



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

JOYCE RIBEIRO SILVA

**ESTUDO DA RAZÃO ESPECTRAL HORIZONTAL PELA VERTICAL
(HVSr) NA REGIÃO ADMINISTRATIVA DA FERCAL – DF**

Brasília - DF

2023

JOYCE RIBEIRO SILVA

**ESTUDO DA RAZÃO ESPECTRAL HORIZONTAL PELA VERTICAL
(HVSr) NA REGIÃO ADMINISTRATIVA DA FERCAL – DF**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Giuliano Sant'Anna Marotta

Coorientador: Prof. Dr. George Sand L. A. de França

Brasília - DF

2023

JOYCE RIBEIRO SILVA

**ESTUDO DA RAZÃO ESPECTRAL HORIZONTAL PELA VERTICAL
(HVSr) NA REGIÃO ADMINISTRATIVA DA FERCAL – DF**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Brasília, 14 de dezembro de 2023:

Prof. Dr. Giuliano Sant'Anna Marotta

Orientador

Prof. Dr. George Sand L. A. de França

Coorientador

Prof^a. Dra. Mônica Giannoccaro Von Huelsen

Banca Examinadora

MSc. Daniele Ingredy Gomes Silva

Banca Examinadora

AGRADECIMENTOS

As sábias palavras de Raul Seixas ecoam com força neste momento: "um sonho que se sonha só é só um sonho que se sonha só, mas sonho que se sonha junto é realidade". E é verdade que o resultado que agora se apresenta não é apenas fruto de um esforço individual, mas sim de um sonho coletivo que foi compartilhado por inúmeras pessoas, para as quais passo a agora agradecer.

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado um refúgio de esperança quando a desesperança pairou sobre minha vida.

A minha amada mãe, Joelma, e ao meu namorado, Cadu, que me apoiaram e incentivaram em todas as minhas escolhas. Vocês foram os meus pilares durante essa jornada, me dando força e amor incondicional.

Ao meu metódico orientador, Giuliano, e meu coorientador brincalhão, Sand, pela confiança, compreensão e orientação. Vocês me ensinaram muito.

Aos amigos de curso, em especial a minha amiga Melissa, por ter me ensinado o significado de resiliência e determinação. Sou grata por tê-la como amiga.

Ao Observatório Sismológico, que teve uma participação fundamental no meu desenvolvimento profissional e me ofereceu oportunidades de aprendizado.

A cada um de vocês, expresso meus sinceros agradecimentos.

*“Todos os nossos sonhos podem se tornar realidade, se tivermos a coragem de
persegui-los”*

Walt Disney

RESUMO

Em 1989, Nakamura mostrou que a razão espectral entre os componentes horizontal e vertical pode ser usada para estimar a frequência de ressonância e amplificação do movimento do solo influenciado por uma camada superficial. Desde então, essa abordagem tem sido utilizada para caracterizar o risco sísmico de pequena magnitude e fornecer informações detalhadas para o micro zoneamento sísmico em áreas urbanas. Em princípio, este procedimento tem várias vantagens, pois, pode ser realizado por meio de apenas uma estação sismográfica, de três componentes (Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical), e não há a necessidade de ocorrência de um evento sísmico, uma vez que são analisados os ruídos (microtremores) presentes no sinal. Portanto, diante das vantagens da abordagem descritas, e com objetivo de identificar frequências de ressonância e profundidades de estruturas rasas, este trabalho buscou utilizar o método de razão espectral horizontal para vertical de microtremores (HVSR) em uma área na Região Administrativa da Fercal, localizada no Distrito Federal. E após aquisição, tratamento e processamento dos dados, os resultados permitiram identificar estruturas, ou profundidades de camadas de solo e rocha com diferentes propriedades físicas, permitindo sugerir grande eficácia do método em mapear heterogeneidades rasas.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1. ONDAS SÍSMICAS	9
2.2. RUÍDO AMBIENTE	9
2.3. RAZÃO H/V	11
3. ÁREA DE ESTUDO.....	12
3.1. LOCALIZAÇÃO	12
3.2. GEOLOGIA LOCAL.....	14
4. MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1. AQUISIÇÃO DE DADOS	17
4.2. PROCESSAMENTO DE DADOS	20
4.2.1. Janelas de Tempo	20
4.2.2. Suavização	21
4.2.3. Taper	21
4.2.4. Filtro.....	21
4.2.5. Combinação das Componentes Horizontais.....	22
4.3. CRITÉRIOS DE QUALIDADE DOS DADOS.....	22
4.4. PROCEDIMENTO DE INVERSÃO	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
6. CONCLUSÃO.....	29
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

1. INTRODUÇÃO

O crescimento urbano frequentemente ocorre sem um planejamento responsável para o uso e ocupação do espaço, o que representa um desafio crescente para o campo da engenharia e da geotecnia, e impulsiona a necessidade de projetos de construção cada vez mais complexos, muitas vezes em terrenos desfavoráveis que requerem adaptações significativas para acomodar essas estruturas (Teixeira, 2017).

Para garantir uma organização mais eficaz e um planejamento mais cuidadoso da ocupação do espaço físico, é imperativo não apenas considerar o meio biótico, mas também compreender a geologia em níveis locais e regionais (Gomes et al., 2022). Essa realidade desafia os pesquisadores a encontrarem metodologias de intervenção passiva, objetivando minimizar perturbação do solo e garantir que as comunidades já estabelecidas nessas áreas densamente habitadas não sejam impactadas negativamente (Teixeira, 2017).

Considerando o exposto, e possíveis limitações relacionadas à aplicação de métodos geofísicos em ambientes urbanos (Borges, 2007), este trabalho se concentrou no estudo de uma técnica denominada Razão Espectral da Horizontal pela Vertical (HVSZ) para estimativa de estruturas locais (Nakamura, 1989), por meio da análise dos valores de frequência e da inversão das curvas obtidas por meio de dados de ruídos naturais do solo que são observados em sinais sísmicos. A área, utilizada para o desenvolvimento deste estudo foi a Região Administrativa da Fercal, localizada no Distrito Federal.

Cabe aqui ressaltar que a HVSZ vem sendo utilizada para estimar a frequência de ressonância e amplificação de movimentos do solo influenciados por uma camada superficial, e que nos últimos anos, essa técnica tem ganhado destaque devido à sua acessibilidade e à rapidez na obtenção de resultados, além de ter demonstrado ser útil em estudos de bacias sedimentares (Gomes et al., 2022), falhas (Mitjanas et al. 2021), prospecção mineral (da Costa et al., 2018) e em ambientes urbanos (Antunes, 2019), visto que pode ser aplicada em áreas com baixa a média atividade sísmica, uma vez que não requer a ocorrência de um sismo para gerar resultados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ONDAS SÍSMICAS

Os tremores de terra possuem origens diversas, decorrem do deslocamento natural das placas litosféricas, do movimento de falhas no interior dessas placas, da atividade vulcânica, de desabamentos em cavernas, além de causas antrópicas, por exemplo, denotação de dispositivos explosivos. Em todas essas situações geram-se vibrações sísmicas que se propagam em todas as direções na forma de onda.

As ondas sísmicas são ondas mecânicas, isto é, são deformações elásticas que se propagam pelo interior da Terra transportando energia (Santos & Aguiar, 2012). E como qualquer onda, as ondas sísmicas podem ser caracterizadas por seu comprimento de onda, período, frequência e amplitude.

Em função da direção na qual a deformação se propaga, pode-se classificá-las como ondas longitudinais ou transversais. Nas ondas longitudinais (ondas P), as partículas do meio vibram paralelamente à direção de propagação, o que gera movimentos de dilatação/compressão, e nas ondas transversais (ondas S), as vibrações são perpendiculares à direção de propagação da onda, que correspondem a deformações tangenciais.

Ondas P (primárias) e S (secundárias) são chamadas de ondas de corpo por se propagarem dentro de um meio e, além delas, existem ondas superficiais, que podem ser do tipo Love ou Rayleigh. A onda Love possui padrão de interferência da onda S com ela mesma, enquanto a onda Rayleigh é uma combinação da onda P com a onda S contidas no plano vertical.

