

UNIDADE 04 - Outras Aplicações (23/05/2016 - 15/06/2016)

Diogo Luiz de Oliveira Coelho¹

ABSTRACT

Esta unidade visa aprofundar em aplicações de técnicas de interferometria no geral, por exemplo, no monitoramento de tempestades, variações temporais de meios de propagação e monitoramento de prédios.

INTRODUÇÃO

Wapenaar et al. (2010) e Boullenger et al. (2015) definem interferometria sísmica de Ruído Sísmico Ambiental como sendo o processo para recuperar a resposta sísmica entre um par de sensores através da correlação cruzada dos registros sísmicos observados, fazendo isso, uma estação é considerada fonte virtual do sinal em relação a outra estação do par. A interferometria sísmica vem ganhando notoriedade por ter uma vasta aplicabilidade e por não depender de grandes terremotos ou explosivos como fonte. Além de conseguir atuar tanto em escala global quanto local. A definição de ruído sísmico ambiental sugiu com os trabalhos de Campillo and Paul (2003) e Shapiro and Campillo (2004), porém apenas com a compilação feita por Wapenaar et al. (2010) que a técnica foi melhor apresentada e exemplificada. Com isso pôde-se replicar a técnica em larga escala em diferentes áreas ao redor do mundo, como mostram os trabalhos estudados nesta unidade Zaccarelli et al. (2011), Boullenger et al. (2015) e Nakata et al. (2015). No entanto uma década antes da publicação deste trabalho existiam trabalhos que utilizavam de microssismos, que posteriormente seriam chamados de ruído sísmico ambiental, para o monitoramento de algumas mudanças ambientais, como mostrado por Bromirski et al. (1999) no estudo das variações das alturas das ondas do oceano.

A variação das propriedades elásticas do meio é uma questão de suma importância, tanto em escala local (ativi-

dades exploratórias) quanto em escala regional (atividades acadêmicas). Monitorar essas variações dependem ou de terremotos, em escalas regionais, ou de dinheiro para fazer novas aquisições, em pequenas áreas de exploração. Porém com a introdução do ruído sísmico ambiental, pode-se monitorar essas variações das propriedades elásticas do meio com um custo reduzido, comparado às aquisições exploratórias, e com uma frequência maior, comparado a baixa frequência em que grandes sismos ocorrem. Como a fonte do ruído possui uma frequência maior que os terremotos, é possível monitorar como as propriedades do meio variam em função de algum evento natural ou antrópico, como mostram os trabalhos de Boullenger et al. (2015), para investigar reservatórios após a inserção de CO_2 , e os trabalhos de Prieto et al. (2010) e Nakata et al. (2015), para monitorar a estrutura de edifícios após grandes terremotos.

Os trabalhos apresentados utilizam tanto ondas de superfície quanto ondas de corpo, assim como a resposta da onda direta quanto a resposta da reflexão. Cada um desses trabalhos apresenta uma prática diferente, e por conseguinte uma metodologia diferenciada na abordagem do problema estudado. Por exemplo, os trabalhos de Vidal et al. (2014) e Boullenger et al. (2015) que utilizam uma técnica oriunda da sísmica convencional para recuperar a resposta de reflexão das ondas de corpo no ruído ambiental. Devido essa gama de usos da interferometria sísmica de ruído ambiental, o objetivo dessa unidade é aprofundar o conhecimento nos vários tipos de processamentos propostos para o registro do ruído sísmico segundo a área de atuação. Neste artigo serão discriminadas duas áreas de interesse para a utilização da interferometria de ruído, quando é utilizada para fins ambientais e quando é utilizada para o monitoramento das propriedades físicas do meio, tanto em macro escala, grandes áreas afetadas por terremotos, quanto em microescala, prédios afetados por grandes sismos.

