



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

MAPEAMENTO SÍSMICO EM HORIZONTES
RASOS COM BASE NO TEMPO
COMPRESSIONAL INTEGRADO OBTIDO
POR MEIO DO PERFIL SÔNICO
COMPENSADO

Isis Ribeiro Berbert Tavares

SALVADOR – BAHIA
AGOSTO – 2018

**Mapeamento Sísmico em Horizontes Rasos com Base no Tempo Compressional
Integrado obtido por meio do Perfil Sônico Compensado**

por

ISIS RIBEIRO BERBERT TAVARES

Orientador: Prof. Mc. Geraldo Girão Nery

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA



The image shows three handwritten signatures in blue ink, each written over a horizontal line. The top signature is the most stylized and difficult to read. The middle signature appears to be 'Michelangelo Gomes da Silva'. The bottom signature is 'Alexsandro Guerra Cerqueira'.

COMISSÃO EXAMINADORA

Mc. Geraldo Girão Nery

Dr. Michelângelo Gomes da Silva

Mc. Alexsandro Guerra Cerqueira

DATA DA APROVAÇÃO: 03/08/2018

"... a lagarta que rasteja, rasteja
pra evoluir, depois vira borboleta e
voa por ai...."
(Bráulio Bessa)

Resumo

O perfil Sônico é uma ferramenta geofísica que registra a velocidade do som através da emissão de ondas acústicas. Uma onda compressional de frequência 20 kHz é emitida no poço e se espalha para todas as direções, porém a ferramenta busca registrar a chegada da primeira onda refratada. Esse estudo visa calcular o tempo de trânsito integrado (TTI) a partir da curva do perfil Sônico compensado e fazer um estudo da velocidade de propagação da onda em uma camada de interesse. O TTI será útil para o mapeamento dos horizontes objeto de estudo. Com base nesses horizontes mapeados é possível compreender como as feições geológicas existentes em subsuperfície atuam na disposição geológica das camadas.

Durante as últimas décadas, várias metodologias sísmicas foram desenvolvidas e utilizadas para o estudo de diferentes feições rasas em subsuperfície. Uma delas, para o mapeamento da estrutura de aquíferos em regiões de suprimento insuficiente de água (Shtivelman, 2003). Considerando que o único perfil não radioativo disponível, e costumeiramente usado na indústria da água, para a determinação da porosidade é o Sônico, o presente trabalho é uma contribuição de como se poderia usá-lo no semi-árido do nordeste brasileiro.

Será utilizada uma linha pré-stack obtida na região, que será devidamente processada. Essa linha terá a finalidade de servir como base de comparação com os resultados obtidos utilizando tanto o tempo de trânsito (Δt) registrado como a sua integração, nos casos onde geralmente eles não são usados, como em poços perfurados para a produção de água subterrânea.

Porém, nem sempre há disposição de dados sísmicos de confiabilidade, seja pela má qualidade da aquisição (principalmente com linhas muito antigas), seja pela existência de camadas muito intemperizadas, como no caso desse estudo. Portanto, esse trabalho reforça a importância de se obter um mapeamento através da curva do Sônico para casos em que a linha sísmica não seja de qualidade.

Abstract

The Sonic log is a geophysical tool that records the speed of sound through the emission of acoustic waves. A compressional wave of frequency 20 kHz is emitted in the well and spreads in all directions, but the tool records the arrival of the first refracted wave. This study aims to calculate the integrated transit time (ITT) from the curve of the compensated sonic log and make a study of the wave propagation speed in a layer of interest. The ITT will be useful for the mapping of the horizons object of study. Based on these mapped horizons it is possible to understand how the existing geological features in subsurface act on the geological layout of the layers.

During the last decades, several seismic methodologies have been developed and used for the study of different subsurface shallow features. One of them, the mapping of the aquifer structure in regions of insufficient water supply (Shtivelman, 2003). Considering that the only non-radioactive log available, and usually used in the water industry, to determine the porosity is the Sonic, the present work is a contribution of how it could be used in the semi-arid region of the Brazilian northeast.

A pre-stack line obtained in the region will be used, which will be properly processed. This line will serve as a basis for comparison with the results obtained using both the transit time (Δt) recorded and its integration, in cases where they are generally not used, such as drilled wells for groundwater production.

However, seismic reliability data are not always available, either because of the poor quality of the acquisition (especially with very old lines) or because of the existence of very weathered layers, as in the case of this study. Therefore, this work reinforces the importance of obtaining a mapping through the Sonic curve for cases in which the seismic line is not of quality.

Sumário

Resumo	3
Abstract	4
Introdução	10
1 Caracterização da área de estudo	11
1.1 Localização	11
1.2 Geologia	12
1.2.1 Embasamento	13
1.3 Sequências estratigráficas	14
2 Fundamentos Teóricos	17
2.1 Perfilagem	17
2.1.1 Porosidade	17
2.1.2 Permeabilidade	18
2.2 Perfis Geofísicos de poços	18
2.2.1 Raios Gama	18
2.2.2 Perfil Sônico	20
2.2.3 Cáliper	22
2.3 Problemas com o Perfil Sônico	23
2.3.1 Estiramento do tempo de trânsito (“ <i>Stretching</i> ”)	23
2.3.2 Saltos de ciclo (“ <i>Cycle skipping</i> ”)	23
2.3.3 Diâmetro do poço	23
2.3.4 Efeitos do fissuramento radial (“ <i>Radial cracking effects</i> ”)	24
2.4 Métodos Sísmicos	25
2.5 A perfilagem e a sísmica	27
2.6 Determinação dos parâmetros elásticos da onda utilizando o Sônico	29

3	Metodologia aplicada	30
3.1	Correlação	31
3.2	Seções	31
3.3	Cálculos realizados	34
3.4	Mapas	35
3.5	Dados sísmicos	39
3.6	Processamento de dados sísmicos	39
3.6.1	Pré-processamento	40
3.6.2	Processamento	41
4	Conclusões	44
	Agradecimentos	46
A	Tabelas resumidas dos poços	47
B	Código utilizado no Python	54
C	Cross-plot gráfico BHC x Cáliper	56
	Referências	57

Lista de Tabelas

3.1	Velocidades da camada B obtidas em cada poço e o erro relativo entre elas, onde $V_2^*=2V_2$	35
A.1	Poço 1 e 2	48
A.2	Poço 3 e 4	49
A.3	Poços 5 e 6	50
A.4	Poços 7 e 8	51
A.5	Poço 9 e 10	52
A.6	Poço 11	53

Lista de Figuras

1.1	Mapa do estado da Bahia. Em vermelho os municípios de Banzaê (menor) e Cícero Dantas (na região superior)(adaptado da Wikipédia).	11
1.2	Rota preferencial partindo de Salvador rumo à cidade de Cícero Dantas e Banzaê (retirado do Google Maps).	12
1.3	Mapa contendo as três sub-bacias do Tucano (modificado de Chang et al. (1992)).	13
1.4	Carta estratigráfica. Em vermelho, formação Marizal/São Sebastião. (Peixinho, 2017).	15
2.1	Ambientes sedimentares com base no perfil de Raios Gama (modificado de (Nery, 2013)).	19
2.2	Princípio da ferramenta do perfil Sônico (adaptado de petroblogger.com). . .	20
2.3	Correção do Sônico devido à desmoronamentos no poço (adaptado de Goetz et al. (1979)).	22
2.4	Estiramento do Perfil Sônico (adaptado de Goetz et al. (1979)).	24
2.5	Salto de ciclo. Adaptado de Goetz, Dupal e Bowler (1979).	24
2.6	Efeitos do fissuramento radial, adaptado de Goetz et al. (1979).	25
2.7	Refração com ângulo rasante, modificado de Silva (2013).	27
2.8	Modelo convolutivo do traço sísmico, obtido a partir de uma função refletividade convolvida com um pulso sísmico. Os valores da impedância acústica são extraídos a partir dos perfis sônico e de densidade. (Nery, 1990).	28
3.1	Fluxograma da metodologia aplicada no estudo.	30
3.2	Mapa de localização dos poços estudados. Modificado do Google Maps. . . .	31
3.3	Correlação ao nível do mar dos poços 1 ao 6. Em marrom tem-se a altitude de início da perfilagem (solo topográfico). Em verde o topo da camada A, em amarelo o topo do folhelho F_1 e a base do F_2 , em vermelho o topo e base da camada B e em azul o nível do mar (Escala vertical indicada no perfil; Horizontal, sem escala).	32

3.4	Correlação ao nível do mar dos poços 7 ao 11. Em marrom tem-se a altitude de início da perfilagem. Em verde o topo da camada A, em amarelo o topo do folhelho F_1 e a base do F_2 , em vermelho o topo e base da camada B e em azul o nível do mar. Notar a ausência da base da camada B nos poços 7,8 e 9 representada por uma linha tracejada (Escala vertical indicada no perfil; Horizontal, sem escala).	33
3.5	Mapa topográfico da área estudada em coordenadas UTM.	36
3.6	Velocidade da camada B em cada um dos poços, calculada com base na Eq. 2.4 para calcular a velocidade através do Tempo de Trânsito Integrado (Eixos x e y em coordenadas UTM).	36
3.7	Profundidade do topo da camada B (Eixos x e y em coordenadas UTM). . .	37
3.8	Profundidade da base da camada B (Eixos x e y em coordenadas UTM). . .	37
3.9	Mapa da espessura da camada (Eixos x e y em coordenadas UTM).	38
3.10	Mapa da CPRM Ribeira do Pombal contendo os poços 4, 5 e 6, mostrando que eles estão localizados em vales. Modificado de (Santos et al., 2010). . .	38
3.11	Mapa da CPRM Cícero Dantas contendo os poços 7, 8, 9 e 10, mostrando que os dois últimos estão em áreas de tabuleiros, mais alta. Modificado de (Santos e Reis, 2011).	39
3.12	Fluxograma com as etapas aplicadas durante o processamento da Linha 0230-0593.	40
3.13	Linha sísmica 0230-0593. Retirado do Google Maps em 05/07/2018	40
3.14	Tiro 250.	42
3.15	Seção empilhada da linha 0230-0593.	42
3.16	Mapa com o TTI da reflexão do topo do horizonte estudado (Eixos x e y em coordenadas UTM).	43
B.1	Código do Python utilizado nos poços 1 a 6.	54
B.2	Código do Python utilizado nos poços 7 a 11.	55
C.1	Cross-plot do BHC.	56

Introdução

A perfilagem de um poço representa uma fase importante para a prospecção de fluídos de interesse da indústria, seja do petróleo, seja de água subterrânea. Essa etapa consiste, basicamente, na obtenção de dados petrofísicos (entre as quais a importante relação tempo-velocidade aplicada neste trabalho), das formações rochosas em profundidade. Dados mais precisos a respeito da litologia, porosidade, geometria e conteúdo fluido existente em subsuperfície são igualmente calculados a partir da análise dos perfis geofísicos.

O perfil Sônico convencional (BHC -Bore Hole Compensated) é uma ferramenta da perfilagem que se baseia no estudo da propagação da onda acústica ao longo do poço. A velocidade de propagação de uma onda varia de acordo com o material o qual ela esteja atravessando. De uma forma geral, a velocidade nos sólidos é maior do que nos líquidos e gases. Essa diferença da velocidade de propagação nos fornece informações a respeito dos materiais constituintes das rochas em subsuperfície.

Outra forma de utilizar o perfil Sônico é através do TTI (Travel Time Integration) que consiste no somatório dos tempos de trânsitos registrados ao longo do poço, ou de uma camada de interesse, possibilitando a confecção de mapas de horizontes presentes em vários poços de uma mesma região. Além disso, o perfil Sônico fornece dados para cálculos de velocidades intervalares e auxílio à sismogramas sintéticos. Esses mapas fornecem um melhor entendimento da disposição geológica das camadas e como algumas feições afetam os horizontes.

O estudo, aqui apresentado, será complementado com dados de linha sísmica adquirida na região, no sentido de mais uma contribuição para o estabelecimento de informações entre as correlações poço-sísmica. Porém, quando não se dispõe de dados sísmicos de qualidade, o estudo da subsuperfície pode ser dificultado, principalmente na indústria da água subterrânea onde é muito comum a ausência desses dados. Dessa forma, a confecção de mapas representando os horizontes em subsuperfície utilizando as curvas do perfil Sônico se torna uma ferramenta muito útil e eficaz para aperfeiçoar o estudo da área de interesse e isso é muito bem ilustrado nesse trabalho.

Capítulo 1

Caracterização da área de estudo

1.1 Localização

A área de estudo encontra-se no estado da Bahia na região próximo aos municípios de Cícero Dantas e de Banzaê (Figura 1,1). Geologicamente, está situada na Bacia do Tucano, sub-bacia do Tucano Central.



Figura 1.1: Mapa do estado da Bahia. Em vermelho os municípios de Banzaê (menor) e Cícero Dantas (na região superior)(adaptado da Wikipédia).

Ambas as cidades estão a uma distância de aproximadamente 330 km de Salvador. A menor rota, partindo da capital baiana, é através da BR-110 passando pelos municípios de Alagoinhas, Cipó e Ribeira do Pombal (Figura 1.2).

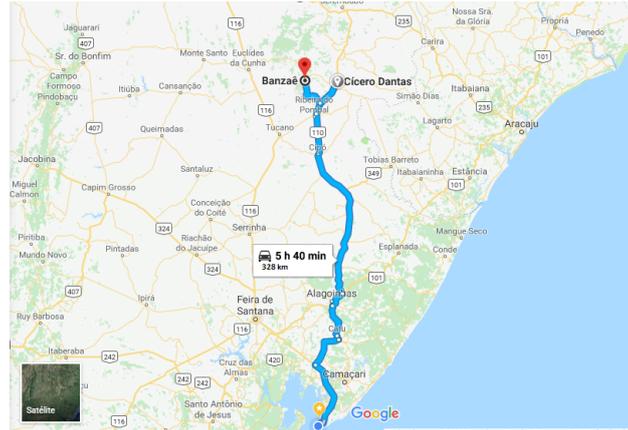


Figura 1.2: Rota preferencial partindo de Salvador rumo à cidade de Cícero Dantas e Banzaê (retirado do Google Maps).

1.2 Geologia

A bacia do Tucano é subdividida em três sub-bacias: A sub-bacia de Tucano Sul, Central e Norte. Esse conjunto de sub-Bacias faz parte do Sistema Rife Recôncavo-Tucano-Jatobá. Estruturalmente, é um sistema de meio-grábens assimétricos, desconectados e limitados por zonas de transferências.

O Sistema de Rife Recôncavo-Tucano-Jatobá constitui uma estrutura de *rift valley*, evoluída durante o Cretáceo inferior, e é interpretado como um braço abortado que originou o Atlântico Sul, relacionado à tectônica extensiva que afetou o paleocontinente Gondwana durante o Eocretáceo (Neocomiano), sendo interrompida nesta região no Eoaptiano e originou a separação continental América do Sul da África (Feronatto, 2013).

As sub-Bacias do Tucano Sul e Central têm como embasamento rochas do Cinturão Bahia Oriental da Província São Francisco, que compõem um sistema de rife assimétrico com orientação geral N-S, com falhas de borda ao leste e margem flexural a oeste (Kosin, 2009).

Os poços estudados situam-se na sub-bacia do Tucano Central, a qual possui cerca de 14.700 km² em área, constituindo-se na maior sub-bacia da região. Encontra-se parcialmente separada de Tucano Sul pela zona de acomodação do rio Itapicuru e de Tucano Norte pela zona de acomodação do Vaza-Barris (Caixeta et al., 1994). Nessa última, se observa uma inversão na assimetria e na polarização do rife. Além disso, é a região que limita as províncias do São Francisco e da Borborema, como mostra a Figura 1.3:



Figura 1.3: Mapa contendo as três sub-bacias do Tucano (modificado de Chang et al. (1992)).

1.2.1 Embasamento

As sub-Bacias do Tucano Sul e Central instalaram-se sobre a borda nordeste do Cráton do São Francisco, tendo como embasamento ortognaisses migmatíticos, a oeste-sudoeste e sudeste; rochas metavulcanossedimentares do Greenstone Belt do Rio Itapicuru, a oeste; metassedimentos da cobertura cratônica Estância, a noroeste e leste-nordeste; e rochas sedimentares da Bacia Palmares, a leste.

Os ortognaisses migmatíticos compreendem suítes ígneas de idade mesoarqueana a neo-arqueana (3.200-2.900 Ma), intrudidas por granitos e sienitos paleoproterozóicos (2.100-1.900 Ma). Associam-se ainda sequências supracrustais metamorfizadas em alto grau, depositadas em bacias rifte e de margem passiva.

O Greenstone Belt do Rio Itapicuru representa uma bacia de retro-arco paleoproterozóica (2.200-2.000 Ma) estando caracterizado por rochas metavulcânicas básicas e ácidas e metassedimentos epiclásticos, vulcanoclásticos e siliciclásticos, intrudidos por corpos graníticos-granodioríticos.

O Grupo Estância compreende rochas metassedimentares de baixo grau, relacionadas a uma bacia neoproterozóica (750-650 Ma) que se desenvolveu sobre o Cráton do São Francisco, em regime extensional a flexural-termal. Deformação e metamorfismo são incipientes devido à sua posição marginal em relação à tectônica compressiva que estruturou a Faixa de Dobramentos Sergipana.

