

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO E RESISTIVIDADE ELÉTRICA  
APLICADOS NAS FORMAÇÕES SÃO SEBASTIÃO E MARIZAL DAS  
SUB-BACIAS DO TUCANO SUL E CENTRAL, CRETÁCEO (BA).**

Larissa Natsumi Tamura

Orientador: Prof. Dr. Renato Paes de Almeida

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
Programa de Pós- Graduação em Geoquímica e Geotectônica

Versão corrigida  
SÃO PAULO  
2015

Larissa Natsumi Tamura

**RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO E RESISTIVIDADE ELÉTRICA  
APLICADOS NAS FORMAÇÕES SÃO SEBASTIÃO E MARIZAL DAS  
SUB-BACIAS DO TUCANO SUL E CENTRAL, CRETÁCEO (BA).**

Dissertação apresentada ao Instituto de  
Geociências da Universidade de São Paulo  
para obtenção de título de Mestre em  
Geologia.

Área de concentração: Geotectônica

Orientador: Prof. Dr. Renato Paes de Almeida

SÃO PAULO  
2015

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Tamura, Larissa Natsumi

Radar de penetração no solo (GPR) e resistividade elétrica (ER) aplicados nas Formações São Sebastião e Marizal das sub-bacias do Tucano Sul e Central, Cretáceo (BA) / Larissa Natsumi Tamura. - São Paulo, 2015

84 p.: il

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP

Orient.: Almeida, Renato Paes

1. Radar facies 2. Métodos geofísicos 3. Formação São Sebastião e Marizal 4. Ambiente fluvial I.  
Título

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente ao meu orientador Prof. Drº Renato Paes de Almeida que me deu oportunidade de iniciar um novo projeto em seu grupo. Ele me incentivou e acreditou nessa nova ideia me dando força e confiança para seguir em frente. Sou muito grata a Liliane Janikian Paes de Almeida que também me auxiliou e me apoiou tanto na pesquisa quanto na comunicação com o Prof. Drº Renato quanto na sua ausência.

Agradeço aos colegas e amigos da pós-graduação, em relação às explicações sobre a geologia, indicações bibliográficas, ajuda na coleta de dados, e auxílio com programas de processamento. Sempre que precisei pude contar a ajuda de vocês: André Marconato, André Stern, Bernardo Tavares Freitas, Carlos Carrasco, Cristiano Galeazzi Padalino, Felipe Torre Figueiredo, Mariana Cossa de Oliveira, Marta Jácomo, Selma Rodrigues, Samuel Abdala e Simone Carrera.

Aos docentes que sempre estiveram dispostos a me ensinar e me ajudar nessa nova etapa, agradeço imensamente o apoio de vocês: Assis Cavarallo, Fábio Taioli, José Faraco Gallas e Milene Fornati. Também sou muito grata aos técnicos que me ensinaram e auxiliaram na execução em campo: Fernando Augusto Saraiva (pesquisador), Ernande Costa e ao Samuca.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro de pesquisa (Processo Nº 2013/01825) e ao programa de pós graduação de Geotectônica e Geoquímica CAPES PROEX (Processo Nº 558/2011). Também agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa concedida (Processo Nº 832194/1999-9) por meio demanda de cota institucional.

E finalmente agradecer a minha família, namorado e amigos que sempre me apoiaram na decisão de fazer o mestrado, que proporcionaram alegria e tranquilidade em dias difíceis, e torceram muito para que esse dia chegasse.

## RESUMO

Um dos motivos para o avanço em caracterização de estrutura interna em depósitos fluviais é a utilização de métodos geofísicos. Um método amplamente aplicado em ambientes fluviais é o Radar de Penetração no Solo (GPR - *Ground Penetrating Radar*). Por meio dele é possível fazer interpretações por radar fácies, frequentemente aplicadas em rios ativos, porém em depósitos antigos esse método não é amplamente testado. Em contra partida, há um grande interesse nesse tipo de estudo devido à importância de modelos de reservatórios análogos de hidrocarbonetos.

Os afloramentos das Formações São Sebastião e Marizal da Bacia do Tucano foram amplamente estudados em relação à sedimentologia por meio dos estudos de análises de fácies e arquitetura deposicional. Porém, o estudo arquitetural com métodos geofísicos ainda não haviam sido executados nessa área. Desta forma, a principal contribuição do presente trabalho foi aplicar métodos geofísicos em afloramentos bem expostos e comparar os resultados com estudos sedimentares feitos na área e outros trabalhos feitos em rios ativos.

Foram utilizados dois métodos. O primeiro método teve como finalidade aprimorar as ferramentas de interpretação de radar fácies por meio de comparações de dados Radar de penetração no solo (GPR - *ground penetrating radar*) com estruturas sedimentares e elementos arquiteturais, considerando a resolução do método e suas limitações. Para complementar o estudo foi introduzido um segundo método, denominado resistividade elétrica (ER - *electric resistivity*), que contribui nas investigações litológicas em subsuperfície e auxilia o método GPR em camadas muito condutivas.