⁰¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN Centro de Ciências Exatas e da Terra - CCET Departamento de Geofísica Campus Universitário - Lagoa Nova 59072-970 Natal, RN

UTILIZAÇÃO DE RUÍDO SÍSMICO NO MONITORAMENTO DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS DO MEIO

O ruído sísmico ambiental é composto majoritariamente de ondas de superfície, porém também é composto de ondas de corpo como visto na unidade anterior nos exemplos de Roux et al. (2005) e Poli et al. (2012). O sinal emergente do ruído sísmico ambiental pode ter inúmeros usos focados no monitoramento das propriedades do meio em que estão instaladas as estações sismográficas. Pode-se discriminar a variação das propriedades físicas do meio em relação ao tempo através da análise do registro sísmico contínuo. Essa avaliação temporal se faz necessário em vários braços da ciência, como na engenharia civil, exploração de minerais de minérios, engenharia de terremotos, dentre outras áreas. Nesse tipo de monitoramento temporal pode-se utilizar tanto ondas de superfície quanto ondas de corpo, a utilização dependerá da escala de trabalho em conjunto com o alvo do estudo, por exemplo para uma alta resolução em sítios exploratórios é indicado a recuperar a resposta de reflexão das ondas de corpo, como mostra Boullenger et al. (2015) em seu trabalho. Já para extensas regiões, como mostrado no trabalho de Zaccarelli et al. (2011), utiliza-se ondas de superfície, porque o ruído sísmico é composto principalmente por ondas de superfície, como visto nas unidades anteriormente estudadas.

Nesta seção serão apresentados os artigos que buscam monitorar as variações das propriedades do meio em função de algum evento antrópico ou não. Além dessa discriminação, também serão separados os trabalhos pela escala de trabalho. Trabalhos como os de Prieto et al. (2010), Vidal et al. (2014), Boullenger et al. (2015) e Nakata et al. (2015) estudam a mudança do meio em escala local serão abordados de maneira terã uma metodologia diferente de trabalhos realizados em grandes áreas, como os de Li et al. (2006) e Zaccarelli et al. (2011).

Utilização do ruído sísmico para o monitoramento urbano

Os trabalhos de Prieto et al. (2010) e Nakata et al. (2015) monitoram o comportamento das estruturas de edifícios após a passagem de grandes terremotos em prédios nos Estados Unidos e no Japão, respectivamente. Para tal monitoramento os autores utilizam a resposta do edifício, ou construção. Snieder and Safak (2006) define que a resposta da estrutura de um edifício a um tremor natural ou induzido é determinado pela velocidade das ondas cisalhantes e pela atenuação da estrutura. O mesmo autor complementa que a velocidade cisalhante junto com a geometria da construção controla a frequência de ressonância do edifício. A atenuação determina a taxa de dissipação de energia em uma construção, a qual muda de acordo com a movimentação de uma estrutura dada uma excitação.

Snieder and Safak (2006) calculam a resposta da construção utilizando a interferometria em dados oriundos de terremotos para cada andar em uma biblioteca na Califór-

nia. Este trabalho mostra que informação sobre a fase permite obter a resposta da construção no domínio do tempo e observar a propagação das ondas dentro do edifício. Prieto et al. (2010) e Nakata et al. (2015) mostram que a interferometria de deconvolução muda as condições de borda na base do edifício quando deconvolui-se o campo de onda observado em cada andar com o registro na base. Snieder and Safak (2006), Prieto et al. (2010) e Nakata et al. (2015) assumem que não existem nenhum tipo de movimentação do terreno onde o prédio está alicerçado. A resposta oriunda da deconvolução pode ser utilizada para diversos estudos, como: (1) parâmetros modais da construção, (2) propagação da onda dentro do edifício, (3) estimar o fator de qualidade (Q) associado com os modos normais e (4) predição da resposta da construção em devido a tremores de várias intensidades. Nakata et al. (2015) mostra a importância de ter um controle temporal das respostas das construções para regiões altamente sismogênicas. Prieto et al. (2010) intitula que as propriedades da fase da onda são úteis para identificar danos nas construções dando informações sobre as mudanças nos parâmetros elásticos e nos coeficientes de reflexão do meio.