A Bacia Palmares desenvolveu-se ao final da orogênese brasileira, entre o Cambriano

e o Ordoviciano (500 Ma), tendo evoluído como uma bacia molássica de antepaís, instalada sobre a cobertura cratônica Estância (Costa et al., 2007).

1.3 Sequências estratigráficas

Devido às semelhanças no arcabouço estrutural e registros sedimentares entre as sub-bacias do Tucano Sul e Central, costumam ser retratadas em uma única carta estratigráfica. As rochas sedimentares que preenchem essas sub-bacias estão organizadas nos grupos Brotas, Santo Amaro, Ilhas e Massaracá, além das formações São Sebastião e Marizal (Santos et al., 2010).

Na carta estratigráfica na Figura 1.4, os autores dividem os pacotes sedimentares em quatro supersequências: Supersequência Paleozóica (Sequência Permiana), Supersequência Pré-Rifte (Sequência J20-K05), Supersequência Rifte (Sequência K10-K40) e Supersequência Pós-Rifte (K50).

Segundo Caixeta et al. (1994), as supersequências podem ser resumidas em:

- Supersequência Paleozóica

Representada pelos clásticos, carbonatos e evaporitos, de ambiente marinho restrito e nerítico das formações Curitiba, Santa Brígida e Afligidos. Esta sequência possui uma distribuição ampla, alcançando as Bacias do Recôncavo e de Camamu. Estes estratos estão truncados por uma discordância regional que abrange o Permiano, todo o Triássico e parte do Jurássico, compondo um hiato de quase 100 M.a. Um evento desse porte pode advir de processos mantélicos, que soergueram a crosta antes da ruptura que resultaria na formação do Oceano Atlântico Sul.

- Supersequência Pré-Rifte

Equivale ao grupo Brotas e à formação Itaparica, presentes nas Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. Estes arenitos e folhelhos foram depositados por sistemas fluviais entrelaçados, com forte retrabalhamento eólico, e em lagos sob clima árido, do final do Jurássico ao início do Berriasiano. Nesta fase houve subsidência de porte relativamente pequeno. Sobre ela corre uma discordância de caráter regional, em parte marcada pelo retrabalhamento eólico dos sedimentos subjacentes.

- Supersequência Rifte

1. Sequência K10: A primeira sequência inteiramente cretácica equivale à Formação Candeias, depositada em lagos distribuídos do Recôncavo a Jatobá e já associados aos falhamentos que caracterizam a fase Rift dessas bacias. Representa uma

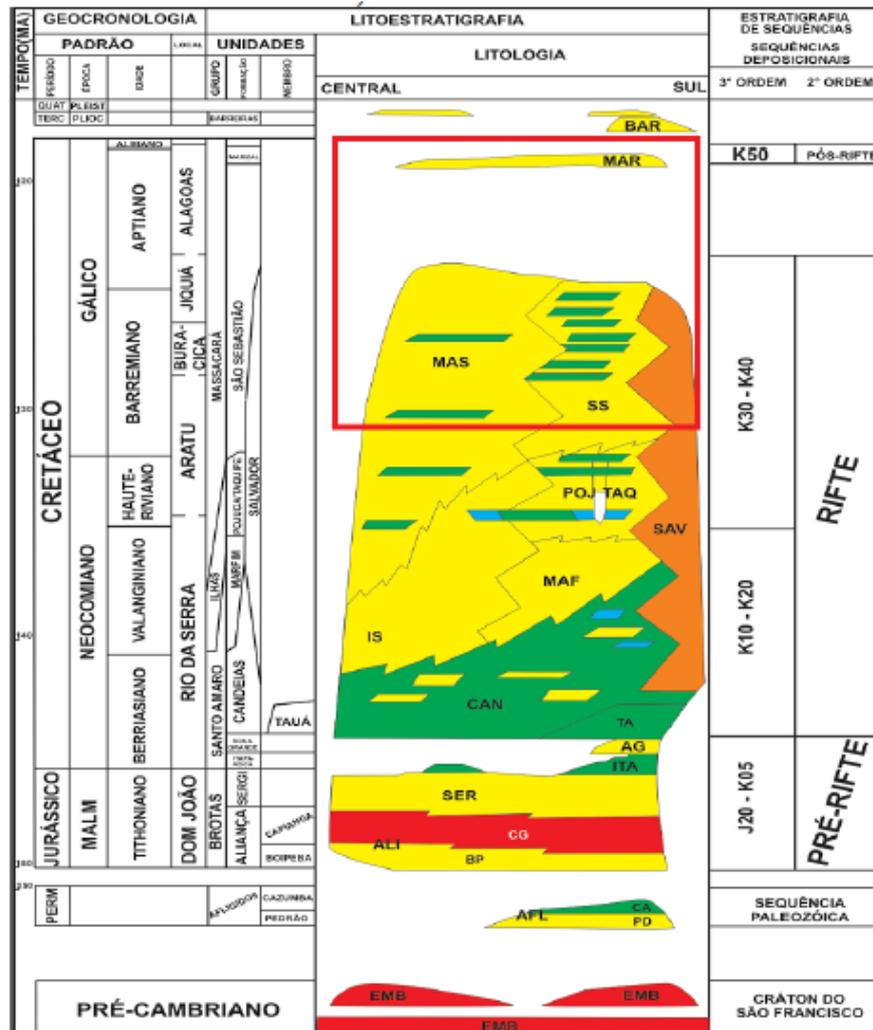


Figura 1.4: Carta estratigráfica. Em vermelho, formação Marizal/São Sebastião. (Peixinho, 2017).

importante mudança climática, de árido para úmido. No Tucano e Jatobá essa sequência se caracteriza pela elevada proporção de arenitos.

2. Sequência K20: De idade aproximada Valanginiana, foi identificada nas Bacias do Recôncavo e Tucano Sul e inclui partes dos depósitos de leques deltaicos da Formação Salvador, dos arenitos fluviais Massaracá, dos deltas Ilhas e do lago Maracangalha. Pelo menos em parte da bacia seu topo é marcado por uma discordância erosiva.
3. Sequência K30-K40: Reúne as rochas Hauterivianas a Eoaptianas resultantes da atuação dos leques aluviais Salvador, dos sistemas fluviais Massaracá, dos deltas Pojuca e do lago Maracangalha. A evolução do rifte cessou quase que por completo no Eoaptiano, originando a discordância que coroa a Sequência K30.

- Supersequência Pós-Rifte

Resulta dos últimos espasmos dos riftes baianos, e equivale aos clásticos grossos neopaleozóicos da Formação Marizal, depositados por leques aluviais.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Perfilagem

A perfilagem geofísica é uma ferramenta de suma importância para o estudo das rochas em sub-superfície. Basicamente, se resume em fazer levantamentos de características petrofísicas das camadas abaixo da superfície por meio de um poço. É um método capaz de gerar perfis verticais integrando vários métodos geofísicos para proporcionar padrões para correlação entre poços vizinhos, confecção de mapas geológicos, definição da geometria dos corpos e ambientes de sedimentação.

As informações advindas dessa técnica geofísica podem ser no âmbito qualitativo ou quantitativo. Informações qualitativas são evidências visuais, como a litologia, tipo de fluido, fraturas, dentre outros. Já as informações quantitativas são as evidências numéricas como espessura das camadas, porosidades, resistividades, velocidades acústicas, densidade, volume de hidrocarbonetos móveis, teor de argilas, etc.

Dentre as principais propriedades petrofísicas fundamentais das rochas reservatório tem-se a porosidade e a permeabilidade, vez que ambas caracterizam a capacidade de armazenar e liberar fluídos dessas rochas.

2.1.1 Porosidade

É uma propriedade estatística definida como a razão entre o volume de espaços vazios (V_v) de uma rocha e o seu volume total (V_t). Pode-se classificar resumidamente a porosidade da seguinte maneira:

- Porosidade primária ou deposicional: é aquela adquirida pela rocha durante o seu processo de formação (durante a deposição ou bioconstrução).

- Porosidade secundária ou pós-deposicional: é resultante de processos geológicos subsequentes à conversão dos sedimentos em rochas.

Um outro conceito de porosidade é o de *porosidade absoluta*, explicada anteriormente, e a *porosidade efetiva* que leva em conta apenas os vazios interconectados. Essa última é a de maior importância nos cálculos e interpretações dos perfis, já que é economicamente a mais interessante. A porosidade pode ser calculada pelos perfis Sônico e/ou radioativos induzidos (Densidade e Neutrônico) (Nery, 2013).

2.1.2 Permeabilidade

Esse conceito se baseia no experimento de Darcy (1856) que demonstrou que a vazão de água em um meio poroso era diretamente proporcional à área da seção transversal (A) do meio, à diferença de carga hidráulica entre dois pontos (Δh) e, inversamente proporcional, à distância percorrida pelo fluido (L) (Miranda, 2004).

$$Q = \frac{-kA(\Delta h)}{L}, \quad (2.1)$$

onde k é a constante de proporcionalidade denominada de condutividade hidráulica. A condutividade hidráulica depende de várias características tanto do meio (permeabilidade intrínseca, porosidade, tamanho, forma e arranjo ou distribuição dos grãos), como do fluido que preenche a formação (viscosidade e massa específica). A permeabilidade absoluta é a capacidade de fluxo de um fluido que satura 100% de seus poros interconectados e/ou fraturas. Já a permeabilidade efetiva é a capacidade de fluxo de um fluido na presença de outro qualquer (Nery, 2013).

2.2 Perfis Geofísicos de poços

A perfilagem geofísica é feita através da descida de equipamentos dentro do poço com o intuito de obter informações petrofísicas das camadas existentes. Esses dados podem ser de natureza elétrica (Potencial Elétrico e Resistividades), acústicas (Tempos de Trânsito), mecânicas (Cáliper) e radioativas (natural e induzidas, tais como o Densidade e Neutrônico). Nesse estudo, dada a sua natureza, foram utilizados apenas o Gama Natural e o Sônico, sendo que os demais serviram de apoio secundário.

2.2.1 Raios Gama

O perfil de Raios Gama, ou GR, mede a soma da radioatividade natural das rochas proveniente da presença dos elementos radioativos Tório (Th), Urânio (U) e Potássio $40(K^{40})$.

Folhelhos possuem alta radioatividade devido principalmente à presença de Potássio 40 e alguma matéria orgânica, enquanto que os arenitos e calcários, na maioria das vezes, possuem baixa radioatividade. Dessa forma, o perfil de raios gama se torna uma ferramenta muito útil como indicador qualitativo e quantitativo da presença de argilas, permitindo, portanto, ao intérprete fazer a distinção entre folhelhos e os demais tipos litológicos.

- Interpretação qualitativa: O formato da curva de Raios Gamas além de indicar intervalos de folhelhos e não folhelhos, pode fornecer uma ideia do ambiente que ocorreu a deposição (Figura 2.1):

Forma	Suave	Ambientes	Serrilhada	Ambientes
Cilíndrica Representa deposição uniforme		Dunas Eólicas, Areias de Maré, Canais Fluviais		Deltas Distributários, Canais Turbidíticos, Leques Proximais de Mar Profundo
Sino Granodrecência ascendente		Areias de Maré, Areias Fluviais, Fluxos de Tranças, Canais Fluviais, Barras de Pontal		Areias Lacustres, Deltas Distributários, Canais Turbidíticos, Leques Proximais de Mar Profundo
Funil Granodrecência descendente		Restingas, Praias, Brechas Oblíquas num dique		Barreira de Foz Distributários, Delta de Orla Marítima, Leques Distais de Mar Profundo

Figura 2.1: Ambientes sedimentares com base no perfil de Raios Gama (modificado de (Nery, 2013)).

- ◊ Um formato cilíndrico geralmente sinaliza ambientes com fácies sujeitas à transgressões: eólicas, canais fluviais, barras, cânions, plataformas carbonáticas e assemelhados, locais com bastante retrabalhamento capaz de deixar as camadas com granulação fina.
- ◊ Um formato de sino (baixa radioatividade no topo, alta na base) geralmente sinaliza ambientes progradantes.
- ◊ Um formato de funil (alta radioatividade no topo, baixa na base) geralmente sinaliza ambientes transgressivos.
- Interpretação quantitativa: Para uma avaliação quantitativa do volume de folhelho (VSH) no intervalo é necessário estabelecer o índice de radioatividade (IGR), que é uma normalização entre a leitura realizada no perfil com os valores máximos e mínimos observados:

$$IGR = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}, \quad (2.2)$$

onde GR é o valor lido no perfil, GR_{min} é o arenito mais limpo no intervalo e GR_{max} é o valor máximo médio dos folhelhos do intervalo analisado.

Com o IGR em mãos, pode-se calcular o VSH utilizando a seguinte equação (Asquith e Krygowski, 2004):

$$VSH = \frac{IGR}{A_{GR} - (IGR \times (A_{GR} - 1))}, \quad (2.3)$$

onde $A_{GR} = 2$ para rochas terciárias ou novas (não consolidadas) e $A_{GR} = 3$ para rochas mais velhas (ou consolidadas).

2.2.2 Perfil Sônico

O princípio do perfil sônico convencional, tem por base emissão de uma onda acústica por um transmissor no poço e que se espalha em todas as direções formando uma frente de onda compressional esférica. Essa frente de onda atravessa a parede do poço, penetra nas camadas de rocha e depois de um certo intervalo de tempo retorna, também de modo compressional, aos receptores. Os receptores, por sua vez, irão captar todo o trem de ondas, sendo que o registro é feito na chegada da primeira onda compressional refratada. A figura 2.2 ilustra como uma onda elástica se propaga a partir de um transmissor T, até ser captada pelos receptores (R1 e R2). O perfil sônico fornece o tempo, em microsegundo/pé ($\mu s/pé$), de

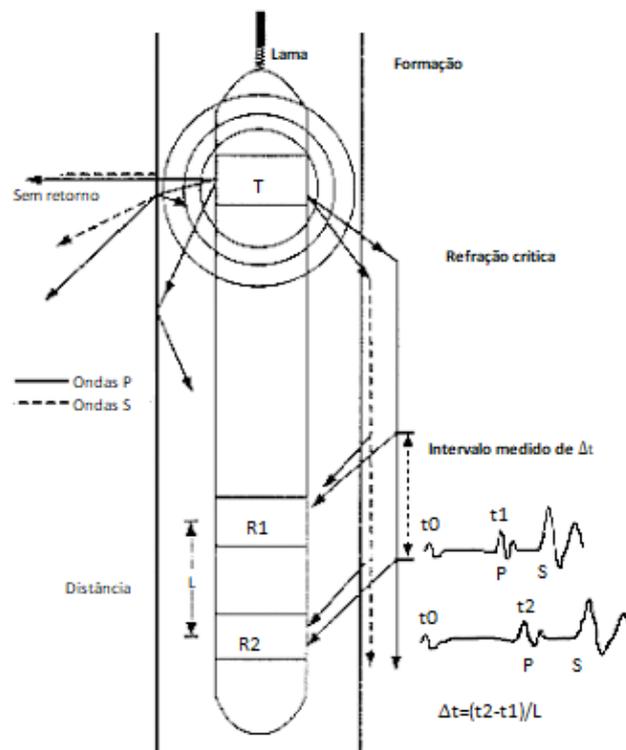


Figura 2.2: Princípio da ferramenta do perfil Sônico (adaptado de petroblogger.com).

uma onda sonora em um determinado intervalo fixo, de modo que faz dele uma importante ferramenta para avaliação da porosidade e utilização como ferramenta de auxílio à sísmica, como será visto mais adiante.

A velocidade de propagação do som varia de acordo com o meio por onde ele se propaga. Em meios fluídos, a velocidade é menor do que nos sólidos. Dessa forma, o tempo que a onda leva para percorrer um meio fluído é maior do que quando a onda percorre um meio sólido. É essa variação no tempo do percurso da onda que auxilia na interpretação do meio que envolve a camada de estudo. Devido a essa diferença de velocidade na propagação de acordo com o meio (em que leva em consideração as distâncias ou espaços percorridos em fluídos e grãos sólidos), o perfil Sônico é muito sensível aos desmoronamentos dos poços, em virtude de um longo trajeto na lama antes de atingir a parede do poço.

Para minimizar esses efeitos, as ferramentas são construídas com dois transmissores, um superior e outro inferior, e quatro (ou dois) receptores que operam alternadamente na obtenção de quatro tempos, cuja média aritmética dividida pela distância de 2 pés (que é a separação entre os detectores relativa a um dos transmissores) será o valor registrado. Essa configuração de dois ou quatro receptores é denominada de Perfil Sônico compensado pelo efeito do poço (BHC- Bore Hole Compensated Sonic Log) (Nery, 1990).

As ferramentas sônicas possuem internamente um sistema que realiza o somatório dos tempos registrados desde a profundidade final do poço até a base do revestimento, de superfície ou intermediários, imprimindo-os em traços de milissegundos cada ao longo do perfil.

Usa-se a integração do tempo de trânsito (TTI- Travel Time Integration) para se obter o tempo demandado para a onda atravessar um certo intervalo. Através do uso do TTI é possível, também, calcular a velocidade da camada por meio da seguinte equação:

$$V = \frac{e}{\text{TTI}}, \quad (2.4)$$

onde e é a espessura (m) do intervalo, ou camada escolhida, e o TTI em milissegundos.