2.2. RUÍDO AMBIENTE

Perpetuamente, a Terra apresenta vibrações constantes, caracterizadas por pequenas amplitudes da ordem de 10^{-4} a 10^{-2} cm (Okada e Suto, 2003), conhecidas como ruído sísmico ambiental, que podem ser causadas por ondas dos oceanos, influências atmosféricas e, também, por ações antrópicas. Como exemplo, os diversos elementos que fazem parte de uma cidade, como o deslocamento de pessoas, circulação de veículos automotores e operação de maquinário industrial,

desempenham um papel na criação do ruído sísmico global (Bormann & Wielandt, 2013).

O estudo do ruído sísmico se tornou relevante apenas na segunda metade do século XX, quando a instrumentação permitiu a obtenção de registos digitais de qualidade. Entretanto, desde o fim do século XIX este tipo de movimento do solo foi observado (Bertelli, 1872). Aki (1957), Akamatsu (1961) e Kanai (1961) demonstraram que o ruído sísmico abriga informações importantes acerca das propriedades do solo e suas reações durante um terremoto.

Quanto à sua origem, o ruído ambiente pode ser categorizado em duas classes: natural e antrópica. Os ruídos de origem natural são denominados como microssismos, enquanto os de origem antrópica são intitulados microtremores (Bonney-Claudet et al., 2006). Os microtremores podem ser diferenciados dos microssismos a partir da frequência de suas ondas. Frequências abaixo de 1 Hz são predominantemente de fontes naturais, entre 1 a 5 Hz podem ser tanto de origem natural quanto antrópica, e acima de 5 Hz são majoritariamente de fontes antrópicas (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Resumo das fontes de ruído ambiente de acordo com a frequência (Gutenberg, 1958; Asten, 1978; Asten & Henstridge, 1984).

FONTE DO RUÍDO	Gutenberg (1958)	Asten (1978, 1984)
Ondas oceânicas junto à linha de costa	0,05 – 0,1 Hz	0,5 – 1,2 Hz
Monções/ perturbações meteorológicas de grande escala	0,1 – 0,25 Hz	0,16 – 0,5 Hz
Ciclones sobre o oceano	0,3 – 1 Hz	0,5 – 3 Hz
Condições meteorológicas em escala local	1,4 – 5 Hz	
Sismos de origem vulcânica	2 – 10 Hz	
Ruído urbano	1 – 100 Hz	1,4 – 30 Hz

Nogoshi e Igarashi (1971) foram os primeiros a proporem a aquisição dos dados de ruído sísmico com uma única estação, o método ficou conhecido como Razão Espectral Horizontal pela Vertical, ou somente HVSR (do inglês *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*). Posteriormente, Nakamura (1989) contribuiu para a

disseminação desse método, que envolve a normalização dos espectros de amplitude registrados nas componentes horizontal e vertical.

2.3. RAZÃO H/V

De acordo com Nakamura (1989), a curva HVSR é dada a partir das medições das três componentes das formas de onda do ruído ambiente no domínio da frequência, conforme mostrado na Equação 2.1.

$$HVSR(f) = \sqrt{\frac{NS^2(f)+EW^2(f)}{2 \cdot V^2(f)}} \quad (2.1)$$

Portanto, a Razão Espectral H/V, é determinada pelo cálculo que relaciona a razão entre a média dos quadrados das componentes horizontais ($NS(f)$ e $EW(f)$) com o espectro de amplitude da componente vertical ($V(f)$).

Os traços sísmicos, em termos de análise de sinais no domínio do tempo, são vistos como o resultado da convolução entre as informações da fonte de ruído do ambiente (S), caminho de propagação da onda (P) resposta do meio geológico (T) e resposta do instrumento (I) (Bao et al., 2018). Assim, as componentes horizontais $H(t)$ e a componente vertical $V(t)$ do sinal no domínio do tempo (t) são descritas por:

$$H(t) = S(t) * P(t) * T_H(t) * I(t) \quad (2.2)$$

$$V(t) = S(t) * P(t) * T_V(t) * I(t) \quad (2.3)$$

As Equações 2.2 e 2.3 podem ser transformadas para o domínio da frequência (f), permitindo que a razão entre o espectro horizontal $H(f)$ e vertical $V(f)$ seja representada pela Equação 2.4, como ilustrado a seguir.

$$\frac{H(f)}{V(f)} = \frac{T_H(f)}{T_V(f)} \quad (2.4)$$

De acordo com a Equação 2.4, verifica-se que as influências do ruído do ambiente, o caminho de propagação e a resposta do instrumento são eliminados do sinal, obtendo-se somente as características de frequência do efeito do local (Nakamura, 1989; Lermo e Chavez-Garcia, 1993; Chen et al., 2009).

Sabe-se que a frequência de ressonância (f_R), ou frequência de pico, da curva HVSR está relacionada com a espessura de solo (h) (Nishitsuji et al., 2014), ou seja, a principal interface de uma camada sedimentar pode estar correlacionada com a frequência de ressonância (f_R) (Nakamura, 1989; Seht e Wohlenberg, 1999; Mucciarelli et al., 2003; Panou et al., 2005), na qual a relação entre a frequência de ressonância e a espessura de uma camada sedimentar é determinada pela equação abaixo:

$$f_R = \frac{\bar{v}_S}{4h} \quad (2.5)$$

onde \bar{v}_S é a velocidade média da onda S dentro dos pacotes sedimentares e h é a espessura da camada sedimentar. Por consequência, dada a velocidade média da onda S a espessura pode ser calculada.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo (Figura 3.1) está inserida na Região Administrativa da Fercal, localizada na porção norte do Distrito Federal, que faz divisa com o estado de Goiás. A região é caracterizada por construções simples e operações de mineração ativa na indústria de cimento, sendo a principal fonte de matéria prima para a construção civil do Distrito Federal. Está situada 25 km a norte da Universidade de Brasília, com acesso pelas rodovias DF-150 e DF-205.