Nakata et al. (2015) descreve que a técnica da interferometria de deconvolução assume uma propagação vertical da onda (1D) com o número de onda constante e atenuação da construção e sem reflexões internas (entre os andares intermediários) para simplificar as equações. Essas hipóteses são utilizadas de acordo com uma solução linearizada para a equação 1D da onda. Este autor equaciona a resposta de um terremoto em uma altura z como:

$$u(z, \omega) = \frac{S(\omega) \{ \exp^{ikz} \exp^{-\gamma|k|z} + \exp^{ik(2H-z)} \exp^{-\gamma|k|(2H-z)} \}}{1 - R(\omega) \exp^{2ikH} \exp^{-2\gamma|k|H}} \quad (1)$$

Onde $S(\omega)$ é a forma de onda incidente na base do edifício, $R(\omega)$ é o coeficiente de reflexão, k é o número de onda, γ é o coeficiente de atenuação, H é a altura do edifício e i é a unidade imaginária. Por conveniência, o nível térreo do prédio será $z = 0$ e a medida que se avança os andares z será positivo. A forma de onda $S(\omega)$ contém a *wavelet* da fonte do terremoto e o efeito da propagação da onda embaixo do edifício. A equação acima indica que as ondas estão reverberando entre o topo e chão do edifício com uma perda de energia causada pela atenuação intrínseca do prédio (γ) e as condições de contorno na base $R(\omega)$. Quando se deconvolve as ondas observadas em z com aquelas observadas na base do edifício ($z = 0$), obtém-se:

$$D(z, 0, \omega) = \frac{u(z, \omega)}{u(0, \omega)} \left(= \frac{u(z, \omega) u^*(0, \omega)}{|u(0, \omega)|^2 + \epsilon} \right) \quad (2)$$

$$= \frac{\exp^{ikz} \exp^{-\gamma|k|z} + \exp^{ik(2H-z)} \exp^{-\gamma|k|(2H-z)}}{1 + \exp^{2ikH} \exp^{-2\gamma|k|H}} \quad (3)$$

em que $*$ é o complexo conjugado e ϵ é o parâmetro de regularização da deconvolução.

A onda deconvoluída é um pico único porque um sinal deconvoluído com ele mesmo é uma função delta (Snieder and Safak, 2006). As ondas deconvoluídas de todos os andares são causais, logo $t > 0$. O primeiro pacote de ondas é formado por ondas que se propagam no sentido positivo de z , logo se propagam para cima. A reflexão dessa onda que se propaga para cima no topo é dada pelo segundo pico negativo, logo a onda se propaga para baixo. Logo o sinal recuperado pela equação acima é um conjunto de reflexões com polaridades positivas e negativas. Segundo Snieder and Safak (2006) e Nakata et al. (2015) após essas reflexões pode-se ver na ondas deconvoluídas as ondas que são produtos da ressonância dentro do edifício. A forma de onda resultante da deconvolução apresenta-se de forma simples, logo é sugestiva a ideia que a propagação seja unidimensional dada a frequência empregada.

Utilização do ruído sísmico para o monitoramento de propriedades crustais em áreas altamente sismogênicas

Nesta subseção serão discutidas as técnicas utilizadas nos trabalhos de Li et al. (2006) e Zaccarelli et al. (2011) para estudar o comportamento das rochas circundantes a hipocentros de grandes terremotos. As regiões estudadas por Li et al. (2006) e Zaccarelli et al. (2011) são regiões altamente sismogênicas do globo terrestre, sul da Califórnia e região central da Itália, respectivamente. O monitoramento possui a mesma ideia central em ambos trabalhos, trata-se de calcular as propriedades físicas do meio antes e depois de um grande evento sísmico, no caso da Califórnia e da Itália um terremoto de magnitude igual a 6.

