerado futuramente como uma nova fonte de informação na monitorização em tempo real de tempestades atmosféricas e oceânicas.

Ver o interior da Terra

A tomografia sísmica é uma janela para o interior da Terra. O objetivo é obter uma distribuição das perturbações da velocidade das ondas sísmicas de volume (P e/ou S) em função da profundidade. Estas perturbações, por sua vez, dependem dos parâmetros elásticos do meio e da densidade, sendo estes últimos função da mineralogia e das condições termodinâmicas (pressão e temperatura). A tomografia sísmica utiliza como dados o tempo de percurso das ondas de volume, a velocidade de grupo e/ou a velocidade de fase das ondas superficiais¹, ou a forma de onda. Estes vários tipos de ondas têm uma propagação e períodos dominantes distintos e, por isso, permitem obter modelos da Terra a diferentes escalas e com diferentes resoluções. Contudo, o imageamento das propriedades físicas da estrutura interna do planeta continua a apresentar limitações temporais e espaciais, impostas pelas geometrias fonte-recetor disponíveis. A maior parte dos sismos têm epicentro ao longo das fronteiras de placas ou em regiões sísmicas ativas e as estações sísmicas estão, na sua maioria, concentradas nos continentes e ilhas, o que limita a diversidade de trajetórias sismo-estação disponíveis.

¹ As ondas superficiais resultam da interferência construtiva e destrutiva das ondas de volume que permanecem confinadas entre a superfície e as descontinuidades no globo. São ondas estacionárias em profundidade, com uma profundidade de penetração que depende, simultaneamente, do modo de vibração e do período considerado. Para o modo fundamental, a profundidade de penetração é cerca de 1/3 do comprimento de onda.

Na Terra, qualquer evento capaz de produzir ondas elásticas emite energia que se propaga em todas as direções. Tal como um sismo, uma pequena vibração do solo produz microssinais sísmicos que se propagam no interior da Terra. Se os medirmos em dois pontos distintos, eles estarão desfasados no tempo, mas ligados ao mesmo evento. Se correlacionarmos os registos destes microssinais introduzindo o desfasamento temporal correto, vamos fazer aparecer essa ligação. Uma vez que a energia desses sinais é extremamente pequena, são calculadas muitas correlações cruzadas, que posteriormente são somadas de forma a fazer sobressair o sinal coerente do ruído não coerente.

O trabalho pioneiro de Shapiro e Campillo [9] veio mostrar que a análise do ruído microssísmico entre pares de estações sísmicas permitia obter funções empíricas de Green, análogas às ondas superficiais registadas na sequência de um sismo. Estavam dados os primeiros passos para a tomografia sísmica sem sismos. Quais as vantagens de utilizar o ruído microssísmico?

- i) apenas depende da geometria da rede de estações, oferecendo, portanto, um melhor controle da resolução lateral;
- ii) pode ser aplicada em regiões com fraca sismicidade.

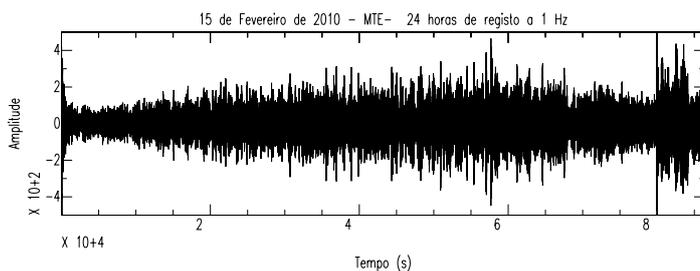


Fig. 2 - Um dia de registo contínuo na estação MTE (Manteigas). A taxa de amostragem é de uma amostra por segundo.

O processamento do ruído microssísmico desde o seu registo (Figura 2) à construção das funções empíricas de Green está detalhado em diversos artigos, e.g. [10-12], entre outros. A Figura 3 mostra, como exemplo, o resultado da correlação entre a estação PFVI, localizada no Algarve e cerca de 60 estações localizadas em todo o território nacional. Os correlogramas são apresentados em função da distância entre os vários pares de estações. É visível a chegada de dois trens de ondas dispersivos (a velocidade de propagação depende do período considerado) dispostos simetricamente em relação a um tempo zero. Do lado positivo temos o equivalente ao registo de uma onda superficial de Rayleigh nas diferentes estações, devido a um evento localizado na estação PFVI. No lado negativo, vemos o equivalente ao registo de uma onda de Rayleigh em PFVI devido a eventos ocorridos nas diversas estações.