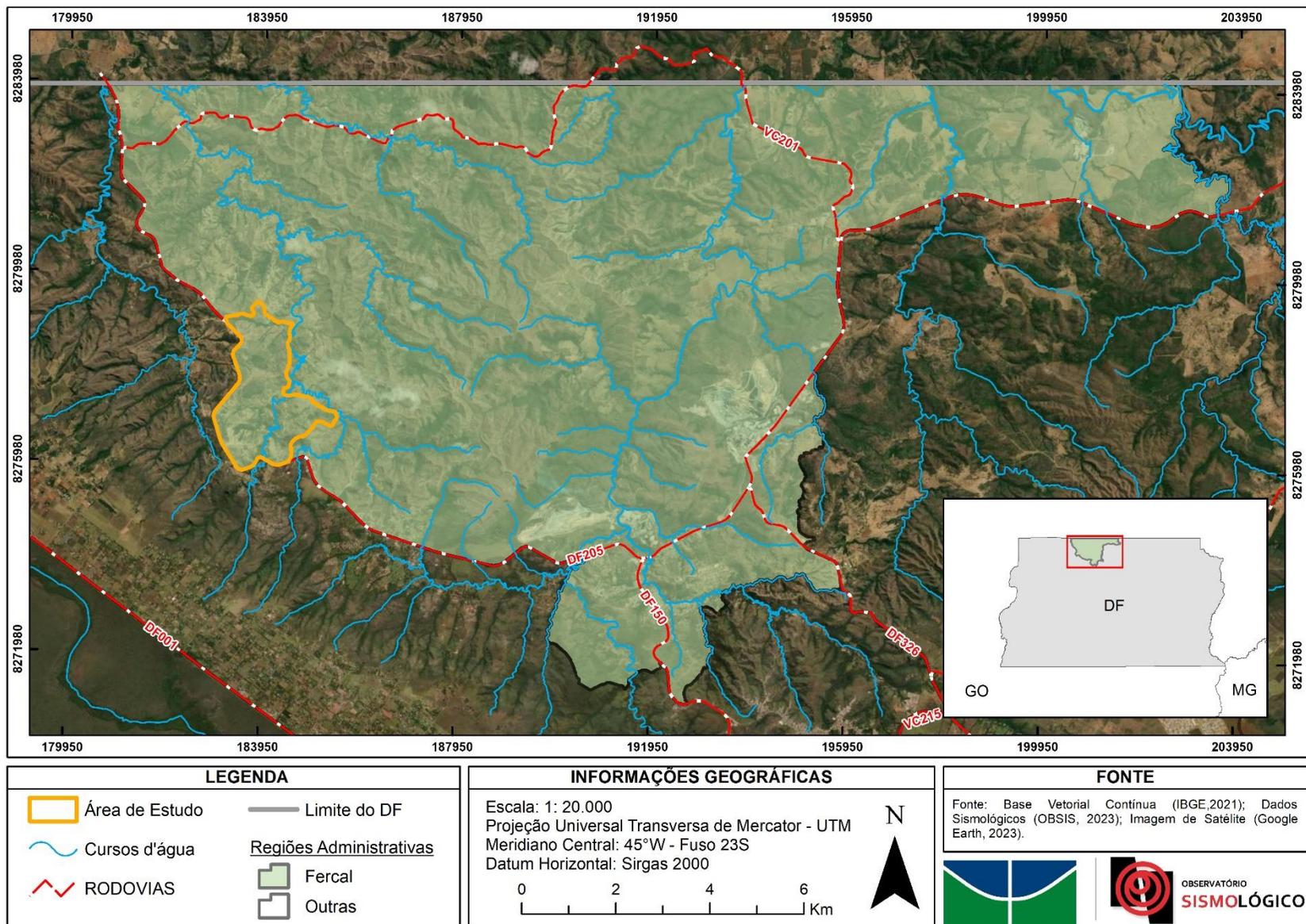


Figura 3.1 – Localização da área de estudo.

3.2. GEOLOGIA LOCAL

A área de estudo do presente trabalho está inserida na porção central da Província Tocantins (Almeida et al., 1977; Almeida e Hasui, 1984), de idade neoproterozóica, mais especificamente na região central do Orógeno Brasília.

De acordo com Almeida et al. (1977, 1981) e Almeida e Hasui (1984), a Província Tocantins formou-se a partir de um evento orogênico neoproterozóico que se desenvolveu em consequência da colisão dos crátons São Francisco, Amazônico e Paranapanema. Essa província é compreendida por três cinturões de dobras e cavalgamento, os quais se formaram durante a amalgamação do Gondwana Central há cerca de 930 - 800 Ma (Almeida et al., 1981; Brito Neves e Cordani, 1991; Brito Neves et al., 1999; Frasca, 2015), denominados faixas Araguaia e Paraguai próximos ao Cráton Amazônico, e a Faixa Brasília próxima ao Cráton São Francisco.

A Faixa Brasília constitui um complexo cinturão de dobras e cavalgamentos com aproximadamente de 1100 km de extensão ao longo da margem do Cráton São Francisco (Pimentel et al., 2011). Fuck et al. (1994) segregaram a Faixa Brasília em cinco compartimentos geotectônicos, nos quais a intensidade de metamorfismo aumenta de leste para oeste, respectivamente, nas zonas denominadas Interna, Externa e Zona Cratônica. Ainda, a faixa Brasília é composta pelos compartimentos Maciço de Goiás e Arco Magmático de Goiás.

A Zona Externa, compartimento no qual a área de estudo está inserida, é composta por unidades mesoproterozoicas metassedimentares, apresenta deformação do tipo thin-skinned (sem envolvimento do embasamento) e é composta predominantemente pelos Grupos Araí, Natividade, Paranoá e Canastra, além de porções do embasamento Arqueano-Proterozoico. Uhlein et al. (2012) destacam ainda a existência da unidade estrutural do Cráton do São Francisco a leste da Unidade Externa, sendo formada pelas unidades autóctones dos Grupos Bambuí e Vazante, formadas por sedimentos argilo-carbonáticos suavemente dobrados a sub-horizontais, com extensas coberturas fanerozóicas. Estas unidades se associam por meio de sistemas de falhas de empurrão de baixo a médio ângulo, expondo as unidades mesoproterozóicas dos Grupos Paranoá e Canastra em meio às unidades dos Grupos Bambuí.

A região norte do Distrito Federal, local onde se encontra a Região Administrativa Fercal, é mapeada com a ocorrência de rochas dos grupos Paranoá e Bambuí, com a ocorrência do grupo Canastra por meio de um sistema de empurrões responsável por expor as rochas da Formação Serra do Landim e do Membro Morro do Ouro (Figura 3.2). O Grupo Canastra possui aproximadamente 1040 Ma (Valeriano et al., 2004; Rodrigues et al., 2010), e é descrito como composto predominantemente por rochas metamórficas de baixo grau, como filitos, filitos carbonosos, calcifilitos e quartzitos. Esta associação de fácies é associada a uma plataforma continental formada por metassedimentos psamíticos e pelíticos com intercalações carbonáticas (Dardenne, 2000), onde ainda é possível encontrar feições sedimentares remanescentes à deformação orogênica (Da Silva et al., 2012). O Grupo Canastra possui quatro formações tendo, na base, a Formação Serra do Landim, que aflora na região de estudo e caracteriza-se pela presença de calcifilitos com raras intercalações quartzíticas. Em seguida, em direção ao topo, encontram-se as Formações Paracatu, Serra da Urucânia e Serra da Batalha (Dardenne, 2000). Além da Formação Serra do Landim, foram identificados afloramentos de filitos classificados como pertencentes ao Membro Morro do Ouro, estratigraficamente localizado na base da Formação Paracatu.