Tanto Li et al. (2006) quanto Zaccarelli et al. (2011) reportam mudanças temporais na velocidade sísmica medida antes e depois da passagem dos grandes eventos sísmicos. Ambos os trabalhos utilizam a correlação cruzada das formas de ondas resultantes do processamento para calcular o atraso entre os dados recolhidos antes do evento com os dados recolhidos após o evento. No caso do artigo de Li et al. (2006) os dados são de 2 anos antes do evento e de meses depois do evento, já no caso de Zaccarelli et al. (2011) os dados são de 1 ano antes do evento principal e de 1 ano depois do evento.

Uma diferença considerável entre os dois trabalhos é o tipo de banco de dados utilizado, porque o artigo de Li et al. (2006) utiliza dados oriundos de réplicas e de tiros sísmicos causados por explosões, já Zaccarelli et al. (2011) utiliza apenas o ruído sísmico ambiental contínuo. Porém os dois autores utilizam-se da correlação cruzada para o cálculo do tempo de percurso das ondas sísmicas, e com tal tempo o cálculo do atraso entre os dados pré e pós terremoto. E sabendo que qualquer mudança no tempo de percurso da correlação, atraso, reflete variações das propriedades elásticas do meio devido a passagem do terremoto.

Utilização do ruído sísmico para o monitoramento de áreas para exploração

Nessa subseção serão apresentados os trabalhos de Vidal et al. (2014) e Boullenger et al. (2015) que tentam apresentar novas metodologias para a utilização do ruído sísmico ambiental para a área de exploração. Para tal, Vidal et al. (2014) desenvolveu uma metodologia para iluminar as ondas de corpo presentes no ruído sísmico. A escolha das ondas de corpo é baseada nas propriedades de propagação das ondas de corpo, isso faz com essas ondas sejam favoráveis no imageamento de potenciais alvos da indústria, como visto na unidade passada. Mas a vantagem apresentada pela interferometria passiva é que a mesma não utiliza fontes ativas para recuperar a resposta de reflexão da subsuperfície, mas apenas registros do ruído sísmico ambiental. Porém um bom resultado da aplicação dessa metodologia dependerá de alguns fatores, como: distribuição geométrica e assinatura da fonte de ruído gerador das ondas de corpo.

Como visto na unidade passada, e retomado por Vidal et al. (2014) e Boullenger et al. (2015), o estudo das fontes das ondas de corpo ainda é um tópico recente quando comparado às ondas de superfície. Um dos agravantes seria que o ruído sísmico ambiental é dominado por ondas de superfície, pois na grande maioria dos casos as fontes são muito próximas à superfície terrestre. Logo é uma dificuldade evidente conseguir extrair ondas de corpo em meio a um registro predominantemente de ondas de superfície. Então se faz necessário uma metodologia capaz de suprimir todo esse conteúdo de ondas de superfície dominante no ruído sísmico ambiental. A resposta veio com a metodologia implementada por Vidal et al. (2014), onde existe uma busca preferencial por fontes de ruído que geram ondas de corpo. Para dar preferência a parte do ruído que é composta por ondas de corpo Vidal et al. (2014) e Boullenger et al. (2015) utilizam a técnica chamada *beam-forming* e filtrando o sinal bruto em janelas de frequências dominadas por ondas de corpo.

Boullenger et al. (2015) faz a tentativa de monitorar uma pequena área de armazenamento de CO_2 numa fazenda em Ketzin, Alemanha. Já Vidal et al. (2014) além de propor a nova metodologia também faz testes com dados reais em Annervien, Holanda. Boullenger et al. (2015) além de extrair ondas de corpo também fazer uma comparação temporal pré e pós a injeção de CO_2 na região. Tal técnica é chamada comumente no ramo do petróleo como *time slice*.