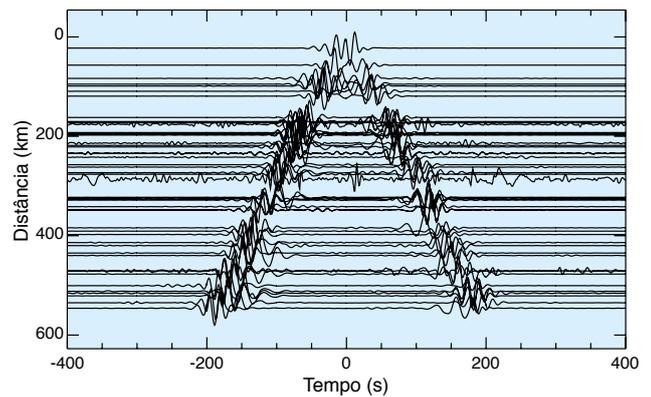


Fig. 3 - Correlogramas entre a estação PFVI (Sul de Portugal) e as restantes estações instaladas em Portugal. O tempo de chegada do trem de ondas que aparece na figura tem uma velocidade média de cerca de 3,0 km/s.

Os vários trens de ondas que aparecem na figura têm uma velocidade média de cerca de 3,0 km/s, valores típicos de uma onda de Rayleigh na banda de períodos entre 5 e 30 segundos. Se analisarmos uma destas ondas em diferentes bandas de frequência é fácil confirmar o seu carácter dispersivo, com os longos períodos, sensíveis às maiores profundidades, a chegarem mais cedo que os períodos mais curtos, como se pode ver na Figura 4. Extraídas as ondas de Rayleigh, o procedimento a seguir na obtenção de um modelo 3D da estrutura interna é o habitualmente seguido numa tomografia com ondas superficiais (por exemplo: [10-12]).

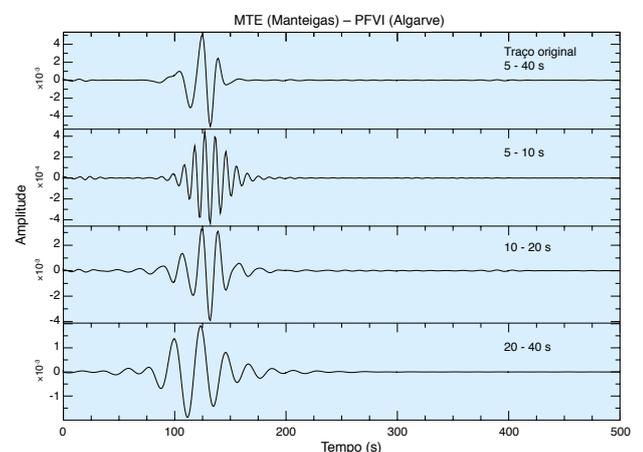


Fig. 4 - Resultados para o trajeto MTE (Manteigas) - PFVI (Algarve), atravessando parte da Portugal continental. O traço original foi filtrado em diferentes bandas de período para avaliar a sua natureza dispersiva.

Ao longo da última década, a utilização do ruído ambiente tem vindo a permitir o mapeamento das velocidades das ondas sísmicas da sub-superfície à escala local (e.g. [11]), à escala regional [e.g. 10, 13], e à escala global [14]. A Figura 5 mostra as variações laterais na velocidade das ondas S, calculadas a partir da tomografia de ruído, às profundidades de 10 km e 20 km, para Portugal continental. As perturbações são apresentadas