Por ser um método não radioativo, o perfil Sônico é amplamente utilizado na indústria da água subterrânea para a determinação da porosidade. A correlação entre porosidade e tempo de trânsito foi estudada por Wyllie et al. (1956), que afirmaram que o tempo de trânsito é um valor médio ponderado entre os tempos dos elementos pertencentes à trajetória da onda. Com isso, o tempo de trânsito pode ser estimado com base na Lei das Misturas:

$$\Delta t = (1 - \phi)\Delta t_m + \phi\Delta t_f, \quad (2.5)$$

e a porosidade obtida do Perfil Sônico (ϕ_s) da seguinte forma:

$$\phi_s = \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m}, \quad (2.6)$$

Δt é o tempo registrado em perfil, Δt_m é o tempo estabelecido para a matriz sólida e Δt_f é o tempo do fluído que preenche o intervalo. Essa equação é conhecida como Equação de Wyllie.

2.2.3 Cáliper

O cáliper é uma ferramenta que dispõe de dois ou mais “braços” articulados que variam a sua abertura de acordo com o diâmetro do poço, sendo possível averiguar a existência de rugosidades e desmoronamentos. Tem a importância de informar as condições mecânicas do furo para melhoria dos cálculos interpretativos e para servir como uma ferramenta de controle da qualidade do Perfil Sônico. Deve-se observar as curvas tanto do Δt como do cáliper e verificar se os valores do primeiro (Δt) estão relacionados à anomalias no segundo (cáliper), de acordo com o espaçamento entre o transmissor e o receptor.

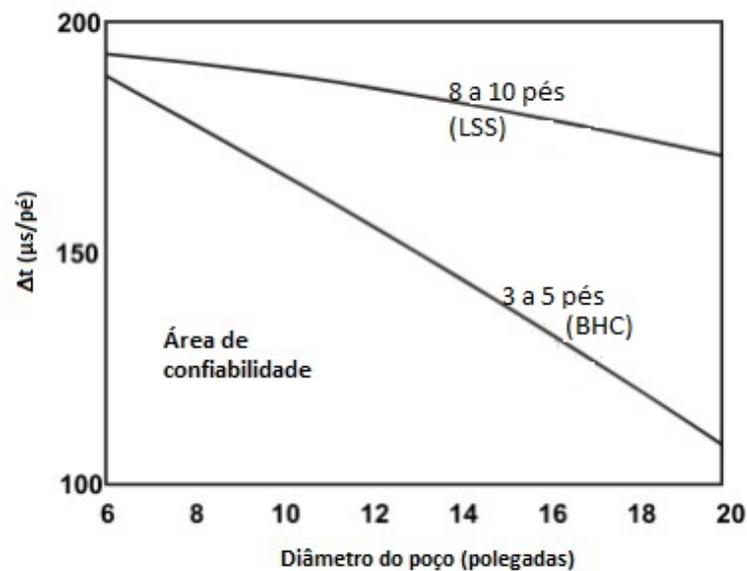


Figura 2.3: Correção do Sônico devido à desmoronamentos no poço (adaptado de Goetz et al. (1979)).

A Figura 2.3 mostra duas áreas de confiabilidade dos dados registrados, por meio das áreas demarcadas uma pela curva dos receptores 3-5 pés (BHC) e os eixos x-y e uma outra, mais superior, com os receptores 8 a 10 pés (LSS - Long Spacing Sonic), de frequência de 40 KHz, construída para dar maior penetração ao princípio sônico.

Na profundidade a analisar, caso as coordenadas dos valores do Δt do BHC e do diâmetro do poço mostrem que o ponto cai acima da área demarcada pelos receptores 3-5 pés, ele deve ser descartado por ter sido, provavelmente, grandemente influenciado pelo desmoronamento.

Por exemplo: para um poço com 12 polegas de diâmetro (a ferramenta tem aproximadamente 4 polegadas), deve-se considerar como válida as leituras da ordem de, no máximo, $160 \mu s/pé$.

Por outro lado, a ferramenta 8-10 pés (LSS), apresenta grande vantagem em relação ao BHC, em termos de penetração, todavia maior espaçamento entre fonte e os receptores

significa que as primeiras chegadas podem ser mais atenuadas, sujeitas a ruídos e saltos de ciclo. Considerando-se igual diâmetro de 12 polegadas, a leitura máxima, para o LSS, será da ordem de $190 \mu\text{s}/\text{pé}$.

O apêndice C contém o cross-plot dos valores registrados no perfil sônico (eixo y) e o diâmetro (eixo x) dos poços utilizados nesse trabalho. Com esse cross-plot é possível notar que a maioria dos valores encontram-se na área de confiabilidade, com exceção de alguns trechos dos poços 2 e 10. Trazendo, com isso, confiabilidade nos cálculos e análises realizadas nesse trabalho.

2.3 Problemas com o Perfil Sônico

O Perfil Sônico, como dito anteriormente, mede o tempo que ondas compressoriais levam para atravessar as formações. Dessa forma, alguns efeitos podem surgir e gerar valores anômalos na curva do perfil Sônico que não condizem com o esperado para a litologia e ocorrem devido às variações mecânicas do poço.

2.3.1 Estiramento do tempo de trânsito (“*Stretching*”)

O som que chega ao segundo receptor (o mais distante do transmissor) percorrendo um caminho maior e, geralmente, a amplitude do sinal é mais atenuada. Como o detector está limitado a um certo valor de amplitude - “*threshold*”- (em milivolts) adotado pelo operador durante a descida, obedecendo a relação sinal-ruído, a detecção pode ocorrer tardiamente no receptor. Isso fornece um Δt maior do que o real, portanto valores de porosidade com ele calculado serão superestimados.

2.3.2 Saltos de ciclo (“*Cycle skipping*”)

Em alguns casos, o sinal que chega ao receptor mais distante do transmissor é bastante atenuado para ser detectado na sua primeira chegada. A detecção ocorre no segundo ou terceiro ciclo de chegada do sinal, ou seja, saltam-se ciclos. Isso se mostra no perfil como aumentos abruptos e repentinos no intervalo do tempo de trânsito, conforme mostrado na Figura 2.5.

2.3.3 Diâmetro do poço

A influência do diâmetro do poço é também notada quando há desmoronamentos da parede do poço, observado pelo calíper. Nesses casos, a primeira chegada pode ser a da onda que viajou através da lama.

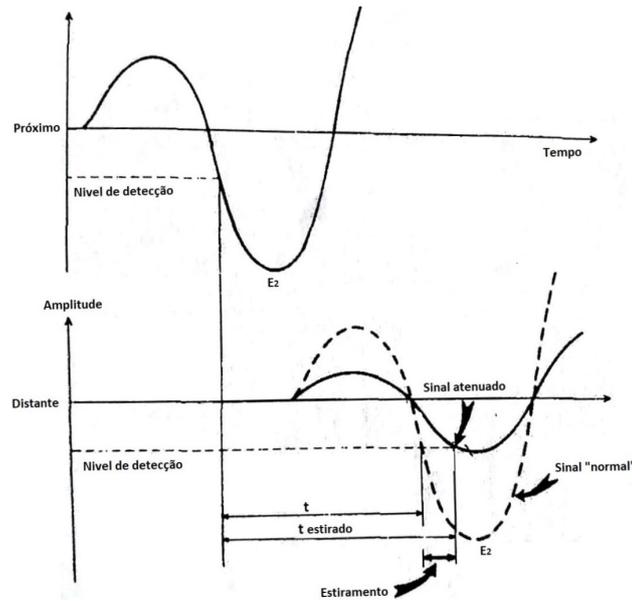


Figura 2.4: Estiramento do Perfil Sônico (adaptado de Goetz et al. (1979)).

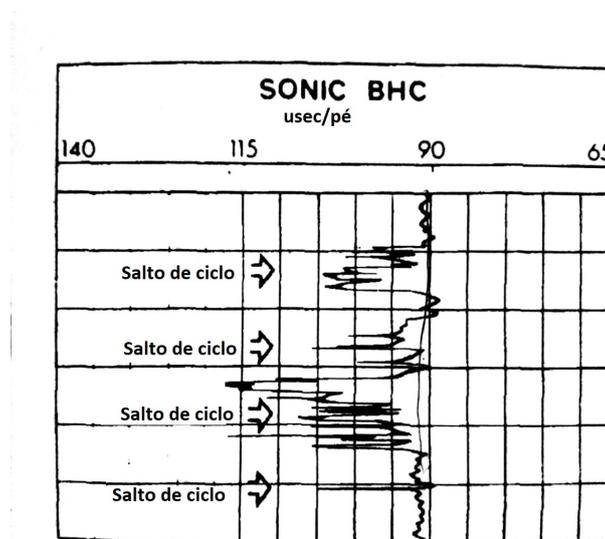


Figura 2.5: Salto de ciclo. Adaptado de Goetz, Dupal e Bowler (1979).

2.3.4 Efeitos do fissuramento radial (“*Radial cracking effects*”)

Microfraturas na rocha, causadas pela perfuração, interligadas com fraturas radiais, podem aumentar o intervalo do tempo de trânsito devido ao preenchimento dessas fissuras pelo fluido da formação. Tal fato é observado mais facilmente quando se usa perfil de longo espaçamento denominado de LSS, conforme ilustra a Figura 2.6.

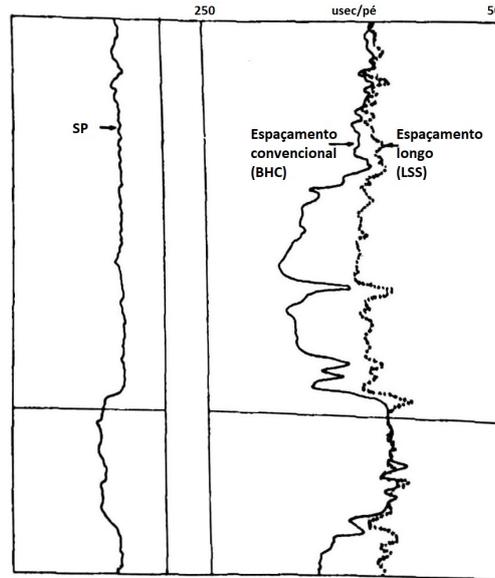


Figura 2.6: Efeitos do fissuramento radial, adaptado de Goetz et al. (1979).

2.4 Métodos Sísmicos

Os métodos sísmicos medem a velocidade com que uma onda acústica viaja pelo meio. As ondas são definidas por alguns parâmetros que são determinados pelas propriedades elásticas das rochas que, assim como todos os sólidos, obedecem a Lei de Hooke, que fornece a relação entre tensão e deformação. São esses parâmetros:

- Módulo de Young (E): é a razão entre a tensão e a deformação na mesma direção de atuação. Pode ser dado por:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (2.7)$$

- Razão de Poisson (ν): razão entre a contração lateral e a extensão longitudinal:

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (2.8)$$

- Bulk Modulus (κ): é a razão entre a pressão aplicada e a mudança de volume quando o sólido é submetido a uma compressão hidrostática:

$$\kappa = -\frac{(2\mu + 3\lambda)}{3}, \quad (2.9)$$

onde λ é o primeiro parâmetro de Lamè e μ é o módulo de cisalhamento ou segundo parâmetro de Lamè.

As ondas acústicas são caracterizadas pelos movimentos individuais de cada partícula do meio. As mais utilizadas na Geofísica são as ondas de corpo que são as ondas compressoriais e as cisalhantes.

- Ondas compressoriais (ondas P ou longitudinais): As partículas se movem na mesma direção de propagação da onda. Além disso, é a única onda que se propaga em fluidos e possui maior velocidade, portanto é a que primeiro chega ao receptor. Sua equação é:

$$V_p = \sqrt{\frac{\kappa + \left(\frac{4}{3}\right)\mu}{\rho}}, \quad (2.10)$$

onde ρ é a densidade do meio.

- Ondas cisalhantes (ondas S ou transversais): As partículas se movimentam perpendicularmente à direção de propagação. Elas possuem velocidade de transmissão menor do que as ondas P e não são se propagam em fluidos. A sua velocidade é dada por:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.11)$$

Além das ondas de corpo, há também as ondas de superfície, que como o próprio nome já diz, são transmitidas na superfície. Essas não costumam ter aplicações na perfilagem geofísica de poços.

A energia é transmitida em ambos os modos, tanto como onda P como onda S, porém as ondas cisalhantes possuem amplitude maior do que as ondas P, esse é um dos padrões que servem para a identificação do sinal que chega.

Utilizando-se um sistema de transmissores, ou as fontes sísmicas, com os receptores na superfície, é possível obter o tempo que leva para a onda atravessar o meio e atingir os receptores. A propagação das ondas sísmicas obedece a Lei de Huygens que estabelece que cada ponto da frente de onda se comporta como uma nova fonte de onda esférica. Com isso, quando a onda encontra uma interface que separa dois meios com velocidades distintas, parte da onda incidente será transmitida e parte será refletida e o ângulo com que ocorre essa mudança na direção é função da velocidade dos dois meios. Essa relação é obtida através da lei de Snell:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (2.12)$$

em que o índice 1 se refere ao meio em que a onda incide e o índice 2 ao meio que a onda chega.

◇ Método sísmico de refração

Quando uma onda passa de um meio com menor velocidade para um de maior, existe um ângulo de incidência (ângulo crítico) tal que o ângulo de transmissão é de 90° e a onda se propaga pela interface entre os meios; semelhante ao que ocorre com o perfil Sônico, daí o seu uso comparativo com a sísmica a ser válido. Portanto, nesse tipo de levantamento ocorre o registro da chegada das ondas refratadas. O princípio é ilustrado na Figura (2.7):

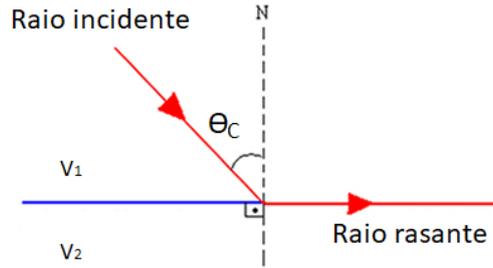


Figura 2.7: Refração com ângulo rasante, modificado de Silva (2013).

◇ Método sísmico de reflexão

Consiste na obtenção do registro sísmicos das ondas que incidem na camada e retornam para os geofones com ângulo de reflexão igual ao ângulo incidente. Amplamente utilizado na indústria atualmente, consegue alcançar grandes profundidades. Ocorre a reflexão sempre que a onda encontra um material cuja impedância acústica (que é a dificuldade que um material impõe à passagem do som) seja diferente da anterior.

A impedância acústica (Z) é a oposição de um meio à movimentação e uma onda longitudinal, caracterizada pela relação entre a pressão do som e a velocidade da partícula, e pelo meio em si.

$$Z = \rho \times v, \quad (2.13)$$

onde ρ é a densidade (Kg/m^3) e v é a velocidade (m/s) do meio.

Através da impedância acústica é possível se obter o coeficiente de reflexão, que representa a capacidade de reflexão de uma interface e é dado por:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (2.14)$$

Se R for positivo, significa dizer que uma rocha de baixa velocidade sobrepõe uma de alta velocidade, mais compacta;

Se R for negativo, significa dizer que uma rocha de alta velocidade sobrepõe uma de baixa velocidade, menos compacta;

2.5 A perfilagem e a sísmica

A importância das Eqs. 2.13 e 2.14 está na construção do sismograma sintético que representa o resultado de uma modelagem da resposta sísmica em uma região. Esse procedimento é realizado com a velocidade calculada com o perfil Sônico e utilizando-a para o cálculo da impedância acústica para, com isso, encontrar o coeficiente de reflexão. Tendo em mãos essas duas variáveis, obtém-se a função refletividade, a qual será convolvida com o pulso sísmico

(obtido matematicamente) para, finalmente, obter-se o traço sísmico (conjunto de valores verticais de amplitude). Esse procedimento é ilustrado na Figura 2.8:

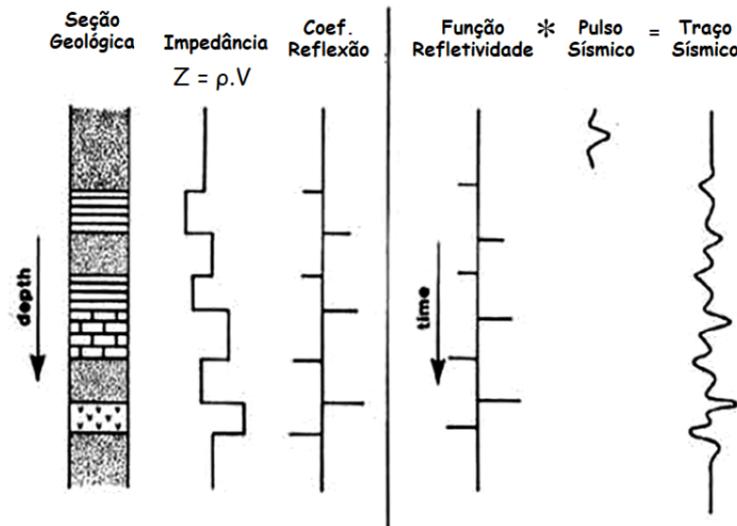


Figura 2.8: Modelo convolutivo do traço sísmico, obtido a partir de uma função refletividade convolvida com um pulso sísmico. Os valores da impedância acústica são extraídos a partir dos perfis sônico e de densidade. (Nery, 1990).