Boullenger et al. (2015) mostra que as correlações cruzadas são formadas sobre registros das funções de green nos receptores de fontes ao longo do limite de integração S . No domínio da frequência essa relação é dada por:

$$\hat{G}(x_B, x_A, \omega) + \hat{G}^*(x_B, x_A, \omega) \approx \frac{2}{\rho c} \oint_S \hat{G}^*(x_B, x, \omega) + \hat{G}(x_A, x, \omega) d^2x,$$

onde x é a coordenada de limite da fonte, ρ e c são

constantes de densidade e velocidade de propagação, respectivamente, ao longo de S . $\hat{G}(x_A, x, \omega)$ e $\hat{G}(x_B, x, \omega)$ são, respectivamente, as Funções de Green de uma fonte em x para um receptor em x_A e em x_B . $\hat{G}(x_B, x_A, \omega)$ é a função de Green de x_A para x_B . O sinal $*$ significa o complexo conjugado e corresponde ao tempo reverso no domínio do tempo.

Metodologia aplicada no monitoramento de propriedades elásticas do meio

Visando o melhor entendimento das metodologias aplicadas na reconstrução da Função de Green Empírica a partir do ruído sísmico ambiental nesta unidade. Cada etapa de processamento, propostos por inicialmente por Bensen et al. (2007), será discutida para todos os trabalhos. Entretanto para cada objetivo o processamento foi diferenciado. Nos próximos tópicos serão abordados os principais passos no processamento dos dados, evidenciando, quando houver, as principais discrepâncias entre os tipos de processamentos.

Banco de dados e pré-processamento

O banco de dados da maioria dos artigos citados nessa seção é formado pelo registro contínuo das três componentes (N-S, E-W e Z) dos sensores banda larga, exceto os trabalhos de Zaccarelli et al. (2011) e Boullenger et al. (2015) que utilizam apenas as componentes verticais dos sensores, este último se utiliza de geofones e hidrofones. Nota-se que na maior dos trabalhos utilizam-se do ruído sísmico ambiental como principal fonte, e utilizam sismos apenas para comprovar os resultados, como Prieto et al. (2010). Já Nakata et al. (2015) utiliza dados oriundos de terremotos antes e depois de um grande terremoto de 9 de magnitude. Já Li et al. (2006) utiliza dados de tiros sísmicos e réplicas de terremotos em seu trabalho.

De todos os artigos mostrados nessa seção apenas o trabalho de Zaccarelli et al. (2011) exemplifica com clareza o pré-processamento dos dados. Isso faz com que a reprodutibilidade do trabalho seja difícil, pois é de fundamental importância o pré-processamento dos dados. Zaccarelli et al. (2011) faz a re-amostragem da série temporal nas três estações utilizadas no trabalho. Também faz a sincronização do tempo e o preenchimento de algumas possíveis lacunas existentes no registro. Após isso faz-se o branqueamento do sinal entre 0.1 e 1 Hz e a normalização da amplitude pela normalização one-bit.

Processamento dos dados

Mesmo os trabalhos separados na mesma seção possuem algumas diferenças no modo de processar os dados. Os trabalhos voltados para o monitoramento de construções civis utilizam dados diferentes para extrair a resposta do edifício. O trabalho de Nakata et al. (2015) utiliza dados oriundos de terremotos e faz a interferometria de deconvolução dos registros, porém o autor não foi muito claro

quanto a utilização dos dados. Já Prieto et al. (2010) exemplifica melhor como foi realizada a deconvolução. Segundo o autor a cada série temporal com 10 minutos de tamanho foi computada a função de resposta do impulso em relação ao terreno. Os resultados foram separados em médias de 1, 14,30 e 50 dias de duração. E para cada deconvolução fez-se o branqueamento do sinal, para compensar problemas com a amplitude de cada frequência. Prieto et al. (2010), assim como Nakata et al. (2015), calcula a velocidade da onda S através do tempo de percurso entre a onda que reflete entre o topo e a base do prédio, isto é feito através da regressão linear da curva que melhor ajusta as velocidades em um gráfico da altura pelo tempo do percurso. Prieto et al. (2010) também calcula a ressonância e a atenuação do edifício.