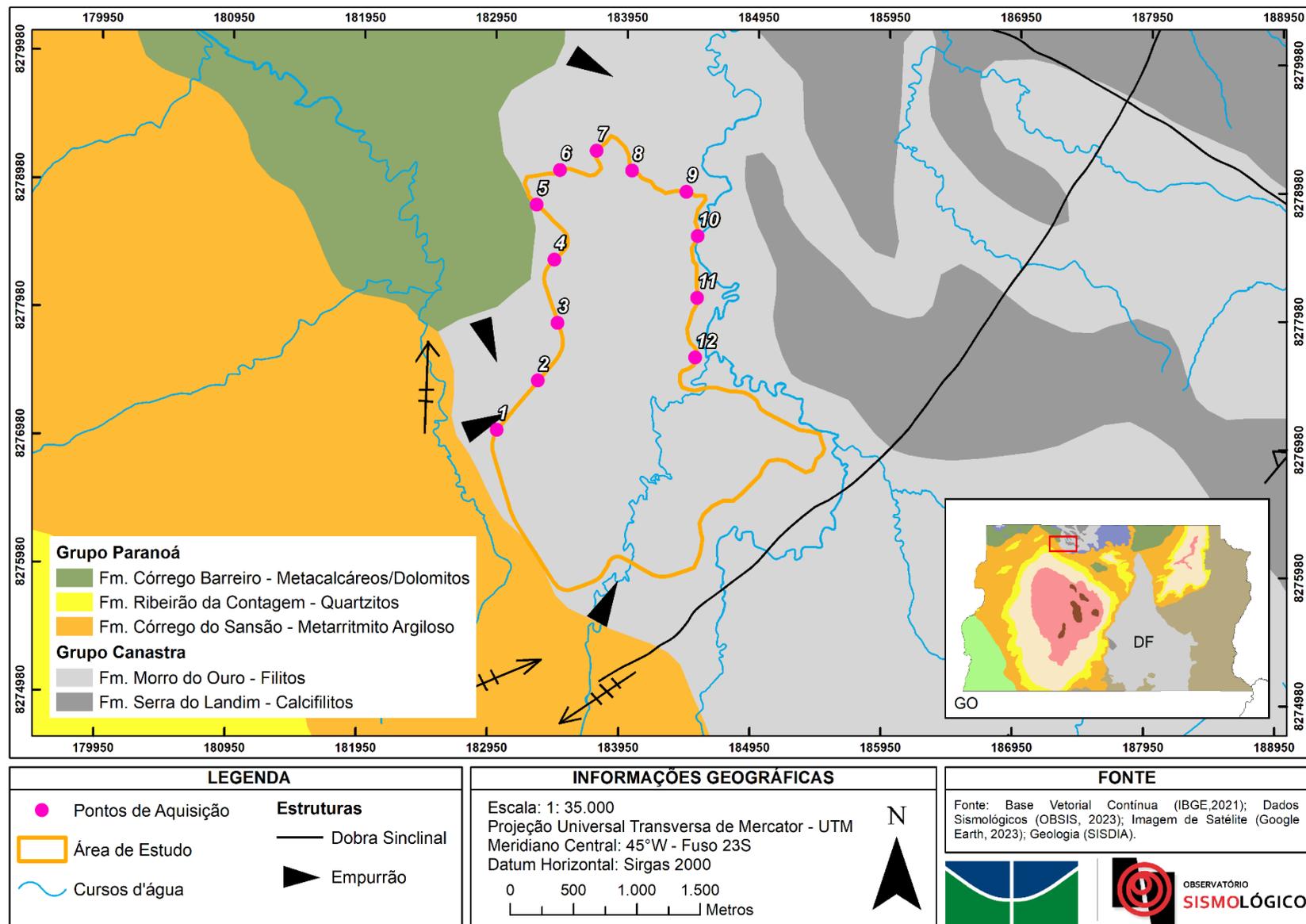


Figura 3.2 – Geologia da área de estudo (SISDIA-DF).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste trabalho, foram definidos 12 pontos, com espaçamento de aproximadamente 500 metros, ao longo do perímetro da área de estudo (Figura 4.1). Foi aplicada a técnica HVSR e foi utilizado um sismômetro digital de período curto de três componentes de aceleração/velocidade, denominado GEObit, fabricado pela GEObit. Este sismômetro possui um receptor GNSS acoplado, tanto para a aquisição das coordenadas quanto para proporcionar maior precisão na contagem do tempo no momento de coleta dos dados.

Para manter o funcionamento contínuo do sismômetro, foram utilizadas baterias de 12V. O posicionamento do sismômetro se deu em solo firme, encontrado após procedimento de escavação (Figura 4.2). Após posicionamento e fixação do sismômetro em cada ponto definido neste trabalho (Figura 4.3), procedeu-se a aquisição de dados e, para minimizar a influência dos ruídos antrópicos, a aquisição foi realizada em horários de pouco ou nenhum tráfego.

Para garantir que o sismômetro registre a movimentação do solo nas três direções (NS, EW e V), ele foi orientado com o norte, nivelado com o auxílio de uma placa de porcelana (Figura 4.3) e, posteriormente, enterrado para propiciar a estabilidade térmica.

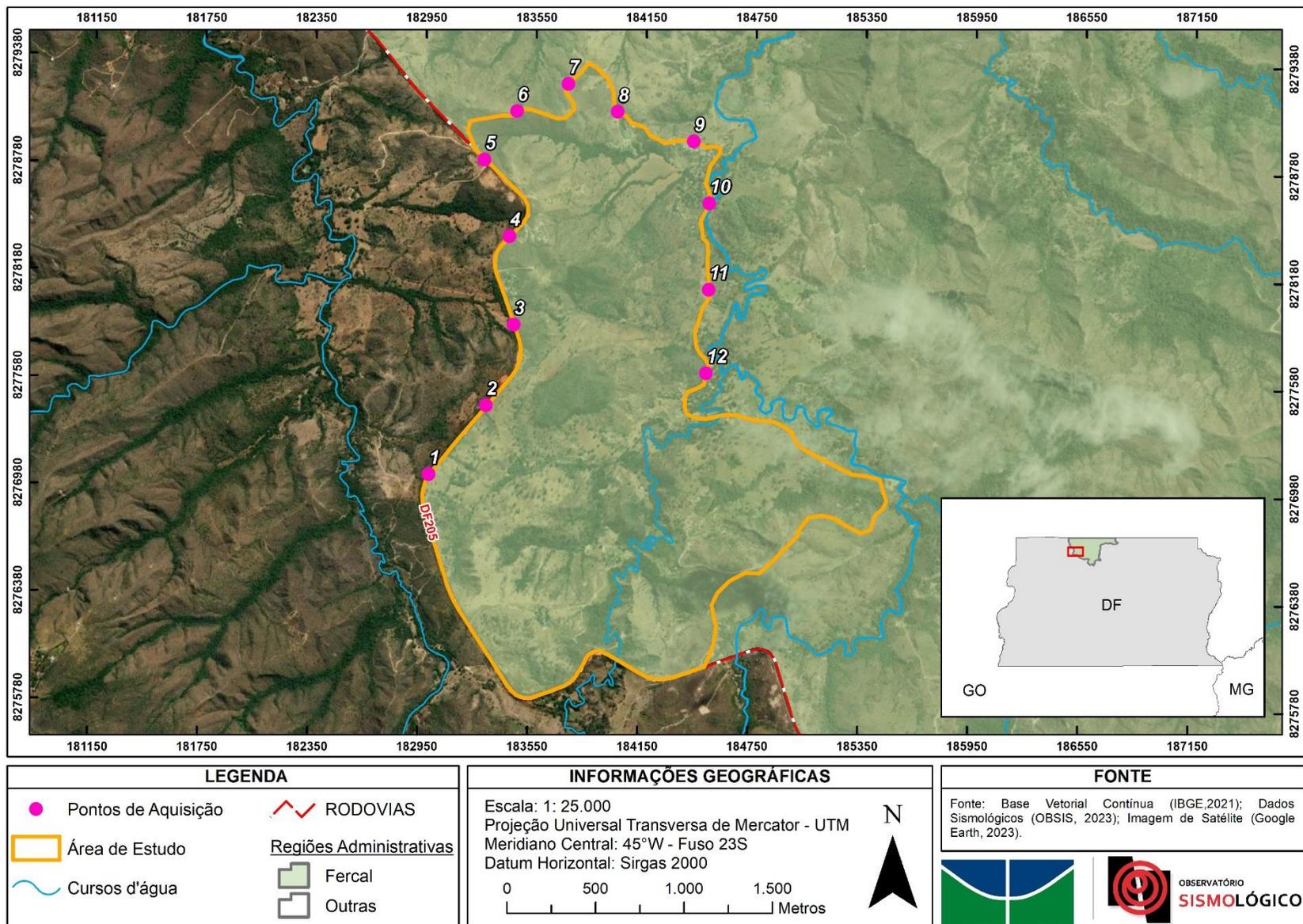


Figura 4.1 – Localização dos pontos de coleta de dados.

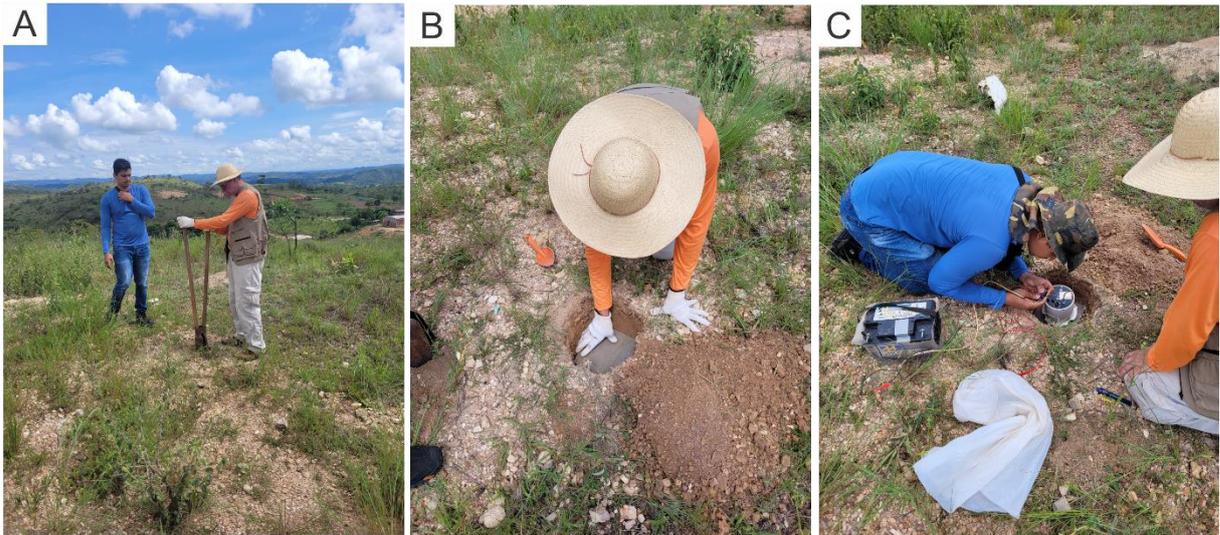


Figura 4.2 – A) Escavação do ponto. **B)** Instalação da placa de porcelana para nivelamento do sismômetro. **C)** Montagem do equipamento.