A construção do sismograma sintético tem a finalidade de permitir a amarração entre os dados de poço e as seções sísmicas para uma interpretação sísmica mais precisa. Além disso, serve para controlar a qualidade do traço sísmico (identificar e retirar com mais precisão as múltiplas) e avaliar a perda de transmissão, ou seja a atenuação que a onda acústica sofreu. Essa atenuação pode ser dada por:

$$T = 1 - R^2, \quad (2.15)$$

onde T é a perda por transmissão e R é a refletividade da onda acústica.

Se a área tiver outros poços é possível aplicar essa técnica em todos eles para avaliar as variações de sismofácies associadas à interfaces estudadas. Desta forma, pode-se também classificar essas sismofácies.

O sismograma sintético serve como ferramenta durante a fase de processamento sísmico, pois pode ajudar na avaliação da eficiência de etapas como a deconvolução ou no tratamento de amplitudes.

2.6 Determinação dos parâmetros elásticos da onda utilizando o Sônico

Com base nas velocidades das ondas P e S obtidas com o perfil Sônico é possível obter a densidade da rocha e, com isso, obter os parâmetros elásticos da onda usando as seguintes equações descritas por Kowalski et al. (1975):

1. Módulo de Young (E):

$$E = \left[\frac{\rho}{(\Delta t_T)^2} \right] \times \left[\frac{3(\Delta t_T)^2 - 4(\Delta t_L)^2}{(\Delta t_T)^2 - (\Delta t_L)^2} \right] \times 1.34 \times 10^{10} \text{psi} \quad (2.16)$$

2. Bulk Modulus (κ):

$$\kappa = \rho \times \left[\frac{3(\Delta t_T)^2 - 4(\Delta t_L)^2}{(3\Delta t_T)^2 - (\Delta t_L)^2} \right] \times 1.34 \times 10^{10} \text{psi} \quad (2.17)$$

3. Módulo de cisalhamento (μ):

$$\mu = \frac{\rho}{(\Delta t_T)^2} \times 1.34 \times 10^{10} \text{psi} \quad (2.18)$$

4. Razão de Poisson (ν):

$$\nu = \frac{1}{2} \times \left(\frac{(\Delta t_T)^2 - 2(\Delta t_L)^2}{(\Delta t_T)^2 - (\Delta t_L)^2} \right), \quad (2.19)$$

onde os termos Δt_T e Δt_L é o tempo registrado pela onda transversal e longitudinal, respectivamente.

Capítulo 3

Metodologia aplicada

O fluxograma (Figura 3.1) abaixo mostra as etapas aplicadas sequencialmente no presente trabalho.

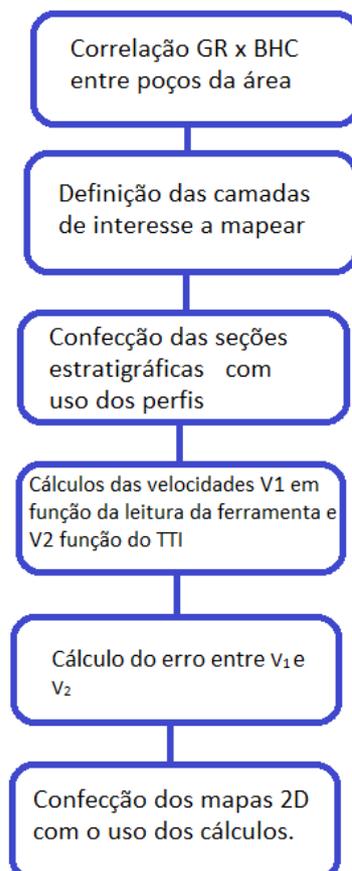


Figura 3.1: Fluxograma da metodologia aplicada no estudo.

3.1 Correlação

Os poços estudados na região estão distribuídos como mostra a Figura 3.2 :



Figura 3.2: Mapa de localização dos poços estudados. Modificado do Google Maps.

Para se obter informações pertinentes a respeito das camadas em subsuperfície, é interessante realizar a correlação entre os poços, ou seja, interliga-los de acordo com as camadas semelhantes que possuam em comum. Como critério, foi utilizado no desenvolver do trabalho a curva Δt juntamente com a de Raios Gama. Buscou-se nessas curvas similaridades entre todos os poços analisados. Para facilitar os estudos, dividiu-se esses poços em dois grupos de acordo com na localização geográfica dos mesmos. Numera-se um grupo de 1 a 6 e outro de 7 a 11. A partir disso, é necessário observar as curvas e suas mudanças abruptas em comum para delimitar as prováveis áreas de interesse. Para isso, foi observado o comportamento do perfil GR e do Sônico para, assim, notar a existência de uma camada de interesse e comum em todos os poços. Desta forma, interligou-se os intervalos onde os valores de ambos os perfis estivessem aproximadamente constantes e, desde que o GR marcasse baixa radioatividade (arenitos).

3.2 Seções

Utilizou-se o script escrito em *Python* para ordenar os poços e correlacionar as camadas de acordo com a altitude em relação ao nível do mar em que se encontravam.

Nas Figuras 3.3 e 3.4, foi possível se notar uma camada arenosa em verde intitulada de “A”. Acima dela, temos um material em que o perfil Sônico varia muito, tendo influencia do ar, ou nível estático, e portanto é uma camada areada com materiais não consolidados.

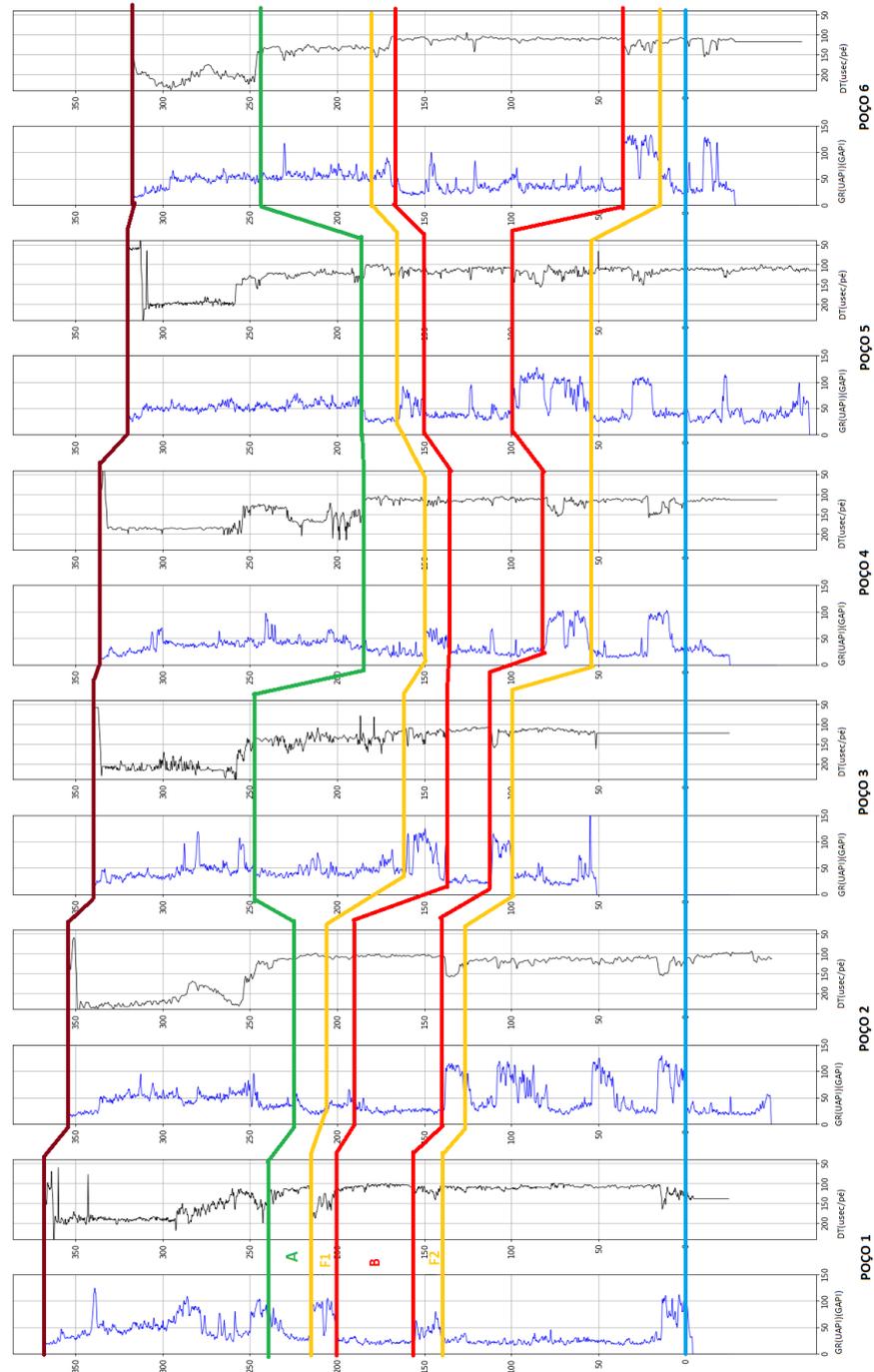


Figura 3.3: Correlação ao nível do mar dos poços 1 ao 6. Em marrom tem-se a altitude de início da perfilagem (solo topográfico). Em verde o topo da camada A, em amarelo o topo do folhelho F_1 e a base do F_2 , em vermelho o topo e base da camada B e em azul o nível do mar (Escala vertical indicada no perfil; Horizontal, sem escala).

Abaixo da camada A tem uma camada de folhelhos identificada de amarelo como " F_1 ". Sotoposta a F_1 , aparece, em vermelho, a camada B que foi o alvo do estudo nesse trabalho. Por último, uma camada de folhelhos, em amarelo, denominada de " F_2 ". A correlação foi

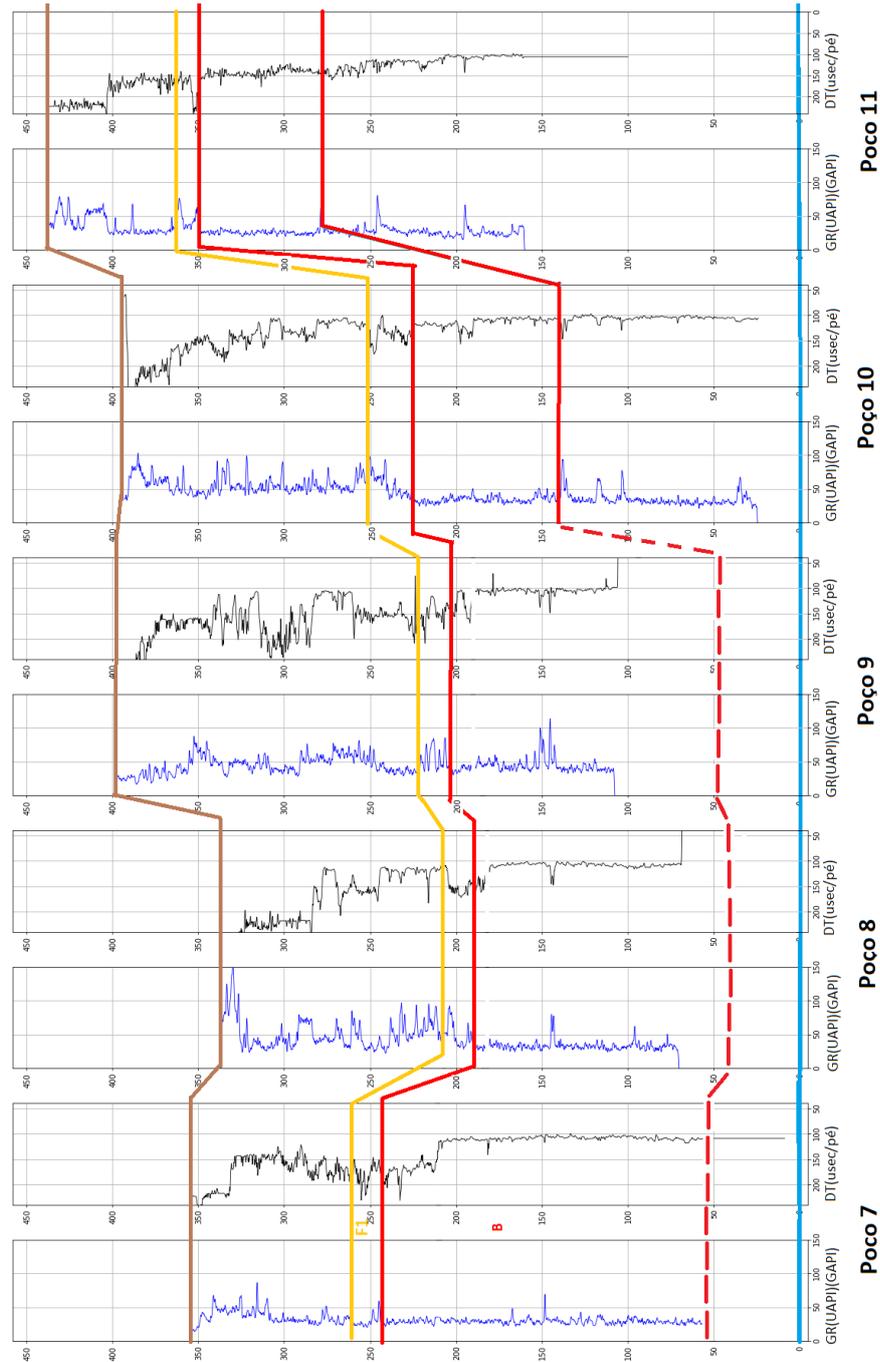


Figura 3.4: Correlação ao nível do mar dos poços 7 ao 11. Em marrom tem-se a altitude de início da perfilagem. Em verde o topo da camada A, em amarelo o topo do folhelho F_1 e a base do F_2 , em vermelho o topo e base da camada B e em azul o nível do mar. Notar a ausência da base da camada B nos poços 7,8 e 9 representada por uma linha tracejada (Escala vertical indicada no perfil; Horizontal, sem escala).

interrompida abaixo de F_2 porque não foi possível identificar uma nova camada na Figura 3.4 pois, em alguns poços (7 a 9), a perfilagem chegou ao fim no meio de um outro estrato, dificultando a correlação, por isso a base da camada foi representada de forma tracejada.

3.3 Cálculos realizados

Dado o bom contraste de Δt e consistência em seu valor ao longo da camada B, ela foi escolhida para a apresentação desta metodologia. Inicialmente, calculou-se a sua velocidade utilizando a fórmula:

$$V_1 = \frac{1 \text{ pé}}{\Delta t(\mu s/\text{pé})}, \quad (3.1)$$

onde 1 pé (que deverá ser convertido em metros, correspondendo, portanto a 0,3048 m) é a resolução vertical da ferramenta e o Δt é a média do tempo lido na camada, em microssegundo/pé que deve ser convertido em segundos ao multiplicar toda a equação por 10^6 , desta forma a velocidade encontrada ficará em m/s .

Uma vez que os poços para água subterrânea não constam necessariamente da integração interna das operações de perfilagem, pelo fato de a indústria não ser usuária contumaz da sísmica em seus trabalhos de prospecção, e sim da eletrorrestividade, calcula-se o TTI analisando o somatório dos valores registrados pelo perfil Sônico na camada.

Tendo em mãos o TTI, é necessário um segundo cálculo da velocidade (V_2) para a mesma camada, para fins de comparação entre os métodos, usando-se a Eq. 2.4. Essa última, deverá ser convertida em m/s trocando a espessura e de pés para metro (multiplicando por 0,3048) e multiplicar toda a equação por 10^3 para que o TTI (dado em milissegundos) fique em segundos. Desta forma, ambas as equações ficam com as mesmas unidades, podendo, assim, serem comparadas, como no exemplo abaixo:

$$V_2 = \frac{0,3048 m}{10^3 s} \quad (3.2)$$

Todos os resultados foram plotados na tabela 3.1:

Tabela 3.1: Velocidades da camada B obtidas em cada poço e o erro relativo entre elas, onde $V_2^*=2V_2$.

Poço	V_1 (m/s)	TTI	V_2 (m/s)	V_2^* (m/s)	Erro (%)
Poço 1 (Major)	2911,2	27839,3	1434,3	2868,5	1,5
Poço 2 (Serrão)	2931,9	37640,2	1453,5	2907,1	0,8
Poço 3 (Juá 1)	2716,5	18341,6	1354,4	2708,7	0,3
Poço 4 (Juá 2)	2736,2	40275,3	1362,2	2724,4	0,4
Poço 5 (Itaparica)	2792,4	40704,4	1347,9	2695,7	3,5
Poço 6 (SJ da Fortaleza)	2803,9	94474,9	1398,6	2797,2	0,2
Poço 7 (Tubarão)	2883,0	95310,1	1436,7	2873,4	0,3
Poço 8 (Melo)	2873,1	78825,6	1424,9	2849,8	0,8
Poço 9 (Boqueirão)	2964,6	55176,3	1474,9	2949,9	0,5
Poço 10 (Trindade)	2528,5	57774,7	1210,8	2421,5	4,2
Poço 11 (Estrelo)	2139,5	65180,5	1070,2	2140,3	0,0

Considerando-se que o tempo sísmico é o dobro do tempo calculado pelo TTI (Tempo de Trânsito Integrado), por isso $V_2^*=2V_2$, calculado, se faz necessário o cálculo da velocidade utilizando as duas Eqs. 3.1 e 2.4 para garantir um controle de qualidade da integração e, conseqüentemente, das velocidades calculadas. Comparando-se os valores de velocidade obtidas pelas duas equações, verifica-se que o erro médio foi de 1,37%, o que valida a metodologia como aceitável para este tipo de trabalho, pois está dentro do erro máximo admitido que é de até 10%.