Li et al. (2006) e Zaccarelli et al. (2011) monitoram a evolução temporal das propriedades elásticas de regiões afetadas por grandes terremotos. Li et al. (2006), apesar de utilizar dados oriundos de tiros sísmicos e de réplicas de terremotos, processa os dados de forma semelhante a Zaccarelli et al. (2011), este utiliza apenas dados de ruídos sísmicos. Li et al. (2006) calcula os tempos de percurso das ondas P, S e ondas guiadas pela zona de falha antes e depois do terremoto de Parkfield através de tiros sísmicos e de réplicas de terremotos. Esses tempos de percursos e as velocidades sísmicas são calculadas baseadas na interferometria de ondas coda, técnica da correlação cruzada com janela móvel das séries temporais. Toda essa correlação foi calculada com os sismogramas filtrados com um filtro passa-baixa (<3 Hz), e a janela móvel está localizada entre a primeira chegada da onda P e o final da coda S. Para se ter resultados aceitáveis o fator de corte mínimo do coeficiente de correlação foi de 0.8 para ondas P, S e ondas guiadas. Após os cálculos das correlações cruzadas para antes e depois do terremoto, calculou-se o atraso através da correlação cruzada entre as formas de ondas das correlações cruzadas pré e pós terremoto. Já Zaccarelli et al. (2011) para calcular o atraso através do ruído sísmico ambiental utilizou como referência a correlação cruzada de todo o intervalo de tempo. Como recortes momentâneos utilizou intervalos de 50 dias de empilhamentos, e com isso calculou o atraso através da correlação cruzada da forma de onda de referência por esses recortes de 50 dias. Com esses atrasos calculou-se a perturbação da velocidade sísmica através de uma regressão linear.

Os trabalhos de Vidal et al. (2014) e Boullenger et al. (2015) tentam inserir novas metodologias para a iluminação de estruturas em subsuperfície através da resposta de reflexão das ondas de corpo contidas no ruído ambiental. Os autores para mostrar a teoria proposta iniciam os artigos com uma explicação teórica e testes com dados sintéticos agregados a dados de sísmica convencional. Vidal et al. (2014) discute como suprimir a presença e dominância das ondas de superfície no ruído sísmico. Já Boullenger et al. (2015) mostra como a resolução através de dados oriundos de ruídos sísmicos varia em relação ao número de fontes e ao formato dos aglomerados dessas

fontes de ondas de corpo. A modelagem direta do problema é bem explicada em ambos os artigos, no entanto o processamento do dado real não fica muito explicitado, pois é descrito de forma reduzida no final desses artigos. Faltando clareza na evolução das etapas do processamento do sinal bruto. Boullenger et al. (2015) após um diagnóstico apurado do banco de dados seleciona apenas 3 dias de registros de um como conjunto de dados de 3 meses de dados. O autor processa a auto-correlação das componentes verticais, tanto dos hidrofones quanto dos geofones, em intervalos de 20 minutos e empilha o resultados até chegar em 24 horas de dados empilhados. Já Vidal et al. (2014) possui um total de 23 horas e 56 minutos de dado contínuo. Ele secciona esses dados em intervalos, ou painéis, de 10 segundos de largura como 7.5 segundos de sobreposição entre os painéis. Ambos os autores aplicaram o diagnóstico de iluminação para suprimir as ondas de superfície do conjunto de dados, no caso de Vidal et al. (2014) de 34.434 painéis apenas 5 não eram dominados por ondas de superfície, e somente 4 possuíam dados confiáveis da resposta de reflexão.

UTILIZAÇÃO DE RUÍDO SÍSMICO PARA FINS AMBIENTAIS

Microsismos são vibrações contínuas da Terra observadas entre grandes terremotos. Gerstoft et al. (2008) argumenta que a maior parte dos estudos com microsismos são focados em energia de baixa frequência (0.05 - 0.5 Hz) se propagando como ondas de superfície. No entanto como já foi mostrado na unidade anterior também existe energia que se propaga como onda de corpo (ondas P). Os trabalhos aqui apresentados irão focar o uso das ondas de corpo para investigar a altura das ondas do mar, Bromirski et al. (1999), e para localizar tempestades distantes, Gerstoft et al. (2008).