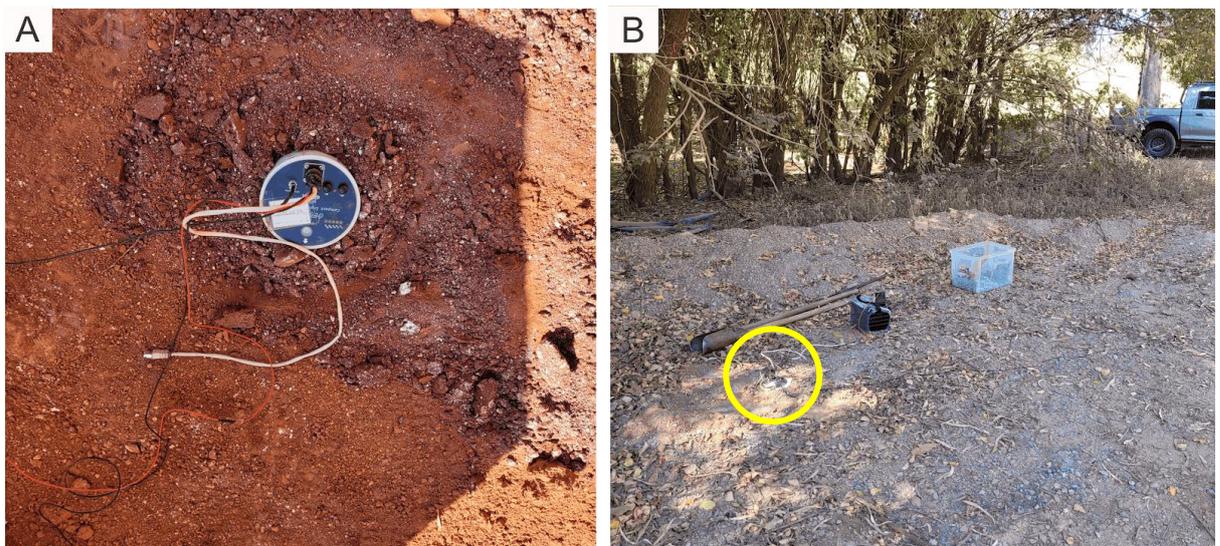


Figura 4.3 – A) Sismômetro GEOTiny acoplado ao chão. **B)** Sismômetro em destaque, juntamente com as demais ferramentas utilizadas no processo de coleta de dados.

Na aquisição dos dados, cada ponto se estabeleceu um tempo médio de 1 hora de registro, em consonância com as diretrizes definidas pelo *SESAME Project (Site Effects Assessment using Ambient Excitations)*, comissão que padronizou a coleta e o processamento de dados aplicados à técnica da razão espectral H/V. Essas diretrizes recomendam uma janela mínima para duração da gravação dos dados com o propósito de garantir que o processamento subsequente produza resultados satisfatórios.

A aquisição de dados em campo foi realizada no ano de 2023, em diferentes datas (15/05/2023, 18/05/2023, 22/05/2023, 09/08/2023 e 17/08/2023), cobrindo um período amplo de amostragem que se estendeu do final do período chuvoso até o período de seca.

4.2. PROCESSAMENTO DE DADOS

Neste trabalho foi calculada a frequência de vibração ao longo dos pontos com o objetivo de determinar heterogeneidades rasas em subsuperfície.

Inicialmente, os dados coletados no formato MSEED¹, registrados pelo sismômetro, foram cortados, uma vez que na maioria das vezes um único arquivo carregava informações de mais de um ponto. O processamento ocorreu através do *software* Geopsy, que se baseia no algoritmo J-SESAME, produzido pelo SESAME Project (Bard & participants, 2004). O cálculo da Razão Espectral H/V foi realizado seguindo as seguintes fases:

1. Importação do sinal de três componentes em formato MSEED;
2. Estabelecimento e verificação dos parâmetros para as janelas temporais; e
3. Cálculo da curva H/V, utilizando os parâmetros previamente definidos, e armazenamento dos resultados.

4.2.1. Janelas de Tempo

Define-se a janela de tempo de acordo com a faixa de frequência natural desejada. A frequência mínima é calculada pela razão $10/l_w$, onde l_w é o tamanho da janela. Já a frequência máxima obtida é definida pela frequência de Nyquist, que é a taxa de amostragem dividida por 2.

Para todos os pontos foram definidas janelas de 60 segundos, de modo que a frequência mínima obtida será de aproximadamente 0,17Hz, resultado de $10/60$, e

¹ MSEED – Mini Standard Earthquake Exchange Data

como a amostragem dos dados é de 100 amostras por segundo, a maior frequência a que pode ser obtida é de 50Hz.

4.2.2. Suavização

Durante o procedimento de cálculo da Razão Espectral H/V, o espectro de amplitude de frequência pode ser suavizado para deixar mais claro o aspecto global da curva. Para isso, as componentes horizontais (NS e EW) foram combinadas e, em seguida, a suavização é aplicada.

O *software* Geopsy possui três métodos de suavização disponíveis, são eles: Constante, Konno & Omachi e Proporcional. O método de Konno & Omachi utiliza uma largura de banda constante em uma escala logarítmica. Essa suavização é controlada por uma constante, que varia de 0 a 100, sendo 0 a opção que produz alta suavização e 100 menor suavização. Nos dados desse trabalho, foi utilizado o método Konno & Omachi com uma constante de 40.

4.2.3. Taper

A função *taper* é utilizada para minimizar os feitos de borda causada na definição da janela, ela evita a criação de frequências espúrias. Foi definido o valor de 5% de *taper* cosseinodal para todos os dados de forma qualitativa.

4.2.4. Filtro

A filtragem é uma ferramenta essencial para o processamento de sinais, pois permite remover frequências que não são de interesse, como por exemplo frequências muito altas. Existem quatro tipos de filtro: i) passa-baixa: filtra as frequências acima de um determinado valor; ii) passa-alta: filtra as frequências abaixo de um determinado valor; iii) passa-banda: filtra as frequências de fora de um intervalo de frequência; e o iv) rejeita-banda: filtra as frequências de dentro de um intervalo de frequência. Nos dados desse trabalho, foi utilizado o filtro passa-banda de 0,2 Hz a 15Hz.

4.2.5. Combinação das Componentes Horizontais

O espectro de amplitude horizontal da Razão Espectral H/V é obtido combinando as componentes horizontais NS e EW. Há quatro tipos de combinação: média quadrática, energia total horizontal, média geométrica e energia direcional.

Nesse trabalho, foi utilizado o método de média quadrática. Nesse método, o espectro horizontal é calculado, em cada janela, como uma combinação das componentes horizontais NS e EW utilizando a Equação 2.1.

4.3. CRITÉRIOS DE QUALIDADE DOS DADOS

Após o processamento, os dados foram avaliados de acordo com os critérios de confiabilidade e de tipo de pico da curva, para validar os resultados. A confiabilidade garante que os resultados obtidos seriam os mesmos se fossem coletados novamente com os mesmos parâmetros e em local similar.

As diretrizes definidas pelo SESAME (2004), comissão que padronizou a coleta e o processamento de dados aplicados à técnica da razão espectral H/V, definem que para uma curva ser válida ela deve preencher alguns critérios (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Critério de confiabilidade dos resultados (Adaptado de SESAME, 2004).