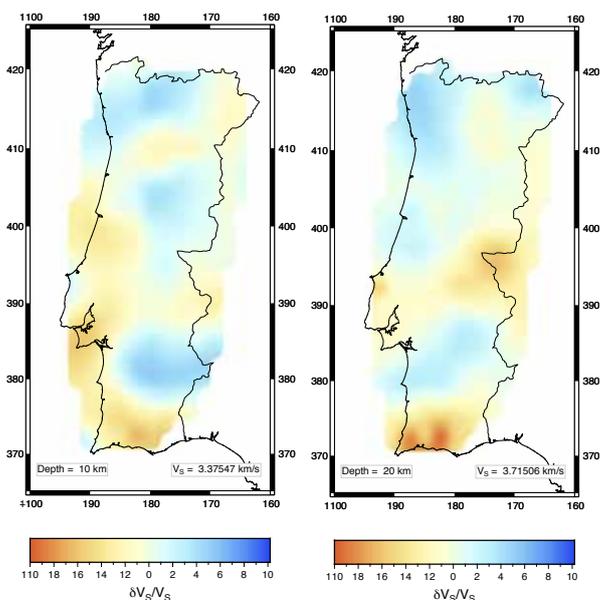


Fig. 5 - Distribuição lateral das velocidades das ondas S a 10 km e 20 km de profundidade. As perturbações são calculadas relativamente a um valor médio, indicado na respetiva carta.

em relação a um valor médio, com uma escala de cores, tal como se representa na figura. Velocidades baixas estão normalmente associadas a estruturas mais frias e/ou mais densas. Velocidades acima da média traduzem a presença de materiais mais quentes e/ou menos densos.

Uma janela que se abre...

Outra das vantagens da análise do ruído microsísmico sobre a análise de sinais sísmicos "tradicionais", resultantes de sismos ou de fontes ativas, reside na capacidade de monitorizar alterações na estrutura interna, graças à repetibilidade das observações possibilitando o mapeamento 4D das estruturas, isto é, espacialmente e também ao longo do tempo.

As erupções vulcânicas explosivas têm grande impacto nas sociedades, sobretudo nos casos em que não tem sido possível atuar atempadamente. Em 2010, por exemplo, a erupção do vulcão Eyjafjallajökull, na Islândia, afetou significativamente o tráfego aéreo no Norte e no Centro da Europa e paralisou completamente alguns aeroportos, o que teve repercussões económicas importantes. Em 2006, Sens-Schönfelder e Wegler [15] usaram as formas de onda das correlações cruzadas de ruído sísmico, obtidas ao longo do tempo, para acompanhar as mudanças na velocidade de edifícios vulcânicos, demonstrando que o registo contínuo do ruído microsísmico permite a monitorização de vulcões, contribuindo assim para a previsão de erupções vulcânicas. Mais recentemente, Brenguier e co-autores [16-18] aplicaram, com sucesso, técnicas similares ao vulcão Piton de la

Fournaise, na ilha da Reunião. Estes autores identificaram variações na velocidade de propagação das ondas devido a alterações mecânicas no edifício vulcânico. A fracturação e a circulação de fluidos provocam uma redução significativa nas velocidades de propagação e estes autores mostraram que estas mudanças estruturais são bons indicadores de condições pré-eruptivas [16].

Estes resultados têm vindo a ser explorados com resultados promissores noutras situações de risco, como é o caso de deslizamentos de terreno [19-20]. Têm igualmente aplicação na área industrial, nomeadamente na exploração da energia geotérmica [21,22], na área da exploração dos hidrocarbonetos [23-24], ou ainda para monitorização em exploração mineira [25].

Conclusões

Ao longo das últimas décadas, assistimos a um crescimento sem precedentes das redes de estações sísmicas, a registar em contínuo com taxas de amostragem de várias dezenas de amostras por segundo. Além dos muitos eventos sísmicos que ocorrem diariamente, mais de 90 % do sinal registado é ruído microsísmico gerado nos oceanos. A análise contínua desse ruído possibilita assim uma monitorização efetiva e um imageamento 4D, impossível com os registos de sismos ou fontes ativas. Medir as pequenas variações nas propriedades mecânicas da Terra ao longo do tempo permite-nos detetar alterações associadas a processos de deformação em falhas, monitorizar sistemas de exploração geológica e acompanhar a evolução dos sistemas magmáticos em vulcões.