A caracterização das ondas de corpo no ruído sísmico ambiental foi bastante explicitada na unidade passada, agora pode-se ver inúmeras aplicações, tanto na área da exploração quanto na pesquisa ambiental. O trabalho de Bromirski et al. (1999), mesmo sendo antigo, consegue englobar muito bem todas as qualidades que fizeram o ruído sísmico ganhara notoriedade nessa última década, além de mostrar essa possibilidade de recuperar séries temporais históricas de variabilidade da altura das ondas do oceano e a correlação com dados meteorológicas. Isso é bastante inovador e necessário, pois tem-se muitas lacunas nos dados meteorológicos recentes, além de uma baixa cobertura, porém já tem-se grande parte das regiões costeiras do globo terrestre coberta por estações sismográficas de banda larga. Gerstoft et al. (2008) já faz considerações sobre a geração das ondas de corpo no ruído sísmico, além ligação entre grandes tempestades marinhas em águas profundas e as ondas de corpo contidas no ruído sísmico ambiental. Além disso, também mostra que as ondas de corpos possuem uma energia concentrada nas altas frequências na banda do microsismo secundários, porém às vezes estão associadas a eventos específicos.

Metodologia aplicada para fins ambientais

A metodologia é proposta pelos dois autores difere um pouco, além de objetivos diferentes possuem um banco de dados diferentes. Bromirski et al. (1999) busca em seu artigo comparar dados oriundos de boias meteorológicas com dados oriundos de estações sismográficas de banda larga. Essa comparação se faz em grande parte pela análise da semelhança dos espectros desses dois tipos de banco de dados. Já Gerstoft et al. (2008) utiliza a técnica da beamforming para poder localizar as fontes das grandes tempestades marinhas em águas profundas.

Banco de dados e pré-processamento

O banco de dados para o utilizado nesses dois artigos é composto por: dados de bóias meteorológicas próximas à costa, e uma estação de banda larga na costa da Califórnia em vários períodos, Bromirski et al. (1999), e 155 componentes verticais de estações de banda larga no sul da Califórnia num intervalo de 1 ano de dado (2006). Uma das únicas etapas de pré-processamento informada pelos dois autores, é a decimação em 1 Hz dos registros nas estações sismográficas, e Gerstoft et al. (2008) mostra que foi retirado a resposta instrumental dos registros nas estações e feita a normalização na frequência.

Processamento dos dados

Bromirski et al. (1999) na comparação entre os dados das bóias meteorológicas e das estações sismográficas é feita por características espectrais. O processamento nas bóias foi feito da seguinte maneira, calculou-se as estimativas das densidades espectrais em segmentos de 1024 segundos, já nas estações sismográficas 512 segundos com sobreposição de 256 segundos, essa segmentação do registro na base 2 é feita para aumentar otimizar o cálculo das transformadas de Fourier do sinal. Após o cálculo das estimativas espectrais fez uma média e empilhou-se os segmentos em intervalos de 1 em 1 hora, assim os dois bancos de dados são correspondentes em tamanho e podem ser comparados. Com as funções de densidade espectrais calculadas pode-se estimar, nesses dois banco de dados distintos, a altura de ondas do mar. Além disso também reconstruiu-se este mesmo parâmetro para diferentes épocas, para testar a influência da atividade marinha próximas à costa. Já Gerstoft et al. (2008) também segmenta o dado oriundo das estações sismográficas em intervalo de 512 segundos e computa a densidade espectral cruzada com empilhamentos de 3 horas de tamanho. E partir daí foi computado a beamformer nesses intervalos de 3 horas. E através da projeção inversa pode-se identificar de qual parte do mundo é oriundo a energia da onda P observada na rede sismográfica. Também fez-se a projeção inversa para diferentes períodos do ano para tentar identificar variabilidade sazonais nas fontes desse ruído.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados nos artigos discutidos acima possuem uma fundamentação tanto teórica quanto em dados muito boa, exceto nos trabalhos de Vidal et al. (2014) e Boullenger et al. (2015) que não apresentaram dados e resultados coerentes com o objetivo proposto. Por exemplo, Boullenger et al. (2015) compromete bastante o objetivo que era fazer um recorte no tempo pré e pós a injeção de CO_2 . Já Vidal et al. (2014) possui uma quantidade de dado disponível muito pequena, tanto que após a aplicação da técnica formulada uma parcela muito pequena de dados restaram, o que inviabilizou o objetivo proposto para o trabalho.