CRITÉRIOS PARA CONFIABILIDADE DA CURVA HVSR		
i)	$f_0 > lw$	lw = tamanho da janela
ii)	$n_c(f_0) > 200e$	n_w = número de janelas selecionadas para a média da curva H/V
	$\sigma_A(f) < 2$ para $0,5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0,5Hz$	$n_c = lw * n_w * f_0$ = número de ciclos significantes
iii)	ou	f = frequência atual
	$\sigma_A(f) < 3$ para $0,5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0,5Hz$	f_{sensor} = frequência de corte do sensor
		f_0 = frequência do pico H/V
CRITÉRIOS PARA UM PICO H/V (MÍNIMO DE 5)		
i)	$\exists f^- \in \left[\frac{f_0}{4}, f_0 \right] A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	σ_f = desvio padrão do pico da frequência H/V ($f_0 \pm \sigma_f$)
ii)	$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	$\varepsilon(f_0)$ = valor limiar para condições de estabilidade $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
iii)	$A_0 > 2$	A_0 = amplitude do pico H/V na frequência f_0
iv)	$f_{pico} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f) = f_0 \pm 5\%]$	$A_{H/V}(f)$ = amplitude na curva H/V na frequência f
v)	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	f^- = frequência entre $f_0/4$ e f_0 para cada $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
vi)	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	f^+ = frequência entre f_0 e $4f_0$ para cada $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
		$\sigma_A(f)$ = "desvio padrão" de $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ é o fator pelo qual a curva média $A_{H/V}(f)$ deve ser multiplicada ou dividida
		$\theta(f_0)$ = valor limiar para condição de estabilidade $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

4.4. PROCEDIMENTO DE INVERSÃO

Além do cálculo da frequência de vibração, neste trabalho também buscou-se estimar o número de camadas em subsuperfície e a espessura dessas camadas por meio de procedimento de inversão. Para isto, foi utilizada uma rotina denominada Dinver, presente no pacote Geopsy, que consiste em um ambiente gráfico para resolver problema de inversão utilizando algoritmo de vizinhança ou amostragem de Monte Carlo (Gomes et al., 2022). Esta rotina foi originalmente preparada para inversão de curvas de dispersão (velocidades de Rayleigh, Love, Fase e Grupo, modos superiores), curvas de autocorrelação, curvas de elipticidade, picos de elipticidade e tempos de percurso de refração.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, as curvas da Razão Espectral H/V foram avaliadas conforme os critérios definidos na seção 4.3 deste trabalho. Posteriormente, os picos de frequência fundamentais das referidas curvas foram submetidos ao mesmo teste. As curvas que não satisfizeram os requisitos não foram incluídas nos resultados (Tabela 5.1), do mesmo modo que as curvas que atenderam aos requisitos, mas com picos não aprovados. Portanto, pelas premissas apresentadas, as curvas e/ou picos dos pontos 8, 10 e 12 (Figuras 3.2 e 4.1) não passaram nos testes.

Os principais picos (Figura 5.1) foram identificados seguindo metodologia e premissas apresentadas. Neste trabalho, foi possível definir três domínios entre as frequências obtidas. O primeiro (f_0) varia de 0,30 a 0,77 Hz, e pode ser observado em 8 pontos. O segundo (f_1) varia de 1,06 a 1,57 Hz, e foi identificado em 5 pontos. O último (f_2) varia de 2,32 a 3,38 Hz, observado em 5 pontos.

Tabela 5.1 – Tabela com os valores de frequências obtidas pelo método da Razão Espectral H/V e profundidade das descontinuidades.

Ponto	Elevação (m)	f0 (Hz)	Desvio Padrão	f1 (Hz)	Desvio Padrão	f2 (Hz)	Desvio Padrão
P1	920	0,31	0,27	1,57	0,30	3,08	0,26
P2	928	0,30	0,26	1,24	0,11	3,38	0,20
P3	921	-	-	-	-	2,47	0,07
P4	926	0,57	0,23	-	-	2,48	0,13
P5	916	0,62	0,19	1,12	0,06	2,32	0,07
P6	903	0,64	0,43	-	-	-	-
P7	894	0,77	0,14	1,15	0,07	-	-
P9	855	0,44	0,37	-	-	-	-
P11	860	0,50	0,45	1,06	0,07	-	-

As curvas H/V de cada ponto podem ser vistas na Figura 5.1. Apesar dos picos serem detectáveis, eles não são tão claros. Em relação as frequências naturais calculadas, cerca de 44% estão entre 0,3 e 1 Hz, enquanto 28% estão entre 1 e 2 Hz e 28% estão entre 2 e 3 Hz.

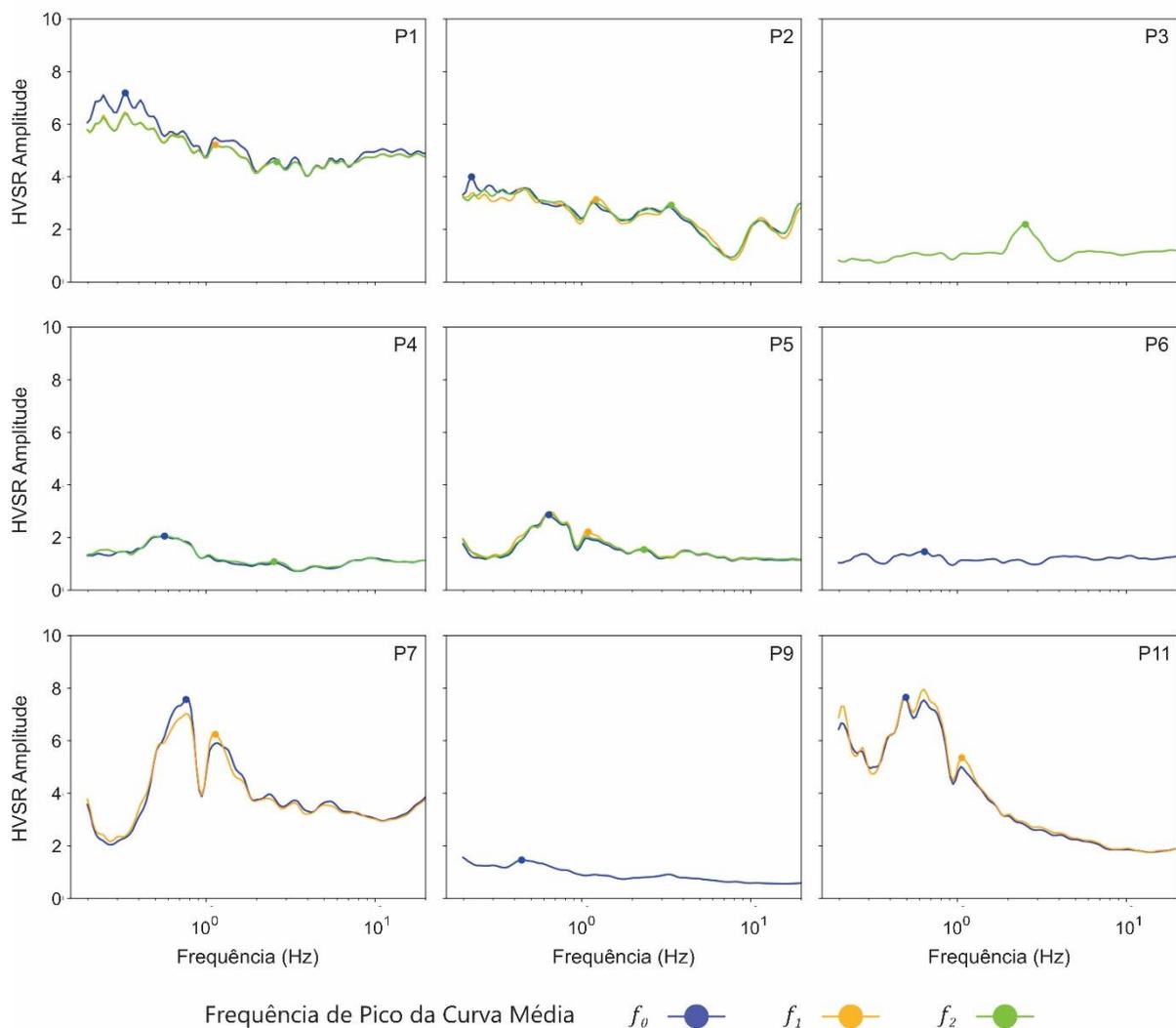


Figura 5.1 – Curvas médias HVSR. Os picos são representados em amplitude HVSR vs. frequência em Hz.

Após estimativa das curvas HVSR e aplicação do procedimento de inversão, os resultados são apresentados na Figura 5.2. Pelos resultados, não foi possível identificar descontinuidades passíveis de serem definidas, e isso pode estar relacionado ao fato de as curvas não apresentarem picos de frequência acentuados, que dificultou a identificação das descontinuidades no resultado do problema inverso.