3.4 Mapas

Os mapas utilizados no trabalho foram confeccionados utilizando-se o software *SURFER* da *Golden software*.

No mapa topográfico (Figura 3.5), pode-se notar a existência de um padrão de curvas que possibilita inferir que há um falhamento dividindo a região em dois blocos: um contendo os poços 1-8 e outro 9-11. O poço 11 se destaca devido à altitude em que se encontra em relação aos demais.

Com os dados das velocidades estimadas de uma ou mais camadas em função das integrações dos tempos registrados, é possível elaborar mapas de contorno 2D das velocidades para cada camada de interesse (Figura 3.6).

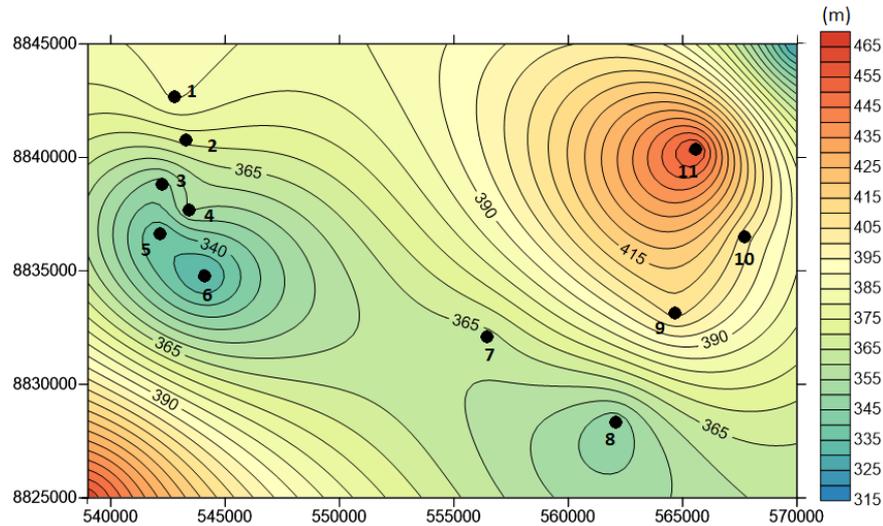


Figura 3.5: Mapa topográfico da área estudada em coordenadas UTM.

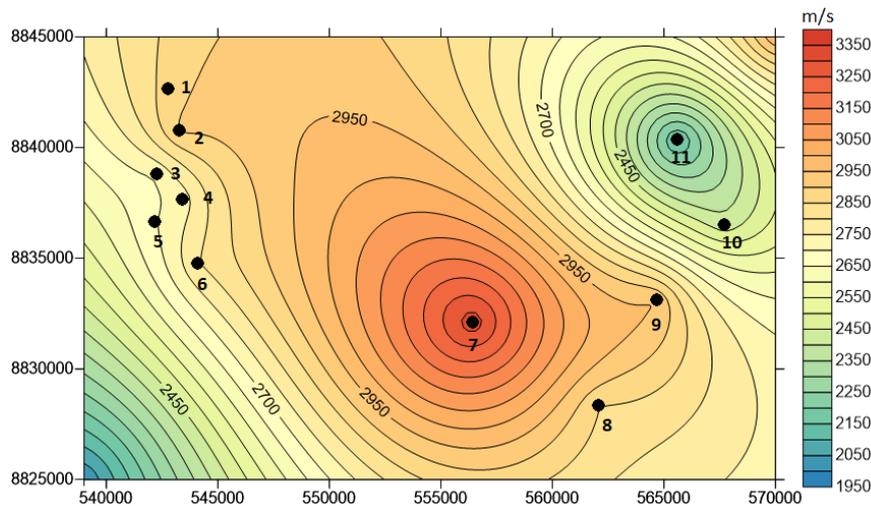


Figura 3.6: Velocidade da camada B em cada um dos poços, calculada com base na Eq. 2.4 para calcular a velocidade através do Tempo de Trânsito Integrado (Eixos x e y em coordenadas UTM).

Nesse mapa foi utilizada a velocidade V_2^* e é possível notar um certo padrão na variação da velocidade. Nos poços 1 a 6, nordeste, tem-se valores próximos um do outro o que pode indicar que há uma certa homogeneidade no comportamento estrutural litológico nas camadas ao longo desse intervalo, no qual poderiam ser incluídos os poços 7, 8 e 9 dentro desse padrão, enquanto que os poços 10 e 11 as variações podem sinalizar irregularidades na geologia como, por exemplo, outros blocos estruturais.

Para uma visão mais detalhada das variações que ocorrem na camada foram feitos mapas da profundidade do topo e da base respectivamente (figura 3.7 e 3.8).

Os poços 7,8 e 9 não constam na Figura 3.8 porque atingiram a sua profundidade final

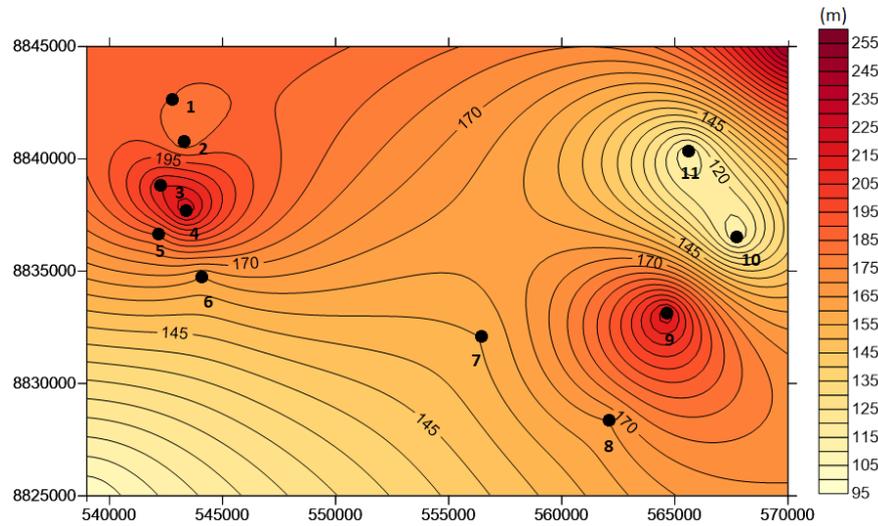


Figura 3.7: Profundidade do topo da camada B (Eixos x e y em coordenadas UTM).

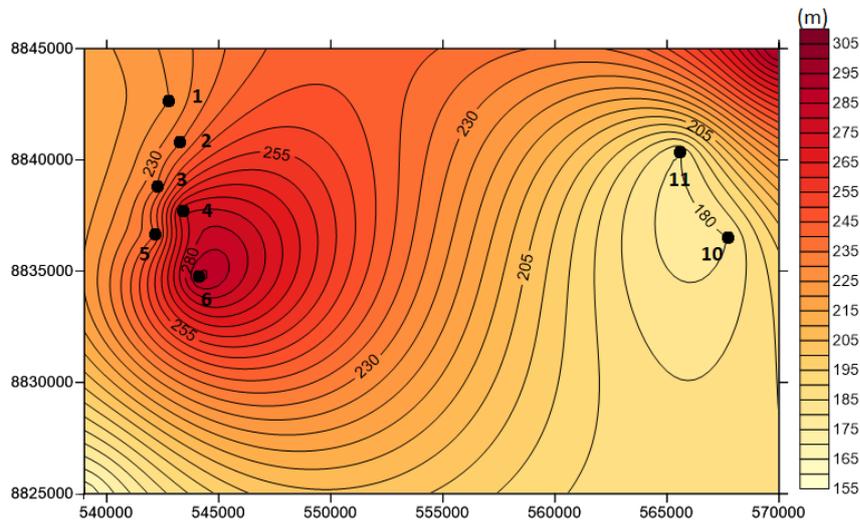


Figura 3.8: Profundidade da base da camada B (Eixos x e y em coordenadas UTM).

antes de alcançar a base da camada, portanto não se tem dados confiáveis a respeito dessa profundidade. Ainda assim, é possível notar, nas Figuras 3.7 e 3.8, que continua a se repetir um padrão existente no mapa topográfico, e que os primeiros 6 poços, que são relativamente mais profundos do que os demais poços.

A Figura 3.9 informa a espessura da camada de estudo com a finalidade de ter uma melhor compreensão de como ocorre a variação da espessura. Deve-se chamar a atenção para os valores de espessura nos poços 7, 8 e 9 que, como dito anteriormente, a perfilagem chegou ao fim antes da base camada e, portanto, é um valor aproximado.

Com isso, nota-se que os poços 1 a 5 são menos espessos do que os demais. Esse padrão é semelhante ao que ocorreu nos outros mapas, ou seja, os poços do lado direito possuem um comportamento distinto dos poços do lado esquerdo do mapa.

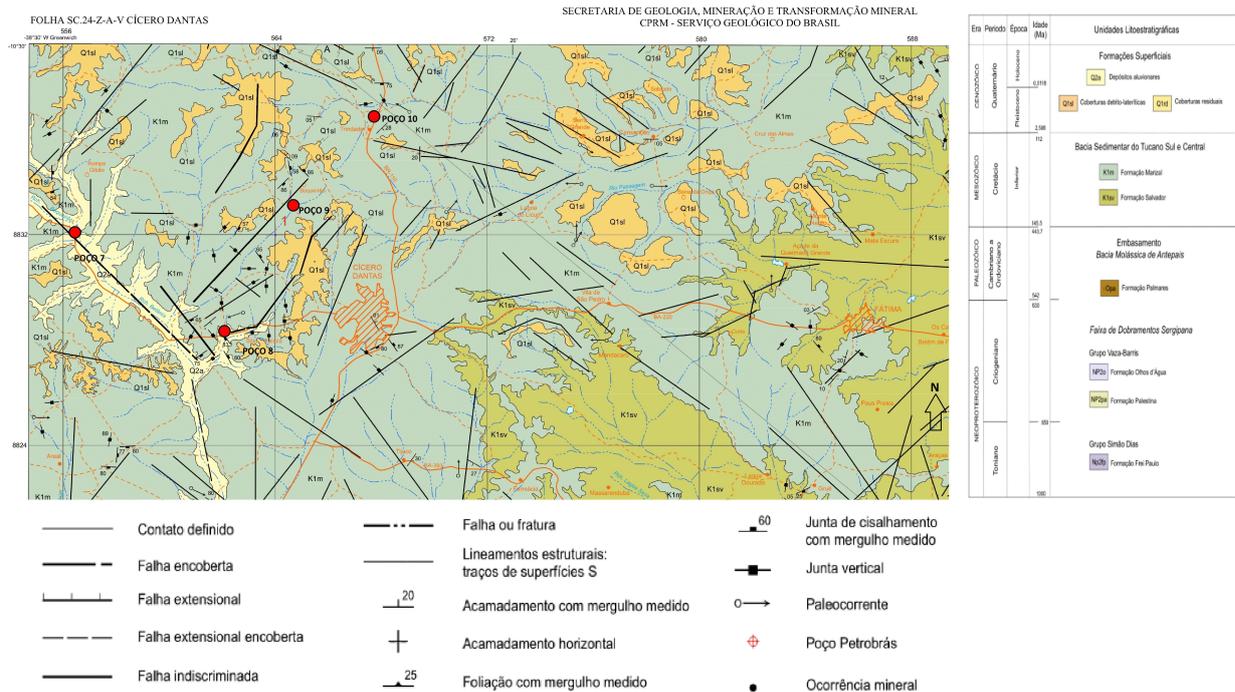


Figura 3.11: Mapa da CPRM Cícero Dantas contendo os poços 7, 8, 9 e 10, mostrando que os dois últimos estão em áreas de tabuleiros, mais alta. Modificado de (Santos e Reis, 2011).

3.5 Dados sísmicos

A única linha fornecida pela ANP foi a de número 0230-0593, em verde na Figura 3.13, relativamente distante dos poços trabalhados, foi projetada com um arranjo do tipo *Endon* que consiste basicamente em ter a fonte em uma extremidade e os receptores ordenados apenas em um de seus lados. Segundo o relatório do observador, essa aquisição possui afastamento mínimo entre fonte e receptor (offset) de 100 m, e distância entre receptores de 50 m.

3.6 Processamento de dados sísmicos

Uma vez feita a aquisição dos dados sísmicos é necessário realizar o tratamento dos mesmos para melhorar a sua qualidade e a interpretação. Esse passo foi feito utilizando o pacote de processamento do software *SeisSpace* desenvolvido pela *Landmark Graphics Corporation*.

O tratamento consiste em duas etapas, uma de pré-processamento e outra do processamento propriamente dito. As etapas aplicadas no processamento foram indicadas no fluxograma da Figura 3.12.

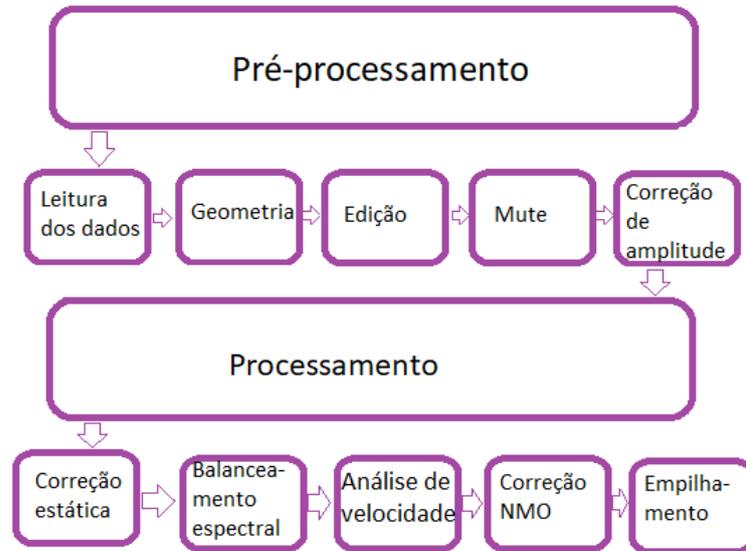


Figura 3.12: Fluxograma com as etapas aplicadas durante o processamento da Linha 0230-0593.



Figura 3.13: Linha sísmica 0230-0593. Retirado do Google Maps em 05/07/2018

3.6.1 Pré-processamento

Essa etapa consiste basicamente no preparo dos dados para utilização dos mesmos no *Seispace*.

Leitura dos dados - Nem sempre os dados fornecidos encontram-se num formato compatível com o do programa que será utilizado, sendo necessário, portanto, que os dados sejam convertidos num formato compatível. No caso desse trabalho, os dados já se encontravam no formato compatível com o *Seispace*, que é o SEG-Y.

Geometria - Nessa parte serão inclusos informações a respeito da aquisição, tais como coordenadas do tiro e do receptor, organização de um único tiro em vários receptores (famílias CMP - *Common Media Point*), afastamento fonte-receptor (off-set).

Edição - Busca-se retirar os traços com baixa razão sinal-ruído devido ao desligamento ou problemas em algum geofone ou alguma interferência causada por alguma linha de transmissão nas proximidades da aquisição. Deve ter cuidado para não retirar traços que contenham informações importantes.

Mute - Elimina o ruído existente no início dos traços sísmicos causados por pequenos erros ou movimentos durante a aquisição. é realizado através de “*picks*” (pontos selecionados) que determinam a fronteira do sismograma.

Correção de amplitude - Recupera as amplitudes que foram atenuadas devido à divergência esférica, absorção e dispersão.

3.6.2 Processamento

Correção estática de refração - Corrige as diferenças de tempo na chegada das ondas refletidas devido à variações topográficas da superfície e à zona de intemperismo (ou zona de baixa velocidade -ZBV).

Balanceamento espectral - A técnica do balanceamento espectral é útil na atenuação de ruídos sísmicos de alta energia, portanto dos groundroll (ruído causado pela detonação da fonte que gera ondas Rayleigh que são captadas pelos geofones).

Análise de velocidades - Estimativa da velocidade das camadas em subsuperfície e de grande importância para a qualidade da seção empilhada. É realizada através da análise da coerência do sinal, dentro de uma janela de tempo, para cálculo do espectro de velocidade ao longo da trajetória dos eventos de reflexão.

Correção Normal Move-Out (NMO) - Deve-se considerar o modelo de camadas plano-paralelas e efetuar a correção do atraso das reflexões devido ao afastamento fonte-receptor em relação ao tempo de incidência normal da onda.

Empilhamento - Soma os traços após a correção NMO dentro do CDP (Common Depth Point - Quando as camadas são consideradas plano-paralelas e sem variação lateral de velocidade, há um ponto comum em profundidade).