O trabalho de Bromirski et al. (1999) mostra que podem haver discrepâncias na estimativa da altura das ondas obtidas por esses dois conjuntos de dados devido a atividades climáticas intensas, no entanto a técnica mostrou bastante estável e conseguiu atingir o objetivo apresentado.

CONCLUSÕES

Com o fim desta unidade pode-se caminhar por inúmeras aplicações da interferometria sísmica utilizando o ruído sísmico. É importante salientar os diversos tipos de processamentos de dados apresentados, além de poder ver a integração desse tipo de dado com dados oriundos de diferentes áreas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Bensen, G. D., M. H. Ritzwoller, M. P. Barmin, A. L. Levshin, F. Lin, M. P. Moschetti, N. M. Shapiro, and Y. Yang, 2007, Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements: **169**, 1239–1260.
- Boullenger, B., A. Verdel, B. Paap, J. Thorbecke, and D. Draganov, 2015, Studying CO_2 storage with ambient-noise seismic interferometry: A combined numerical feasibility study and field-data example for ketzin, germany: **80**, Q1–Q13.
- Bromirski, P. D., R. E. Flick, and N. Graham, 1999, Ocean wave height determined from inland seismometer data: Implications for investigating wave climate changes in the NE pacific: **104**, no. C9, 20753–20766.
- Campillo, M., and A. Paul, 2003, Long-range correlations in the diffuse seismic coda: **299**, 547–549.
- Gerstoft, P., P. M. Shearer, N. Harmon, and J. Zhang, 2008, Global p, PP, and PKP wave microseisms observed from distant storms: **35**, L23306.
- Li, Y.-G., P. Chen, E. Cochran, J. Vidale, and T. Burdette, 2006, Seismic evidence for rock damage and healing on the san andreas fault associated with the 2004 m 6.0 parkfield earthquake: **96**.
- Nakata, N., W. Tanaka, and Y. Oda, 2015, Damage detection of a building caused by the 2011 tohokuoki earthquake with seismic interferometry: **105**, 2411–2419.
- Poli, P., H. A. Pedersen, M. Campillo, and the POLENET/LAPNET Working Group, 2012, Emergence of body waves from cross-correlation of short period seismic noise: **188**, 549–558.
- Prieto, G. A., J. F. Lawrence, A. I. Chung, and M. D. Kohler, 2010, Impulse response of civil structures from ambient noise analysis: **100**, 2322–2328.
- Roux, P., K. G. Sabra, P. Gerstoft, W. A. Kuperman, and M. C. Fehler, 2005, P-waves from cross-correlation of seismic noise: **32**, L19303.
- Shapiro, N. M., and M. Campillo, 2004, Emergence of broadband rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise: **31**, L07614.
- Snieder, R., and E. Safak, 2006, Extracting the building response using seismic interferometry: Theory and application to the millikan library in pasadena, california: **96**, 586–598.
- Vidal, C. A., D. Draganov, J. v. d. Neut, G. Drijkoningen, and K. Wapenaar, 2014, Retrieval of reflections from ambient noise using illumination diagnosis: **198**, 1572–1584.
- Wapenaar, K., D. Draganov, R. Snieder, X. Campman, and A. Verdel, 2010, Tutorial on seismic interferometry: Part 1 — basic principles and applications: **75**, 75A195–75A209.
- Zaccarelli, L., N. M. Shapiro, L. Faenza, G. Soldati, and A. Michelini, 2011, Variations of crustal elastic properties during the 2009 l’aquila earthquake inferred from cross-correlations of ambient seismic noise: **38**, L24304.