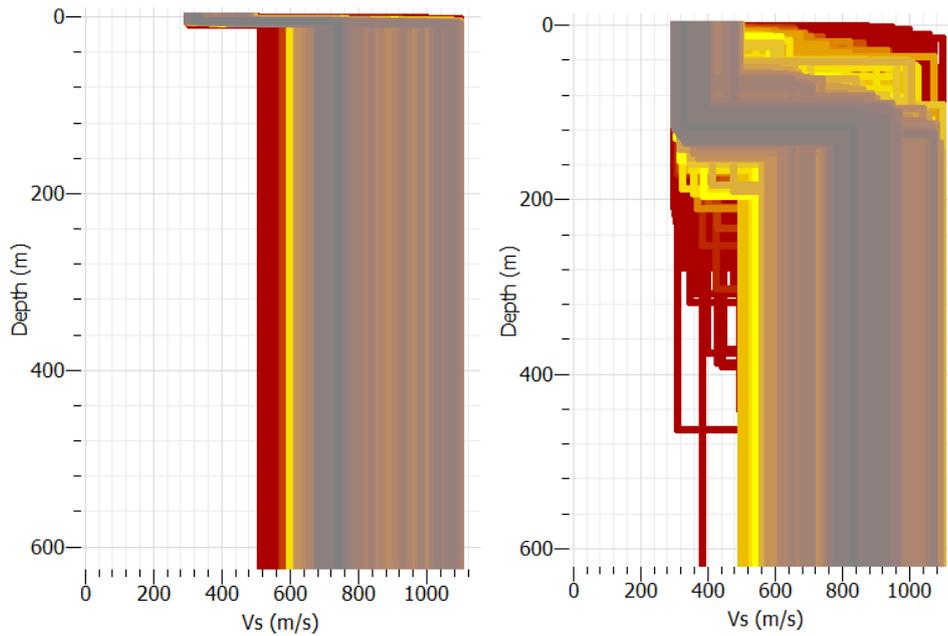


Figura 5.2 – Perfis de velocidade da onda S (m/s) vs. profundidade (m), dos pontos 3 e 9, respectivamente. Resultados da inversão da curva de elipticidade convertida das curvas H/V.

Como alternativa aos resultados obtidos no procedimento de inversão, utilizando a equação 2.5 e adotando velocidade média da onda S de 500 m/s (Wang e Li, 2018) para solos e rochas argilosas, foi possível calcular a profundidade das principais heterogeneidades rasas (Figura 5.3).

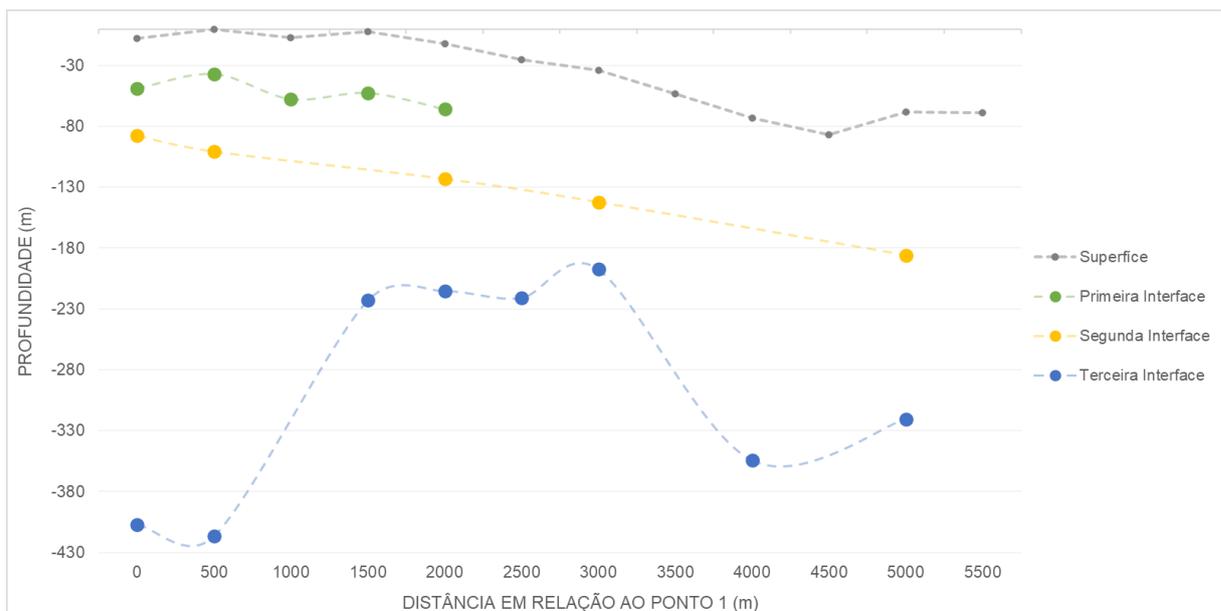


Figura 5.3 – Profundidades estimadas para as principais descontinuidade vs. distância em relação ao Ponto 1.

Pelos resultados apresentados na Figura 5.3, é possível identificar três descontinuidades proeminentes. A primeira interface possui uma profundidade média de 45 metros, enquanto a segunda possui espessura mínima de aproximadamente 80 metros e a terceira de aproximadamente 200 metros.

Por análise, considerando dados de um poço (5200011271), localizado a aproximadamente 80 metros do Ponto 1 e cujos dados (Figura 5.4) foram disponibilizados pelo SIAGAS², é possível verificar uma transição marcada a uma profundidade de 40 metros entre solo/rocha intemperizada e os Calcifilitos do Grupo Canastra. Visto que a profundidade estimada para a primeira descontinuidade no Ponto 1 foi de 40,6 metros, sugere-se similaridade entre as diferentes fontes de informação.

Seguindo a análise dos dados estimados com dados de poço, na segunda interface calculada, ao contrário da primeira, não foi possível encontrar similaridade entre as diferentes fontes de informação, porém, no relatório de perfilagem do poço, foi indicado que a entrada de água ocorreu em uma profundidade de 90 metros, enquanto nos registros do Ponto 1 essa interface foi identificada a 80 metros. Portanto, sugere-se que a diferença de 10 metros pode ser atribuída tanto para a distância entre o Ponto 1 e o poço de referência (aproximadamente 80 metros) quanto pela própria variação do nível freático ao longo do tempo. Dessa forma, notavelmente, a presença de água explicaria a segunda interface observada nos dados do Ponto 1, além de justificar a ausência de mudança litológica nos dados de perfilagem.

Por fim, a terceira interface estimada, com uma profundidade de 400 metros no Ponto 1, não pode ser correlacionada com os dados provenientes do poço, uma vez que este alcança apenas 142 metros de profundidade. Porém, a frequência associada a essa última interface foi identificada em quase todos os pontos, exceto no Ponto 3, o que mostra o maior contraste nas características físicas entre as litologias presentes.

² SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas.

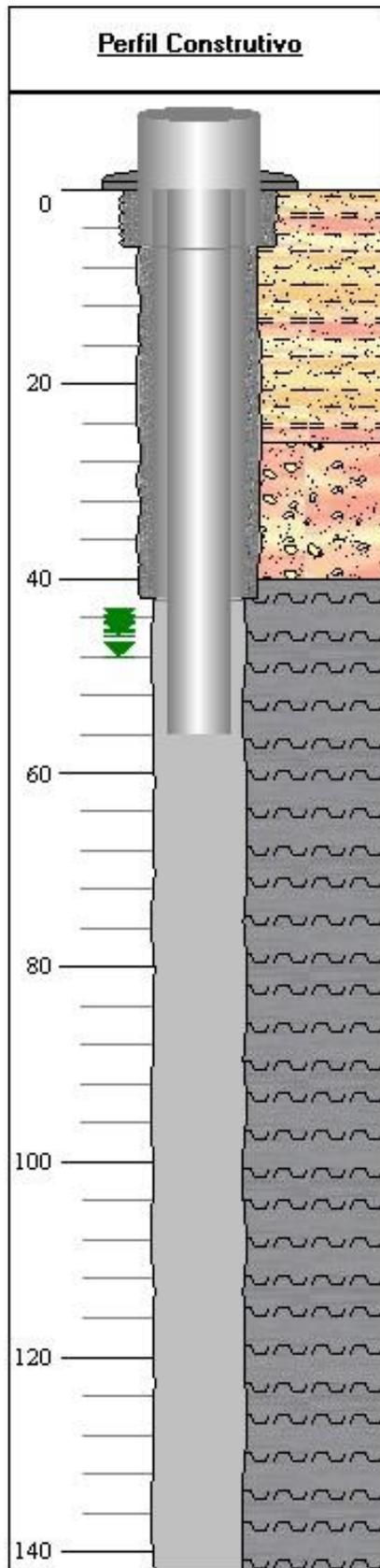


Figura 5.4 - Coluna litoestratigráfica do poço 5200011271 (SIAGAS), disponível em: <https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=5200011271>.