Durante o processamento, notou-se que a linha obtida através da ANP estava muito ruidosa e difícil de enxergar reflexões, como pode-se perceber na Figura 3.14:

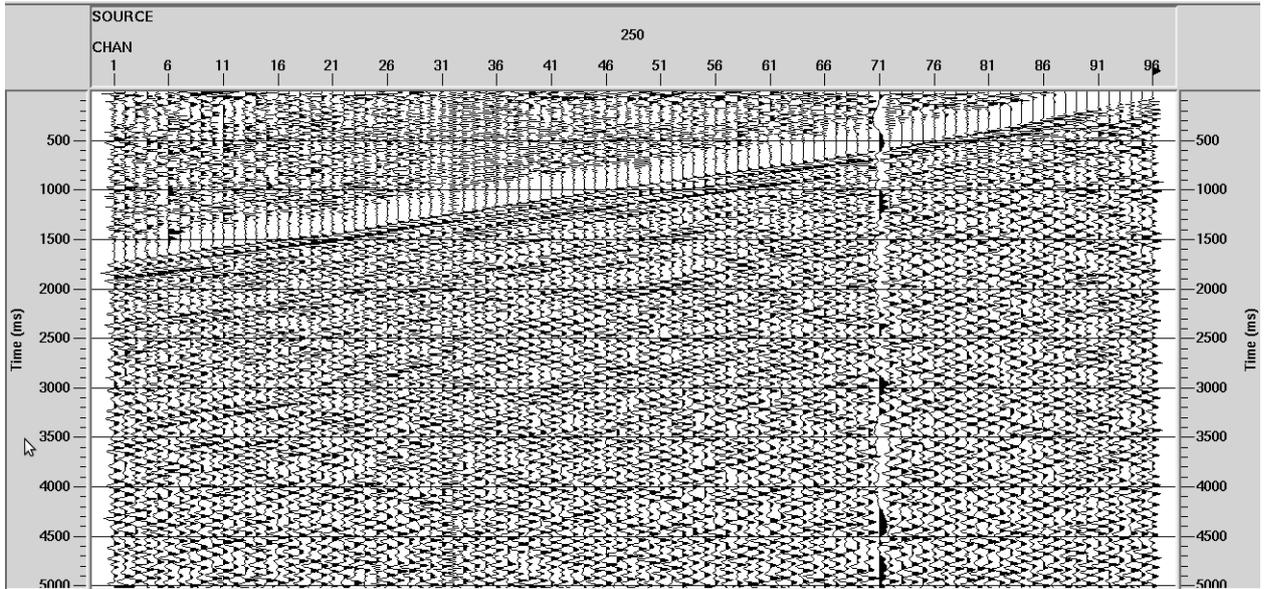


Figura 3.14: Tiro 250.

Dessa forma, apesar de se testar diferentes técnicas de filtragem, nenhum resultado muito diferente do da Figura 3.15 foi obtido. Isso se deu devido à quantidade de ruídos, muito provavelmente, por causa da camada intempérica existente na parte mais superficial. Além disso, as Figuras 3.10 e 3.11 mostram que nas localidades dos poços demarcados ocorrem depósitos aluvionares, com muitos cascalhos, seixos e blocos que sofrem a ação fluvial.

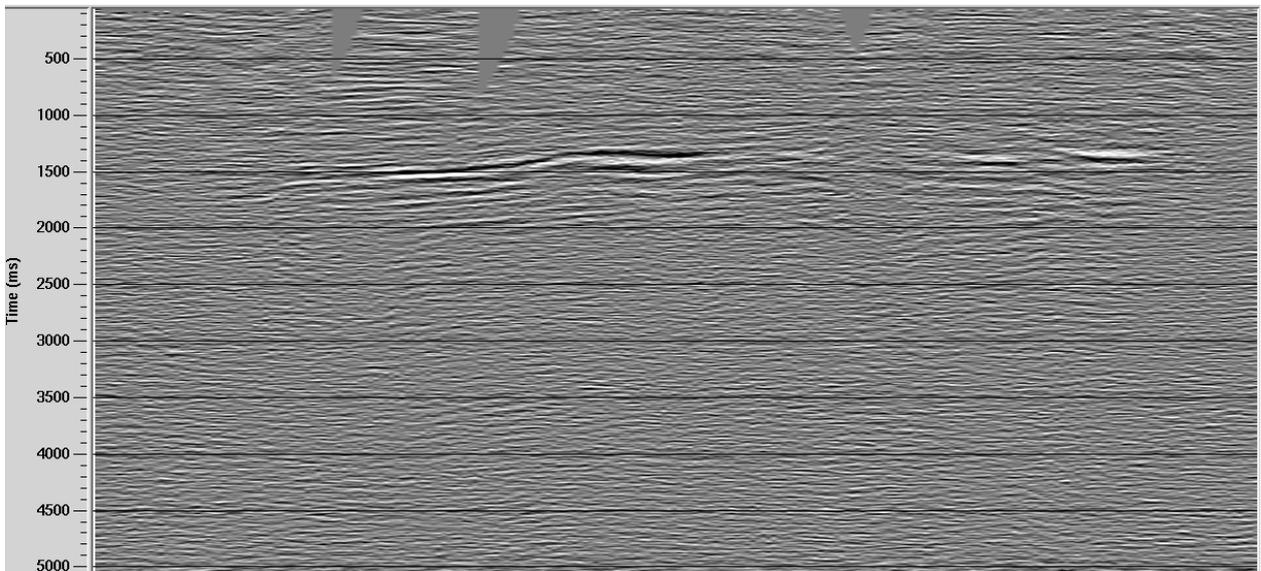


Figura 3.15: Seção empilhada da linha 0230-0593.

Na Figura 3.15, foi possível notar o embasamento, em aproximadamente 1500 ms. Essa conclusão foi com base no forte contraste existente nessa região da seção sísmica.

Para finalizar, foi confeccionado o mapa da Figura 3.16 com base no TTI partindo-se da superfície até o topo da camada, multiplicado por dois (o que corresponderia ao percurso da onda compressional que parte do transmissor, reflete no topo da camada estudada e retorna o receptor).

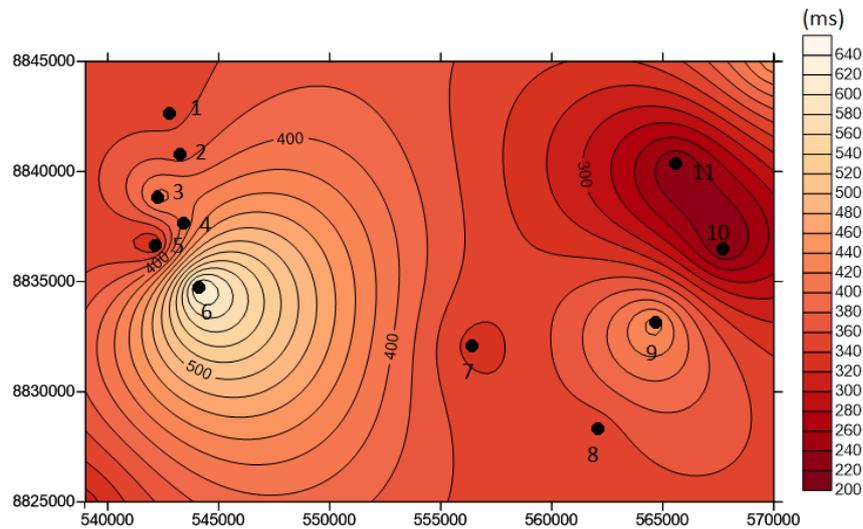


Figura 3.16: Mapa com o TTI da reflexão do topo do horizonte estudado (Eixos x e y em coordenadas UTM).

É possível notar nesse mapa que os poços 10 e 11 possuem um valor menor de TTI, o que condiz com os resultados obtidos nos mapas anteriores já que indica que essa região encontra-se mais elevada do que as demais. Além disso, o poço 6 se encontra mais “destacado” em relação ao demais, com um TTI maior, isso ocorre devido a esse mesmo poço estar na região mais baixa (como mostra a Figura 3.5), ou seja, o percurso percorrido pela onda compressional é maior, necessitando de um tempo também maior para alcançar o topo do horizonte e retornar.

Tendo em mãos os valores do dobro do TTI é possível comparar com o valor de tempo registrado da seção sísmica da Figura 3.15 e identificar a possível camada.

No caso desse estudo, o TTI médio (calculado através da média aritmética) obtido foi de 370,11 ms, é necessário buscar na seção sísmica esse valor e procurar algum refletor que indique a presença dessa camada. Porém, não foi possível estabelecer essas correlações no trabalho, onde apenas o embasamento é notável na seção sísmica, não havendo nenhum refletor confiável, principalmente na zona que se encontra o valor médio obtido com a curva do Sônico do topo da camada alvo do estudo, mostrado no mapa da Figura 3.16.

Capítulo 4

Conclusões

Nesse trabalho foram utilizados os perfis Sônico, Cáliper e o Raios Gama com o intuito de correlacionar os poços e mapear um horizonte permoporoso com base no Tempo de Trânsito Integrado. Os poços são pertencentes à Bacia do Tucano Central, que se encontra no estado da Bahia, próximos à cidade de Cícero Dantas.

A partir desses perfis, foi feita a correlação entre os poços e a definição de um horizonte mapeável. Em seguida, foram confeccionados mapas de velocidade (com base no tempo de trânsito integrado), do tempo de reflexão do topo, profundidade do topo e da base, espessura, além do mapa de altitude, em relação ao nível do mar, da camada alvo do estudo. Com esses mapas, foi possível entender melhor a dinâmica em subsuperfície através de padrões de comportamento do horizonte entre os poços. A metodologia aplicada na confecção desses mapas se mostrou adequada, trazendo certa coerência nos resultados obtidos com a perfilagem dos poços.

Ao observar todos os mapas em conjunto, nota-se um padrão de semelhança nas características dos poços que vão do 1 ao 9 e outro comportamento distinto nos poços 10 e 11. Conclui-se que esses padrões podem ser resultantes de falhamentos existentes na região, que refletem diretamente na posição do horizonte estudado, dado ao comportamento topográfico dos dois modelos: um de vale e o outro de chapada. Ao comparar os resultados obtidos nos mapeamentos realizados com o mapa geológico, observa-se que, de fato, há a existência de algumas falhas que condizem com a posição das anomalias nos mapas. Portanto, isso reforça a coerência no método aplicado que, por sua vez, deixa mais perceptível como esses falhamentos atuam nas camadas em subsuperfície. Essas falhas são importantes feições hidrogeológicas que funcionam como meios propícios à condução de fluídos ou também como barreiras, ainda mais quando situadas em arenitos porosos, como os da formação São Sebastião/Marizal, presentes na região.

Os levantamentos sísmicos, ganharam muito espaço nas últimas décadas devido à re-

solução obtida através deles. Dessa forma, é possível aproveitar a quantidade de dados de perfil Sônico existentes na bacia para utilizar como ferramenta de auxílio aos métodos de sísmica rasa, em trabalhos futuros, para uma melhor precisão nos resultados. Porém, o método sísmico é um método caro e, portanto, não costuma ser utilizado na indústria da água subterrânea. Dessa forma, o emprego do perfil sônico no mapeamento de horizontes na subsuperfície pode ser visto como uma alternativa mais barata em eventuais prospecções de sísmica rasa.

Esse fato foi constatado nesse trabalho através da linha sísmica adquirida. Essa linha, uma das poucas existentes na região, estava muito ruidosa e mesmo após todas as etapas do processamento não foi possível identificar refletores aceitáveis, que não o embasamento. Isso se deve, muito provavelmente, à existência de uma camada intempérica, aliada ao baixo nível freático, no bloco em que a linha foi realizada, e que foi responsável pela forte atenuação das ondas e também devido à linha ser relativamente antiga, de uma época que as técnicas de aquisição não tinham tanta qualidade ainda. A camada intemperizada também registrada nos perfis dos poços, impossibilitou a correlação e eventual definição de outras camadas acima do horizonte alvo do estudo. Contudo, é possível estimar a profundidade do embasamento, observado na Figura 3.15, com base no perfil Sônico. Considerando o intervalo de tempo onde não se tem dados de perfil Sônico como sendo a partir do valor médio do tempo obtido no mapa da Figura 3.16 (370 ms) até o Δt do embasamento (1500 ms), tem-se um valor de aproximadamente 1130 ms. Estimando-se uma porosidade média de 20% nesse intervalo e que ela se mantém constante, utiliza-se a equação de Wyllie para obter a velocidade desse intervalo como sendo de aproximadamente, 3758,06 m/s. Com isso, a profundidade do embasamento é de, aproximadamente, 2100 m.

É importante reafirmar, portanto, que o perfil Sônico é muito sensível à variações que podem ocorrer no poço e que ao utiliza-lo com o intuito de mapear horizontes, deve-se levar em consideração os fatores que levam a essa alteração e buscar corrigi-los. Dessa forma, o perfil Sônico se torna uma ferramenta confiável e muito útil na indústria, principalmente se não houverem dados sísmicos ou os mesmos estiverem com baixíssima qualidade.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida por ter me dado forças para finalizar essa etapa da minha vida. Agradeço também ao meu pai e a minha mãe que a vida inteira batalharam muito para que hoje eu conseguisse chegar até aqui. Apesar de meu pai não estar mais entre nós para me ver realizar o maior sonho dele, busquei ser forte para concluir e poder dedicar esse momento a ele. Sei que onde quer que esteja, estará muito orgulhoso. Quanto à minha mãe, agradeço a ela também que se encontra muito feliz e realizada por essa etapa concluída. E aos meus dois avôs por todo o carinho.

Às minhas amigas de infância, Carol (e à sua família s2) e Miga, Laricão, por todo o suporte, por toda a força, pelos momentos de risada e por aguentar os momentos de choro também. Ao Mateus Maia por toda a força, todo o carinho e a paciência e por ter feito essa graduação melhor (mas se fizer pergunta na apresentação irei retirar daqui), ao Geofamily (e à Hellen), que de fato, todos ali são parte da minha família e levarei para sempre em meu coração e em minha memória as histórias maravilhosas (e algumas adilsonestidades) que vivemos ao longo desses anos. Por fim, mas não menos importante, ao RD um grupo bem diferente entre si, que praticamente só tem em comum o fato de gritar muito quando se junta e espalha a felicidade para todos ouvirem.

Agradeço à todos que de alguma forma me ajudaram nesse TCC (Wilker, Deniels, o prof. Michelângelo, Prof. Hedison Sato, Léo Barril...), principalmente a Vini que abusei da sociedade e salvou inúmeras vezes o meu PC de morrer.

Obrigada ao Professor Girão por ter aceitado ser meu orientador, pela paciência ao longo desses semestres e ter me ensinado bastante. E agradeço aos professores que aceitaram fazer parte da banca! À CERB (Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia) e à Hydrolog Serviços de Perfilagem Ltda que gentilmente cederam os dados dos poços para esse trabalho.

À todos, muito obrigada!

Apêndice A

Tabelas resumidas dos poços

As tabelas a seguir mostram a organização dos valores LAS* usados para calcular V_1 , V_2 , V_2^* e o TTI. Os resultados obtidos foram colocados na tabela 3.1.