Referências

1. B. Gutenberg, "On microseisms", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 26(2), 111–117 (1936).
2. K. Hasselmann, "A statistical analysis of the generation of microseisms", *Rev. Geophys.* 1(2), 177–210, doi:10.1029/RG001i002p00177 (1963).
3. M. S. Longuet-Higgins, "A theory of the origin of microseisms", *Philos. Trans. Royal Soc. A* 243(857), 1–35, doi:10.1098/rsta.1950.0012 (1950).
4. B. Gutenberg, "Microseisms and Weather Forecasting", *J. Atmospheric Sci.* 4, 21–28, doi:10.1175/1520-0469(1947)004<0021:MAWF>2.0.CO;2 (1947).
5. A. Friedrich, F. Krüger, e K. Klinge, "Ocean-generated microseismic noise located with the Gräfenberg array", *J. Seismol.* 2, 47–64, doi:10.1023/A:1009788904007 (1998).
6. P. D. Bromirski, R. E. Flick, e N. Graham, "Ocean wave height determined from inland seismometer data: Implications for investigating wave climate changes in the NE Pacific", *J. Geophys. Res.: Oceans* 104(C9), 20,753–20,766, doi:10.1029/1999JC900156 (1999).
7. I. Grevemeyer, R. Herber, e H.-H. Essen, "Microseismological evidence for a changing wave climate in the northeast Atlantic ocean", *Nature* 408(6810), 349–352, doi:10.1038/35042558 (2000).
8. C. Davy, G. Barruol, F. R. Fontaine, K. Sigloch, e E. Stutzmann, "Tracking major storms from microseismic and hydroacoustic observations on the seafloor", *Geophys. Res. Lett.* 41(24):8825–8831 (2014).
9. N. M. Shapiro, e M. Campillo, "Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise", *Geophys. Res. Lett.* 31, L07614, doi:10.1029/2004GL019491 (2004).
10. G. Silveira, N.A. Dias, e A. Villaseñor, "Seismic imaging of the Western Iberian Crust using ambient noise: boundaries and internal structure of the Iberian Massif", *Tectonophysics* 589, 186–194, doi:10.1016/j.tecto.2012.12.025 (2013).
11. C. Matos, C., G. Silveira, L. Matias, R. Caldeira, L. Duarte, N. A. Dias, F. Krueger, e T. Santos, "Upper crustal structure of Madeira Island revealed from ambient noise tomography", *J. Volcanol. Geotherm. Res.* doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.03.017 (2015).
12. C. Corela, G. Silveira, L. Matias, M. Schimmel e W. H. Geissler, "Ambient seismic noise tomography of SW Iberia integrating seafloor- and land-based data", *Tectonophysics* 700–701, 131–149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.02.012> (2017).
13. A. Domingues, A., G. Silveira, A. Ferreira, S.-J. Chang, S. Custódio, e J. Fonseca, "Ambient Noise Tomography of the East Africa Rift in Mozambique", *Geophys. J. Int.* 204 (3): 1565–1578, doi:10.1093/gji/ggv538 (2016).
14. A. Haned, E. Stutzmann, M. Schimmel, S. Kiselev, A. Davaille, e A. Yelles-Chaouche, "Global tomography using seismic hum", *Geophys. J. Int.* 204, 1222–1236, doi:10.1093/gji/ggv516 (2016).
15. C. Sens-Schönfelder e U. Wegler, "Passive Image Interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi volcano, Indonesia", *Geophys. Res. Lett.* 33, no. 21, L21302, doi:10.1029/2006GL027797 (2006).
16. F. Brenguier, N.M. Shapiro, M. Campillo, V. Ferrazzini, Z. Duputel, O. Coutant, e A. Nercessian, "Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise", *Nat. Geosci.* 1, pp. 126–130, 10.1038/ngeo104 (2008).
17. F. Brenguier, D. Clarke, Y. Aoki, N.M. Shapiro, M. Campillo, e V. Ferrazzini, "Monitoring volcanoes using seismic noise correlations", *Compt. Rendus Geosci.* 343, pp. 633–638, 10.1016/j.crte.2010.12.010 (2011).
18. F. Brenguier, M. Campillo, T. Takeda, Y. Aoki, N. Shapiro, X. Briand, K. Emoto, e H. Miyake, "Mapping pressurized volcanic fluids from induced crustal seismic velocity drops", *Science* 345(6192), 80–82 (2014).
19. G. Mainsant, E. Larose, C. Brönnimann, D. Jongmans, C. Michoud, e M. Jaboyedoff, "Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction", *J. Geophys. Res.* 117, F01030, doi:10.1029/2011JF002159 (2012).
20. C. Voisin, S. Garambois, C. I. Massey e R. Brossier, "Seismic Noise Monitoring of the Water Table in a Deep Seated Slow Moving Landslide". *Interpretation* 4, 3, pp SJ67-SJ76 (2016).
21. M. Lehujeur, J. Vergne, A. Maggi e J. Schmittbuhl, "Ambient noise tomography with non-uniform noise sources and low-aperture networks: case study of deep geothermal reservoirs in Northern Alsace, France", *Geophys. J. Int.*, 208 (1), 193–210, doi:10.1093/gji/ggw373 (2017).
22. A. Obermann, T. Kraft, E. Larose, e S. Wiemer, "Potential of ambient seismic noise techniques to monitor reservoir dynamics at the St. Gallen geothermal site (Switzerland)", *Journal of Geophys. Res.* 120 (6), 4301–4316, doi:10.1002/2014JB011817 (2015).
23. M. Y. Ali, K. A. Berteussen, J. Small, e B. Barkat, "A study of ambient noise over an onshore oil field in Abu Dhabi, United Arab Emirates", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 100, 392–401, doi:10.1785/0120090131 (2010).
24. B. Boullenger, A. Verdel, B. Paap, J. Thorbecke, e D. Draganov, "Studying CO₂-storage with ambient-noise seismic interferometry: a combined numerical feasibility study and field-data example for Ketzin, Germany", *Geophysics* 80, Q1–Q13, doi:10.1190/geo2014-0181.1 (2015).
25. R. Czarny, H. Marcak, N. Nakata, Z. Pilecki, e Z. Isakow, "Monitoring Velocity Changes Caused By Underground Coal Mining Using Seismic Noise". *Pure Applied Geophys.* 2016, 173.6: 1907–1916. ISSN 0033-4553 (2016).