6. CONCLUSÃO

A técnica da Razão Espectral da Horizontal pela Vertical (HVSR) destaca-se como um método para realizar estimativas de estruturas locais em subsuperfícies. Essa abordagem se fundamenta na coleta de dados de ruído ambiental, gerando uma representação gráfica que relaciona frequência e amplitude.

Este trabalho se concentrou no estudo da técnica denominada Razão Espectral da Horizontal pela Vertical (HVSR) para estimativa de estruturas locais na Região Administrativa da Fercal, localizada na porção norte do Distrito Federal.

A análise dos valores de frequência da região, correlacionados com dados de poço, permitiu a estimativa de profundidade das principais heterogeneidades rasas. Contudo, o processo de inversão encontrou desafios, uma vez que os picos nas curvas HVSR não estavam tão claros, devido à baixa razão sinal-ruído e impactando negativamente nos resultados da inversão.

Apesar das dificuldades encontradas, as curvas obtidas foram compatíveis com o dado de poço, revelando a eficácia da técnica em mapear heterogeneidades rasas, incluindo o nível do lençol freático. Esta versatilidade destaca o potencial da HVSR para ser aplicada em diversas áreas, consolidando-a como uma ferramenta útil e abrangente para estudos geotécnicos e mapeamento de subsuperfície.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akamatsu, K. (1961). On microseisms in frequency range from 1 c/s to 200 c/s. *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ*, 39, 23-76.

Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415-456.

Almeida, F. F. M., Hasui, Y., de Brito Neves, B. B., & Fuck, R. A. (1981). Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2), 1-29.

Almeida, F. F. M. D. (1977). O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de geociências*, 7(4), 349-364.

Antunes, A. C. L. (2019). Caracterização da estrutura do terreno utilizando métodos não invasivos em meio urbano: contribuição da curva de elipticidade das ondas de Rayleigh.

Asten, M. W. (1978). Geological control on the three-component spectra of Rayleigh-wave microseisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(6), 1623-1636.

Asten, M. W., & Henstridge, J. D. (1984). Array estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins. *Geophysics*, 49(11), 1828-1837.

Bao, F., Li, Z., Yuen, D. A., Zhao, J., Ren, J., Tian, B., & Meng, Q. (2018). Shallow structure of the Tangshan fault zone unveiled by dense seismic array and horizontal-to-vertical spectral ratio method. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 281, 46-54.

Bard, P. Y., & Participants, S. E. S. A. M. E. (2004). The SESAME project: an overview and main results. In *Proc. of 13th World Conf. on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada, August (pp. 1-6).

Bertelli, T. (1872). Osservazioni sui piccoli movimenti dei pendoli in relazione ad alcuni fenomeni meteorologici del pd Timoteo Bertelli barnabita. *Tip. delle scienze matematiche e fisiche*.

Brito Neves, B. B., & Cordani, U. G. (1991). Tectonic evolution of South America during the late Proterozoic. *Precambrian Research*, 53(1-2), 23-40.

- Brito Neves, B. B., Neto, M. D. C. C., & Fuck, R. A. (1999). From Rodinia to Western Gondwana: an approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. *Episodes Journal of International Geoscience*, 22(3), 155-166.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., & Bard, P. Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review. *Earth-Science Reviews*, 79(3-4), 205-227.
- Borges, W. R. (2007). Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Bormann, P., & Wielandt, E. (2013). Seismic signals and noise. In *New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP2)* (pp. 1-62). Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.
- Chen, Q., Liu, L., Wang, W., & Rohrbach, E. (2009). Site effects on earthquake ground motion based on microtremor measurements for metropolitan Beijing. *Chinese Science Bulletin*, 54(2), 280-287.
- Dardenne, M. A. 2000. The Brasília Fold Belt In: Cordani U.G.; Milani E.J.; Thomaz Filho A.; Campos D.A. (Edit.). *Tectonic Evolution of South America*, v. 263, p. 231- 263 XXXI International Geological Congress.
- da Costa, L. M., do Brasil, S. S. G., & Belém, S. (2018). Sísmica Passiva na Prospecção Mineral.
- Frasca, A. A. S. (2015). Amálgamas do W-Gondwana na província Tocantins (Doctoral dissertation).
- Fuck, R. A., Pimentel, M. M., & Silva, L. J. H. D. (1994). Compartimentação tectônica da porção oriental da Província Tocantins. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 38, pp. 215-216). SBG Balneário Camboriú.
- Gomes, D. I., Franca, G. S., & Sayao, E. A. (2022, December). The Structure of the Água Bonita Basin, Brazil, from the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) Frequencies. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2022, pp. S15D-0233).
- Gutenberg, B. (1958). Microseisms. In *Advances in geophysics* (Vol. 5, pp. 53-92). Elsevier.

- Kanai, K. (1961). On microtremors. VIII. Bulletin of Earthquake Research Institute, 39, 97-114.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. Bulletin of the seismological society of America, 83(5), 1574-1594.
- Mitjanas, G., Ledo, J., Macau, A., Alías, G., Queralt, P., Bellmunt, F., ... & Figueras, S. (2021). Integrated seismic ambient noise, magnetotellurics and gravity data for the 2D interpretation of the vallès basin structure in the geothermal system of la garriga-samalús (NE Spain). Geothermics, 93, 102067.
- Mucciarelli, M., Gallipoli, M. R., & Arcieri, M. (2003). The stability of the horizontal-to-vertical spectral ratio of triggered noise and earthquake recordings. Bulletin of the Seismological Society of America, 93(3), 1407-1412.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30(1).
- Nishitsuji, Y., Ruigrok, E., Gomez, M., & Draganov, D. (2014). Global-phase H/V spectral ratio for delineating the basin in the Malargüe region, Argentina. Seismological Research Letters, 85(5), 1004-1011.
- Nogoshi, M. & Igarashi, T. (1971). On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2) (in Japanese with English abstract). Jour. Seism. Soc. Japan, 24, 26-40.]
- Okada, H., & Suto, K. (2003). The microtremor survey method. Society of Exploration Geophysicists.
- Panou, A. A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P., Stylianidis, K., & Papazachos, C. B. (2005). Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment: the case of the city of Thessaloniki (Northern Greece). Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25(4), 261-274.
- Pimentel, M. M., Rodrigues, J. B., DellaGiustina, M. E. S., Junges, S., Matteini, M., & Armstrong, R. (2011). The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central

Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U–Pb sedimentary provenance data: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, 31(4), 345-357.

Rodrigues, J. B., Pimentel, M. M., Dardenne, M. A., & Armstrong, R. A. (2010). Age, provenance and tectonic setting of the Canastra and Ibiá Groups (Brasília Belt, Brazil): Implications for the age of a Neoproterozoic glacial event in central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(2), 512-521.

Santos, A. C. F., & Aguiar, C. E. (2012). Ondas e Terremotos. *Scientific American*.

Seht, M. I. V., & Wohlenberg, J. (1999). Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1), 250-259.

SIAGAS. Relatório do poço 5200011271. Disponível em: <<https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=5200011271>>. Acessado em: 06/12/2023.

Teixeira, L. C. P. (2017). Estudo da exequibilidade do método HVSR para aplicações de análise espacial em geologia urbana.

Uhlein, A., Fonseca, M. A., Seer, H. J., & Dardenne, M. A. (2012). TECTÔNICA DA FAIXA DE DOBRAMENTOS BRASÍLIA–SETORES SETENTRIONAL E MERIDIONAL. *Geonomos*.

Valeriano, C. M., Machado, N., Simonetti, A., Valladares, C. S., Seer, H. J., & Simões, L. S. A. (2004). U–Pb geochronology of the southern Brasilia belt (SE-Brazil): sedimentary provenance, Neoproterozoic orogeny and assembly of West Gondwana. *Precambrian Research*, 130(1-4), 27-55.

Wang, S., & Li, Z. (2018). S-wave attenuation of the shallow sediments in the North China basin based on borehole seismograms of local earthquakes. *Geophysical Journal International*, 214(2), 1391-1400.