Tabela A.1: Poço 1 e 2

Poço 1				Poço 2			
Depth	DT	Cal	GR	Depth	DT	Cal	GR
185,0136	116,258	12,8291	61,6048	180,1368	108,7855	49,3669	13,3513
185,166	112,1807	13,1679	57,1169	180,2892	108,0852	51,3017	13,3874
185,3184	112,4687	13,95365	51,7385	180,4416	107,1078	47,7207	13,4414
185,4708	112,14	14,0499	45,2468	180,594	106,0403	43,9085	13,4718
185,6232	112,9739	12,7367	39,1968	180,7464	105,1356	43,0066	13,4718
185,7756	113,6443	12,51125	34,9611	180,8988	104,5616	43,5808	13,4597
185,928	110,9997	12,503	31,7607	181,0512	104,3601	44,2207	13,4588
186,0804	109,0385	12,49215	30,48	181,2036	104,5015	42,0456	13,4767
186,2328	114,4632	12,48815	30,7735	181,356	104,9278	38,7265	13,4868
186,3852	117,6821	12,49895	31,3815	181,5084	105,5405	38,5394	13,4779
186,5376	117,6704	12,4966	32,2788	181,6608	106,1935	39,8749	13,4756
186,69	115,4113	12,5362	32,5698	181,8132	106,7268	42,5843	13,4766
186,8424	110,8601	12,4691	30,5481	181,9656	107,0163	47,1711	13,4663
186,9948	112,9008	12,4474	27,3627	182,118	106,9969	47,7786	13,4662
187,1472	114,9336	12,48815	25,0909	182,2704	106,6574	43,6053	13,4797
187,2996	115,1191	12,47145	25,23	182,4228	106,0232	39,8744	13,4801
187,452	116,4768	12,49125	26,569	182,5752	105,1426	39,0175	13,4667
187,6044	114,7048	12,5107	27,0978	182,7276	104,0957	40,1809	13,4648
187,7568	116,0163	12,4981	26,3536	182,88	103,0217	41,7356	13,4729
187,9092	118,872	12,50615	25,255	183,0324	102,1263	39,6512	13,4569
188,0616	117,2187	12,5207	25,7762	183,1848	101,6208	33,7238	13,4219
188,214	114,8553	12,5936	27,3898	183,3372	101,6071	29,4642	13,3986
188,3664	115,3226	12,57505	27,6576	183,4896	102,0035	28,4662	13,3913
188,5188	113,1371	12,4873	27,3751	183,642	102,6014	29,7337	13,3918
188,6712	111,0241	12,47945	26,9313	183,7944	103,2197	32,046	13,3926
188,8236	111,0059	12,46	25,5396	183,9468	103,8156	33,3261	13,3923
188,976	113,91	12,41045	24,5249	184,0992	104,4512	31,1616	13,3917
189,1284	116,8075	12,40525	25,5257	184,2516	105,1587	29,4109	13,3901
189,2808	114,4884	12,4478	28,4248	184,404	105,8369	32,8024	13,3836

Tabela A.2: Poço 3 e 4

Poço 3				Poço 4			
Depth	DT	GR	Mcal	Depth	DT	GR	MCAL
210,0072	121,201	57,5775	12,4051	220,0656	113,5758	24,2766	15,441
210,1596	119,7551	55,9082	12,4006	220,218	113,2193	25,3706	15,4378
210,312	116,028	47,0902	12,37735	220,3704	113,8692	28,1296	15,4353
210,4644	113,6446	36,0281	12,3518	220,5228	114,3821	30,2444	15,4378
210,6168	114,6212	29,173	12,3267	220,6752	114,9976	33,7151	15,4408
210,7692	114,3547	28,3468	12,3455	220,8276	115,4332	38,7639	15,4416
210,9216	113,6489	29,8585	12,3457	220,98	115,479	38,5795	15,4417
211,074	113,2225	30,1511	12,33815	221,1324	115,8479	32,3734	15,4416
211,2264	112,2133	28,8271	12,3443	221,2848	116,1958	25,0561	15,4412
211,3788	111,3994	26,7453	12,35085	221,4372	116,7691	21,5016	15,4414
211,5312	111,7526	24,5799	12,3422	221,5896	117,5813	23,3649	15,4437
211,6836	112,7514	22,8561	12,33645	221,742	117,418	25,4097	15,4456
211,836	113,8575	22,7732	12,29905	221,8944	116,7415	24,711	15,4447
211,9884	114,4339	24,5262	12,26825	222,0468	116,2329	24,0613	15,4449
212,1408	114,3813	26,117	12,26925	222,1992	115,9312	24,7846	15,4442
212,2932	114,2584	25,69	12,28475	222,3516	115,8825	25,9429	15,4431
212,4456	115,0755	24,3657	12,3017	222,504	115,8818	26,6187	15,4452
212,598	116,6382	24,3728	12,2838	222,6564	115,314	25,8637	15,4424
212,7504	117,9231	24,5792	12,2733	222,8088	114,7081	24,5038	15,4277
212,9028	118,3356	23,3744	12,28275	222,9612	114,1556	24,0147	15,4044
213,0552	117,8338	23,3371	12,2857	223,1136	113,7303	24,8491	15,39
213,2076	117,1056	25,9525	12,303	223,266	113,7792	25,3615	15,3899
213,36	116,493	28,8507	12,3185	223,4184	114,4531	23,8633	15,3928
213,5124	115,9235	29,4536	12,337	223,5708	115,1981	23,272	15,3942
213,6648	115,8336	28,6144	12,36525	223,7232	115,4997	24,8625	15,3988
213,8172	116,4615	28,3516	12,3617	223,8756	115,0799	26,8206	15,4079
213,9696	117,1891	28,3417	12,34435	224,028	114,3785	28,5527	15,4103
214,122	117,7839	28,1156	12,3458	224,1804	113,7305	29,1715	15,4105
214,2744	117,8915	28,999	12,38355	224,3328	113,7188	27,5635	15,4143

Tabela A.3: Poços 5 e 6

Poço 5				Poço 6			
Depth	DT	GR	MCAL	Depth	DT	GR	MCAL
185,0136	103,908	41,6673	12,6292	160,02	102,8394	35,8758	12,2275
185,166	103,1945	38,3882	12,6012	160,1724	102,7744	37,4263	12,2289
185,3184	102,6008	37,1405	12,5845	160,3248	102,7988	38,3576	12,2301
185,4708	102,4105	38,2414	12,5829	160,4772	102,9401	37,1564	12,2269
185,6232	102,6648	39,0507	12,5842	160,6296	103,1659	37,007	12,2264
185,7756	103,9078	39,426	12,583	160,782	103,4124	39,3796	12,2277
185,928	106,0934	41,2843	12,5807	160,9344	103,6302	40,8887	12,2266
186,0804	108,8154	43,3174	12,5675	161,0868	103,8194	40,7716	12,2284
186,2328	112,0232	43,7947	12,5529	161,2392	104,0294	40,4972	12,232
186,3852	115,0337	41,4888	12,5362	161,3916	104,3197	41,0408	12,231
186,5376	116,7055	37,6975	12,5162	161,544	104,7146	41,8771	12,2324
186,69	116,3585	36,7972	12,5094	161,6964	105,1968	41,0181	12,233
186,8424	115,8421	38,6616	12,5134	161,8488	105,7483	38,6838	12,2386
186,9948	117,359	39,4302	12,5232	162,0012	106,3862	38,6674	12,2516
187,1472	121,0924	39,5828	12,5334	162,1536	107,1384	42,2424	12,2586
187,2996	123,4339	40,3847	12,5261	162,306	107,9887	43,3013	12,2484
187,452	121,9502	40,357	12,4918	162,4584	108,854	43,7053	12,2241
187,6044	121,3512	39,1615	12,4558	162,6108	109,613	48,4428	12,2058
187,7568	121,4959	37,3683	12,4471	162,7632	110,1517	51,9827	12,203
187,9092	121,3312	35,2717	12,4592	162,9156	110,4021	50,5058	12,2099
188,0616	120,7829	34,6683	12,4891	163,068	110,3556	46,7152	12,2119
188,214	119,6438	35,3793	12,5115	163,2204	110,052	42,2103	12,2024
188,3664	119,3529	36,0947	12,4998	163,3728	109,5594	40,7161	12,1947
188,5188	120,3847	35,6793	12,4608	163,5252	108,9654	41,2572	12,1978
188,6712	121,8375	35,4684	12,4289	163,6776	108,381	40,6659	12,1998
188,8236	122,2202	35,4825	12,4291	163,83	107,935	37,001	12,1994
188,976	121,7483	35,7366	12,4472	163,9824	107,7439	32,5707	12,1978
189,1284	121,0942	37,7703	12,4706	164,1348	107,8694	30,6602	12,195
189,2808	121,4812	39,5005	12,4942	164,2872	108,3044	29,3352	12,1932

Tabela A.4: Poços 7 e 8

Poço 7				Poço 8			
Depth	DT	GR	Mcal	Depth	DT	GR	Mcal
155,1432	119,7231	31,275	11,9698	165,0492	109,704	34,6727	12,06435
155,2956	117,2038	30,6512	11,95745	165,2016	110,0822	34,3409	12,0592
155,448	115,7311	29,5279	11,95945	165,354	115,0503	34,0848	12,0453
155,6004	114,508	30,1298	11,9739	165,5064	120,4322	35,3773	12,01035
155,7528	113,7814	31,2452	11,9591	165,6588	116,1735	41,2878	12,0089
155,9052	113,5046	29,807	11,94945	165,8112	111,9494	44,6224	12,00795
156,0576	113,035	28,6173	11,96305	165,9636	110,478	41,5895	12,0176
156,21	113,0415	28,7196	11,9633	166,116	109,2075	39,1172	12,01825
156,3624	113,5546	27,8684	11,9423	166,2684	107,9946	38,0513	12,0049
156,5148	113,482	27,3932	11,9415	166,4208	107,3157	35,0712	11,99705
156,6672	113,1208	27,6918	11,98495	166,5732	107,5656	32,7072	11,99305
156,8196	113,2115	28,9235	12,03005	166,7256	107,2964	34,1405	12,00845
156,972	112,7611	30,2055	12,0866	166,878	106,4062	35,6226	11,9933
157,1244	112,1033	29,0695	12,185	167,0304	106,1566	34,8373	11,999
157,2768	112,0081	27,7405	12,161	167,1828	106,009	32,9231	12,00085
157,4292	112,2206	27,3458	12,1003	167,3352	106,415	31,5741	12,00115
157,5816	111,9547	28,8042	12,0762	167,4876	107,4156	31,6048	12,0005
157,734	110,5	31,4918	12,0461	167,64	108,8759	32,8499	12,02075
157,8864	108,6184	32,6532	12,0955	167,7924	110,1653	34,6284	12,0508
158,0388	108,0013	33,492	12,24465	167,9448	111,0728	37,21	12,0399
158,1912	108,3975	34,1509	12,3218	168,0972	111,5354	38,1985	12,01555
158,3436	109,8503	32,4172	12,26935	168,2496	111,9427	36,3626	12,0247
158,496	112,1315	30,4557	12,2295	168,402	112,3837	35,1176	12,03255
158,6484	112,9795	30,7713	12,27345	168,5544	112,3408	36,5124	12,00955
158,8008	113,0559	32,3514	12,44415	168,7068	111,9169	36,7736	12,00075
158,9532	113,2912	32,8014	12,60685	168,8592	111,2954	35,4667	12,00975
159,1056	112,7182	30,8779	12,46565	169,0116	111,5401	36,5057	12,0137
159,258	111,9585	29,4115	12,1678	169,164	112,0411	37,934	12,02285
159,4104	111,9768	28,292	12,03415	169,3164	111,7037	39,0079	12,0679

Tabela A.5: Poço 9 e 10

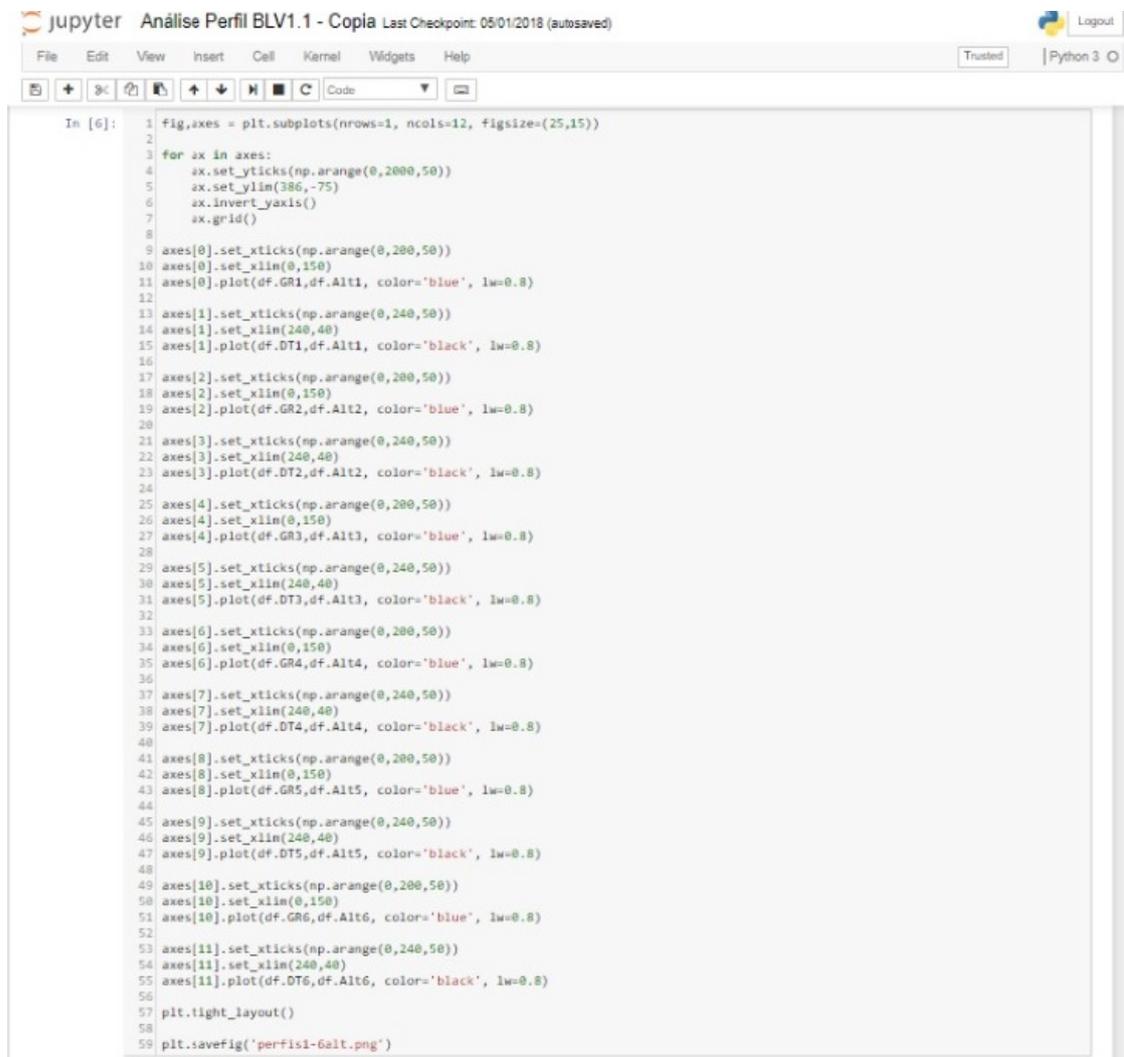
Poço 9				Poço 10			
Depth	DT	GR	Mcal	Depth	DT	GR	MCAL
220,218	108,1158	58,3648	10,1945	110,1852	136,4643	100,8738	11,9832
220,3704	111,6807	59,7811	10,12825	110,3376	137,5657	100,9594	12,033
220,5228	104,3703	57,8087	10,0294	110,49	142,3522	101,0773	11,9865
220,6752	101,2376	52,4658	9,8912	110,6424	140,5943	101,1743	11,99785
220,8276	101,156	47,893	10,0076	110,7948	136,6751	101,2436	12,0113
220,98	101,0587	48,5363	10,26765	110,9472	135,9248	101,3257	11,95715
221,1324	101,1497	51,2319	10,3436	111,0996	135,9415	101,4756	11,91535
221,2848	101,3361	49,8049	10,3771	111,252	136,2445	101,7321	11,90305
221,4372	101,7619	47,2879	10,54295	111,4044	136,5646	102,1009	11,8906
221,5896	102,2734	48,2178	10,52885	111,5568	136,3559	102,5418	11,8984
221,742	102,8298	49,0757	10,3784	111,7092	134,4612	102,9676	11,89595
221,8944	103,2736	46,9285	10,30965	111,8616	131,2603	103,2703	11,9087
222,0468	103,7424	44,9621	10,2228	112,014	127,6314	103,365	11,8864
222,1992	104,2769	43,7826	10,30765	112,1664	124,4891	103,2234	11,8674
222,3516	104,3212	43,3323	10,8172	112,3188	123,6302	102,8861	11,87765
222,504	103,7088	44,2724	10,69375	112,4712	125,8699	102,4534	11,8881
222,6564	104,0533	45,6578	9,83025	112,6236	128,842	102,0646	11,863
222,8088	104,8471	45,708	9,25575	112,776	131,0864	101,8643	11,87835
222,9612	105,4098	44,6843	9,15135	112,9284	132,2753	101,9513	11,87635
223,1136	105,7234	43,1086	9,5158	113,0808	131,3348	102,3213	11,8667
223,266	105,5953	43,4481	9,97365	113,2332	132,9201	102,8466	11,8547
223,4184	105,4182	46,1989	10,0576	113,3856	138,4274	103,3387	11,8981
223,5708	105,1077	47,0489	9,9642	113,538	138,3373	103,6453	11,9491
223,7232	104,6753	46,1862	9,64745	113,6904	130,3748	103,6773	12,07535
223,8756	104,3118	47,5704	9,0487	113,8428	122,2436	103,3603	12,1502
224,028	104,0033	48,3564	8,94075	113,9952	121,7765	102,634	12,0949

Tabela A.6: Poço 11

Depth	DT	GR	MCAL
110,3891	156,0958	157,3675	12,5988
110,2652	154,2693	156,8151	12,5583
110,4175	152,364	155,2532	12,5041
110,5698	152,0296	153,2288	12,4912
110,7221	152,4095	152,364	12,5021
110,8744	152,6742	152,0296	12,5321
111,0267	153,258	152,4095	12,5318
111,179	154,2999	152,5125	12,5225
111,3313	155,6508	152,9198	12,5029
111,4836	156,978	153,258	12,4936
111,6359	156,985	154,2999	12,4748
111,7882	152,4867	155,6508	12,4521
111,9405	146,6954	156,3403	12,4392
112,0928	145,0881	157,345	12,4237
112,2451	144,7184	155,3909	12,4215
112,3974	144,8047	152,4867	12,4144
112,5497	145,0231	146,6954	12,3854
112,702	145,0095	145,5375	12,3756
112,8543	144,9902	144,8391	12,3829
113,0066	145,6466	144,726	12,4028
113,1589	145,2532	144,8047	12,4064
113,3112	140,0894	145,0231	12,3941
113,4635	132,6897	145,0095	12,3686
113,6158	130,6201	144,9378	12,3585
113,7681	132,0786	145,2668	12,3401
113,9204	139,4046	145,7917	12,3196
114,0727	150,0054	145,2532	12,3167
114,225	154,0847	140,0894	12,3377
114,3773	150,9945	135,9734	12,3548
114,5296	142,2143	131,0332	12,3797
114,6819	135,4812	130,9126	12,3884
114,8342	133,3615	132,0786	12,3866
114,9865	133,6548	139,4046	12,3831