Graça Silveira é Professora Adjunta no ISEL, na Área Departamental de Física, e investigadora do Lab. Associado IDL. É licenciada e mestre em Ciências Geofísicas pela FCUL e doutorada em Física, ramo Geofísica, pela FCUL. Dedicar-se ao estudo

da estrutura interna da Terra a partir da análise de sinais sísmicos, recorrendo para isso a diferentes metodologias.



Susana Custódio é Professora Auxiliar na FCUL, na área de Geofísica, e investigadora do Lab. Associado IDL. É licenciada em Eng. Física Tecnológica pelo Inst. Sup. Técnico e doutorada em Ciências Geológicas pela Univ. Califórnia, Santa Bárbara.

Dedicar-se à sismologia, com ênfase no estudo das fontes sísmicas, sismologia em tempo real, infraestrutura observacional, e educação e divulgação sobre riscos.



Soluções para medição precisa de radiação solar

Medir com precisão a radiação do Sol é fundamental para identificar localizações ideais para instalações, justificar decisões de investimento, maximizar a eficiência de operação, programar manutenções, monitorizar o desempenho e melhorar a tecnologia em aplicações em energia solar fotovoltaica (PV), energia solar fotovoltaica de concentração (CPV) e energia solar térmica de concentração (CSP).

Na Kipp & Zonen, os nossos especialistas desenvolvem instrumentos de alta qualidade para a medição de radiação solar global, directa, difusa e no plano dos painéis, que permitem saber com precisão se o seu projecto de energia solar está a operar no seu melhor e a atingir o desempenho previsto, assim como fazer a gestão da manutenção. Desde a nossa bem conhecida série CMP, e a inovadora série de piranómetros Smart SMP, até ao novo sistema compacto de monitorização RaZON⁺, nós fornecemos as melhores soluções.

Quando a precisão importa, meça com Kipp & Zonen.

www.kippzonen.com

Kipp & Zonen distribuidor para Portugal
Vórtice - Equipamentos Científicos, Lda.

+351 21 868 35 59 | geral@vortice-lda.pt | www.vortice-lda.pt