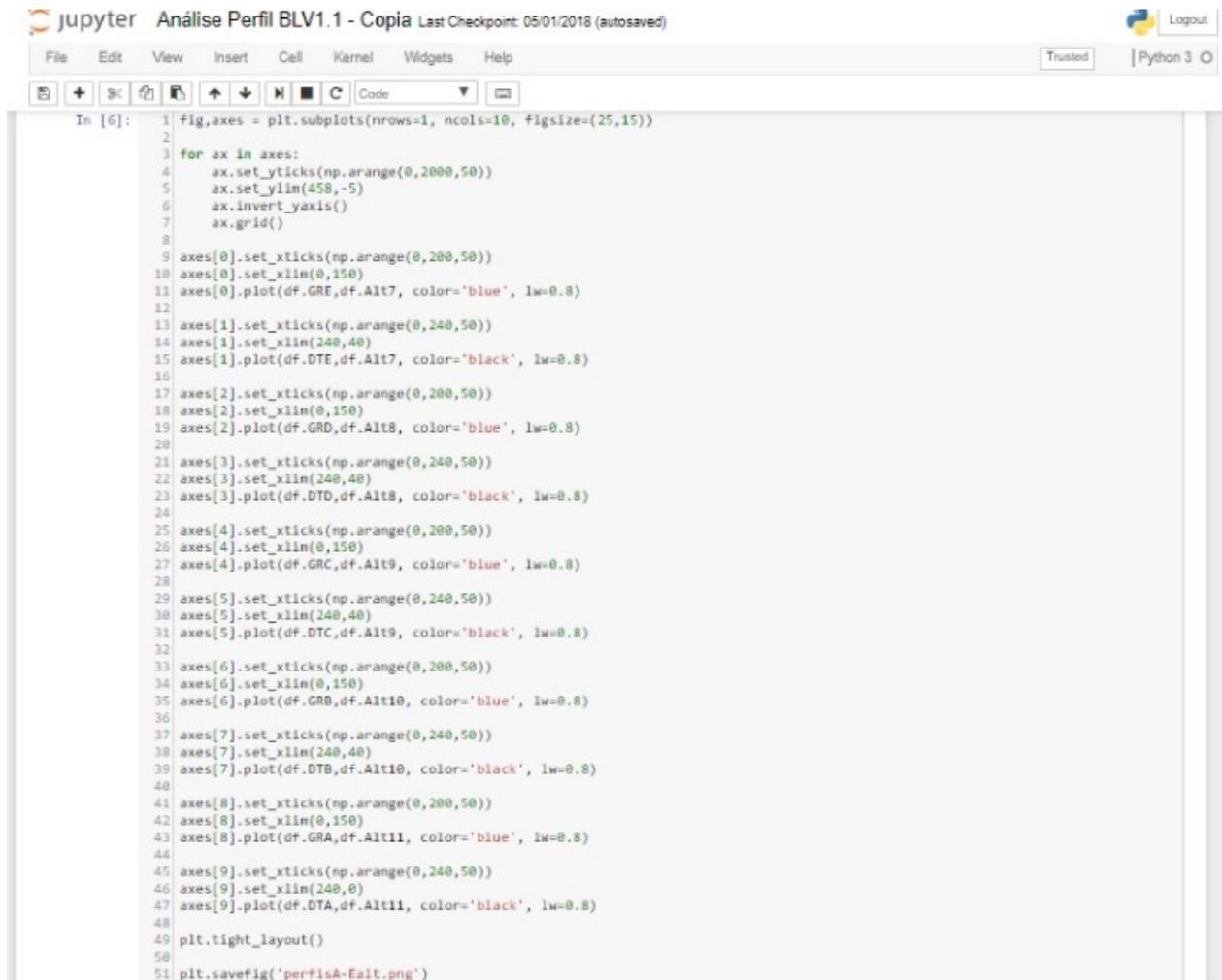
Apêndice B

Código utilizado no Python



```
In [6]: 1 fig,axes = plt.subplots(nrows=1, ncols=12, figsize=(25,15))
2
3 for ax in axes:
4     ax.set_yticks(np.arange(0,2000,50))
5     ax.set_ylim(386,-75)
6     ax.invert_yaxis()
7     ax.grid()
8
9 axes[0].set_xticks(np.arange(0,200,50))
10 axes[0].set_xlim(0,150)
11 axes[0].plot(df.GR1,df.Alt1, color='blue', lw=0.8)
12
13 axes[1].set_xticks(np.arange(0,240,50))
14 axes[1].set_xlim(240,40)
15 axes[1].plot(df.DT1,df.Alt1, color='black', lw=0.8)
16
17 axes[2].set_xticks(np.arange(0,200,50))
18 axes[2].set_xlim(0,150)
19 axes[2].plot(df.GR2,df.Alt2, color='blue', lw=0.8)
20
21 axes[3].set_xticks(np.arange(0,240,50))
22 axes[3].set_xlim(240,40)
23 axes[3].plot(df.DT2,df.Alt2, color='black', lw=0.8)
24
25 axes[4].set_xticks(np.arange(0,200,50))
26 axes[4].set_xlim(0,150)
27 axes[4].plot(df.GR3,df.Alt3, color='blue', lw=0.8)
28
29 axes[5].set_xticks(np.arange(0,240,50))
30 axes[5].set_xlim(240,40)
31 axes[5].plot(df.DT3,df.Alt3, color='black', lw=0.8)
32
33 axes[6].set_xticks(np.arange(0,200,50))
34 axes[6].set_xlim(0,150)
35 axes[6].plot(df.GR4,df.Alt4, color='blue', lw=0.8)
36
37 axes[7].set_xticks(np.arange(0,240,50))
38 axes[7].set_xlim(240,40)
39 axes[7].plot(df.DT4,df.Alt4, color='black', lw=0.8)
40
41 axes[8].set_xticks(np.arange(0,200,50))
42 axes[8].set_xlim(0,150)
43 axes[8].plot(df.GR5,df.Alt5, color='blue', lw=0.8)
44
45 axes[9].set_xticks(np.arange(0,240,50))
46 axes[9].set_xlim(240,40)
47 axes[9].plot(df.DT5,df.Alt5, color='black', lw=0.8)
48
49 axes[10].set_xticks(np.arange(0,200,50))
50 axes[10].set_xlim(0,150)
51 axes[10].plot(df.GR6,df.Alt6, color='blue', lw=0.8)
52
53 axes[11].set_xticks(np.arange(0,240,50))
54 axes[11].set_xlim(240,40)
55 axes[11].plot(df.DT6,df.Alt6, color='black', lw=0.8)
56
57 plt.tight_layout()
58
59 plt.savefig('perfis1-6alt.png')
```

Figura B.1: Código do Python utilizado nos poços 1 a 6.



```
In [6]: 1 fig,axes = plt.subplots(nrows=1, ncols=10, figsize=(25,15))
2
3 for ax in axes:
4     ax.set_yticks(np.arange(0,2000,50))
5     ax.set_ylim(458,-5)
6     ax.invert_yaxis()
7     ax.grid()
8
9 axes[0].set_xticks(np.arange(0,200,50))
10 axes[0].set_xlim(0,150)
11 axes[0].plot(df.GRE,df.Alt7, color='blue', lw=0.8)
12
13 axes[1].set_xticks(np.arange(0,240,50))
14 axes[1].set_xlim(240,40)
15 axes[1].plot(df.DTE,df.Alt7, color='black', lw=0.8)
16
17 axes[2].set_xticks(np.arange(0,200,50))
18 axes[2].set_xlim(0,150)
19 axes[2].plot(df.GRD,df.Alt8, color='blue', lw=0.8)
20
21 axes[3].set_xticks(np.arange(0,240,50))
22 axes[3].set_xlim(240,40)
23 axes[3].plot(df.DTD,df.Alt8, color='black', lw=0.8)
24
25 axes[4].set_xticks(np.arange(0,200,50))
26 axes[4].set_xlim(0,150)
27 axes[4].plot(df.GRC,df.Alt9, color='blue', lw=0.8)
28
29 axes[5].set_xticks(np.arange(0,240,50))
30 axes[5].set_xlim(240,40)
31 axes[5].plot(df.DTC,df.Alt9, color='black', lw=0.8)
32
33 axes[6].set_xticks(np.arange(0,200,50))
34 axes[6].set_xlim(0,150)
35 axes[6].plot(df.GRD,df.Alt10, color='blue', lw=0.8)
36
37 axes[7].set_xticks(np.arange(0,240,50))
38 axes[7].set_xlim(240,40)
39 axes[7].plot(df.DTB,df.Alt10, color='black', lw=0.8)
40
41 axes[8].set_xticks(np.arange(0,200,50))
42 axes[8].set_xlim(0,150)
43 axes[8].plot(df.GRA,df.Alt11, color='blue', lw=0.8)
44
45 axes[9].set_xticks(np.arange(0,240,50))
46 axes[9].set_xlim(240,0)
47 axes[9].plot(df.DTA,df.Alt11, color='black', lw=0.8)
48
49 plt.tight_layout()
50
51 plt.savefig('perfilA-Falt.png')
```

Figura B.2: Código do Python utilizado nos poços 7 a 11.

Apêndice C

Cross-plot gráfico BHC x Cáliper

Foi inserido no gráfico de correção dos valores anômalos do BHC, devido à variações dos valores do cáliper, os valores obtidos nos poços estudados.

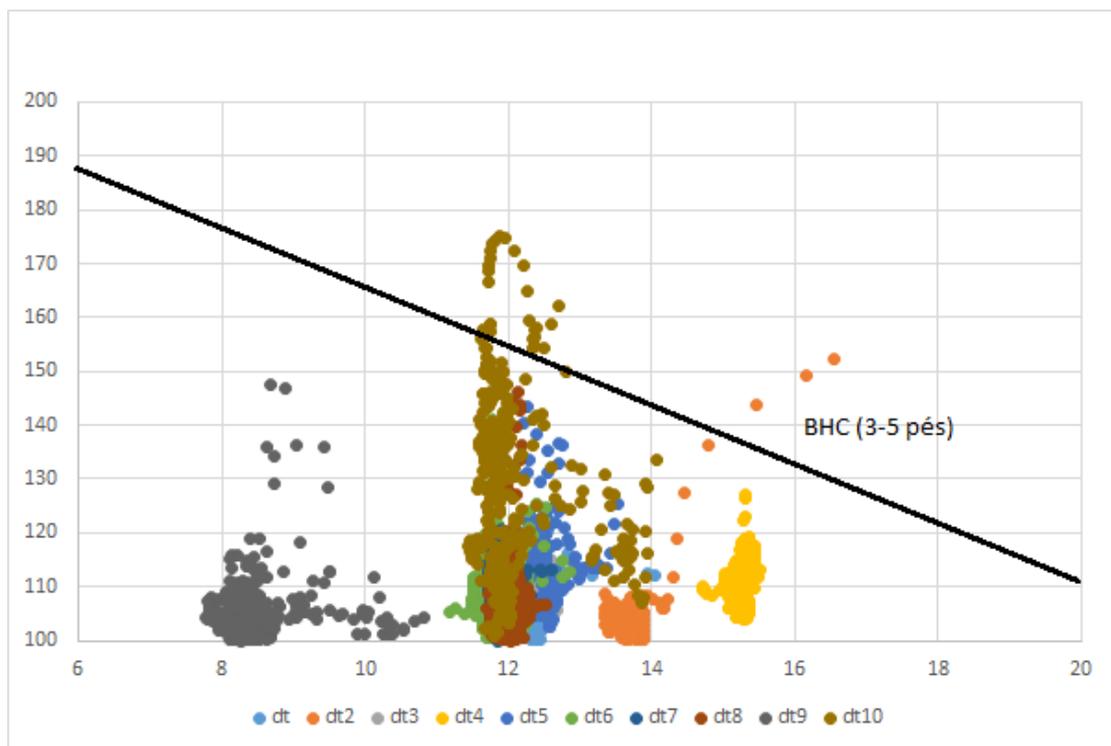


Figura C.1: Cross-plot do BHC.

Referências

- Angelim, L. e Kosin, M. (2001) Programa de levantamentos geológicos do Brasil, Nota Explicativa (In Portuguese). CPRM, CDROM, Brasília, Brazil.
- ANP (2018) Bdep webmaps.
- Asquith, G. e Krygowski, D. (2004) Aapg methods in exploration, no. 16, chapter 1: Basic relationships of well log interpretation, AAPG Special Volumes, Texas, USA.
- Burch, D. (2002) Log ties seismic to ground truth, The Geophysical Corner, **2**:26–29.
- Caixeta, J. M.; Bueno, G. V.; Magnavita, L. P. e Feijó, F. (1994) Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá, Boletim de Geociências da PETROBRAS, **8**(1):163–172.
- Chang, H. K.; Kowsmann, R. O.; Figueiredo, A. M. F. e Bender, A. (1992) Tectonics and stratigraphy of the East Brazil rift system: An overview, Tectonophysics, **213**(1-2):97–138.
- Costa, I. P.; Milhomem, P. S.; Bueno, G. V.; Lima e Silva, H. S. e Kosin, M. D. (2007) Subbacias do Tucano Sul e Central, Boletim de Geociências da PETROBRAS, **15**(2):433–443.
- Exploracionistas (2011) Sismograma sintético e a correlação perfil- sísmica.
- Ferronato, J. P. F. (2013) Arquitetura de fácies e evolução estratigráfica dos sistemas delatácicos do grupo Ilhas na Bacia do Tucano Central–BA.
- Figueiredo, A. M. (2007) Mapeamento Automático de Horizontes e Falhas em Dados Sísmicos 3D baseado no algoritmo de Gás Neural Evolutivo, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Gandol, M.; Mathur, R. R. e Eisawi, A. A. (2016) Correlation of seismic, well logging and pyrolysis analysis for evaluating hydrocarbon, Journal of Geosciences and Geomatics, **4**:82–90.
- Goetz, J.; Dupal, L. e Bowler, J. (1979) An investigation into discrepancies between sonic log and seismic check spot velocities, The APPEA Journal, **19**(1):131–141.

- Kosin, M. (2009) O embasamento das bacias do Recôncavo, de Tucano e de Jatobá-uma visão a partir das cartas geológicas do Brasil ao milionésimo, *Boletim de Geociências da Petrobras*, **17**:89–108.
- Kowalski, J. et al. (1975) Formation strength parameters from well logs, In: *SPWLA 16th Annual Logging Symposium*, Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 4-7 June, New Orleans, Louisiana.
- Loureiro, F. O. (2013) Análise da geometria e correção estática no processamento sísmico 3D, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil.
- Maps, G. (2017) Web mapping.
- Miranda, H. C. B. (2004) Interpretação conjunta de dados de GPR e medidas de permeabilidade sobre um análogo de reservatório siliciclástico falhado na Bacia de Tucano, no NE do Brasil, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Nery, G. G. (1990) Perfilagem geofísica de poços: Notas de aula, Petrobras/Cen-Nor.
- Nery, G. G. (2013) Perfilagem Geofísica em Poço Aberto - fundamentos básicos com ênfase em petróleo, Rio de Janeiro, SBGF, 222p.
- Neves, S.; Borges, J.; Caldeira, B.; Moita, P.; Pedro, J. e Boaventura, R. (2015) Aspectos sobre os métodos de refração sísmica, Associação Portuguesa de Geólogos, Universidade de Évora, ICT- Instituto Ciências da Terra, Évora, Portugal.
- Peixinho, M. A. L. (2017) Hidrogeologia do sistema aquífero Marizal/São Sebastião na Sub-Bacia do Tucano Central, Estado da Bahia, Dissert. de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia.
- Rossi, G.; Moro, G. D.; Mammo, T.; Nieto, D.; Picotti, S.; Vesnaver, A. e Vuan, A. (2001) A 3d seismic survey for groundwater protection, In: *2001 SEG Annual Meeting*.
- Santos, C. C. e Reis, C. (2011) Projeto bacia do Tucano Central: Folha Caimbé-SC. 24-ZAI: Folha Jeremoabo-SC. 24-ZA-II.
- Santos, C. C.; Reis, C. e Pedreira, A. J. (2010) Projeto Bacia do Tucano Central: Folha Ribeira do Pombal-SC. 24-ZA-IV: Folha Cícero Dantas-SC. 24-ZAV.
- Shtivelman, V. (2003) Application of shallow seismic methods to engineering, environmental and groundwater investigations, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **44**:209–222.
- Silva, D. C. M. (2013) Cálculo do ângulo limite.
- Silva, F. G. M. e Beneduzi, C. F. (2018) O perfil sônico, a física de rochas e a identificação de fluidos em reservatórios siliciclásticos, *Boletim SBGF*, **103**:22–25.

- Silva, M. G. (2004) Processamento de dados sísmicos da Bacia do Tacutu, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Steeple, D. W. (2000) A review of shallow seismic methods, *Annals of Geophysics*, **43**(6).
- Wikipedia (2017) Mapa localização de Cícero Dantas e Banzaê - BA.
- Wyllie, M. R. J.; Gregory, A. R. e Gardner, L. W. (1956) Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, *Geophysics*, **21**(1):41–70.
- Yadav, L.; Ghosh, D.; Maurya e Bhattacharya (2004) Calibration of sonic logs for seismic applications in Upper Assam, *Society Petroleum Geophysicists*, pp. 1–18.
- Yilmaz, Ö. (2001) *Seismic data analysis*, vol. 1, Society of Exploration Geophysicists Tulsa.