Através dos resultados obtidos pelo método GPR foi possível identificar oito radar fácies diferentes: 1) Refletores levemente ondulados com truncamentos de baixo ângulo. Foram interpretados como limites de série sub-horizontais, com estratos cruzados abaixo da resolução. 2) Refletores inclinados com grande amplitude e dentro deles refletores de menor amplitude inclinados. Foram interpretados como limites de séries inclinados separando conjuntos de estratos cruzados tabulares. 3) Refletores inclinados com grande amplitude e dentro deles refletores de menor amplitude, descontínuos e de forma côncava para o topo. Foram interpretados como limites de séries inclinados separando conjuntos de estratos cruzados acanalados. 4) Refletores

inclinados com alto ângulo em conjuntos métricos. Os refletores inclinados são interpretados como resultado de estratos cruzados de grande porte. 5) Refletores com forma côncava para o topo sendo recobertos por refletores horizontais com terminações em *onlap*. Foram interpretados como estruturas de corte e preenchimento com forma canalizada e preenchimento interno plano-paralelo ou com séries cruzadas menor que a resolução do método. 6) Refletores sub-horizontais de grande amplitude e dentro deles refletores de forma côncava para o topo com menor amplitude. Foram interpretados como limites de séries sub-horizontais separando conjuntos de estratos cruzados acanalados. 7) Refletores horizontais contínuos bem marcados e dentro deles refletores inclinados de menor amplitude. Foram interpretados como limites de séries horizontais e estratos internos cruzados tabulares. 8) Refletores com grande amplitude, inclinados em alto ângulo. Foram interpretados como estratos cruzados de grande porte de dunas eólicas.

Ao comparar as seções de GPR com as estruturas sedimentares do afloramento observou-se que houve compatibilidade entre os refletores encontrados nas seções GPR e as estruturas sedimentares observadas em afloramento. Em alguns casos nota-se que a resolução do método é eficaz para identificar estruturas decimétricas, dificilmente encontradas em trabalhos de radar fácies. Porém, as profundidades das seções não ultrapassaram de 5 m, ou seja, foi possível identificar refletores em alta resolução com uma antena de 100 MHz, mas em subsuperfície rasa.

Os perfis de ER conseguiram diferenciar as camadas arenosas das pelíticas, o que pode justificar o motivo pelo qual alguns locais as seções GPR não obtiveram resultados relevantes.

Desta forma, os métodos geofísicos aplicados mostraram grande potencial para estudos futuros sobre a arquitetura deposicional das unidades investigadas. Os resultados foram satisfatórios e compatíveis aos estudos prévios nos afloramentos e com resolução maior que a normalmente obtida em sucessões inconsolidadas.

## ABSTRACT

One of the factors for the advances in the characterization of fluvial deposits internal structures is the application of geophysical methods. A frequently applied method in fluvial environments is the Ground Penetrating Radar. Through this method, it is possible to interpret radar facies, often focusing on active river systems, nevertheless the method is not yet extensively tested in the ancient rock record. On the other hand, there is great interest in this type of study due to the importance of hydrocarbon reservoir analogue models.

The São Sebastião Formation and Marizal Formation outcrops in the Tucano Basin have been subject to facies and architectural element analysis in previous works. Nevertheless, the architectural study through geophysical methods has not been applied in the area. Therefore, the main goal of the present work was to apply geophysical methods to well exposed outcrops and to compare the results with those of results from similar surveys developed in active fluvial systems.

Two basic methods were applied. The first method with the aim of contributing to the improvement of the interpretation tools of radar facies through the comparison of GRP data with sedimentary structures and architectural elements, considering the method resolution and limitations. In order to fill in the gaps, the second method, named electrical resistivity (ER), contributed to the lithological investigation in subsurface, imaging very conductive layers.

Through the results obtained in the GPR surveys it was possible to identify eight radar facies: 1) Slightly undulated reflector with low-angle truncations. These were interpreted as undulated strata, low angle cross stratification and irregular set boundaries with cross set below the detection limit of the surveys. 2) High amplitude inclined reflectors, bounding lower amplitude reflectors inclined at greater angles. These were interpreted as inclined cross set boundaries with internal planar cross sets. 3) High amplitude inclined reflectors, bounding lower amplitude, concave-up, discontinuous reflectors. These were interpreted as inclined cross set boundaries with internal through cross sets. 4) High angle inclined reflectors disposed in metric sets passing laterally into 2 or 3. These were interpreted as large-scale planar cross-sets. 5) Slightly undulated concave-up reflectors covered by horizontal reflectors with onlap

terminations. Interpreted as cut and fill structures filled by planar horizontal stratified sediment or cross set smaller than survey resolution. 6) Sub-horizontal, high amplitude reflectors with internal lower amplitude concave up discontinuous reflectors. Interpreted as trough cross sets with by sub-horizontal set boundaries. 7) Well defined continuous horizontal reflectors with internal lower amplitude inclined reflectors. Interpreted as horizontal set boundaries with internal planar cross sets. 8) Meter-scale high amplitude high angle inclined reflectors. Interpreted large-scale aeolian dune foresets.

Comparison between the GPR sections and the described sedimentary structures revealed compatibility between the reflector geometries and the sedimentary structures. In some situations, the resolution enabled the recognition of decimetric structures, seldom described in published radar facies surveys. On the other hand, depth of investigation did not surpass 5 m. In this way, using a 100 Hz antenna, it was possible to identify reflectors with great resolution, but only in the shallow subsurface.

ER profiles enabled the recognition of sand and clay rich beds, bringing light into the question of why some GPR surveys did not lead to good results.

Therefore, the applied geophysical methods revealed a great potential for further works on the depositional architecture of the studied units, leading to results comparable with those obtained through the direct study of outcrops, and with a greater resolution than the commonly obtained in unlithified successions.



## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO DE FIGURAS.....</b>	<b>2</b>
<b>SUMÁRIO DE TABELAS.....</b>	<b>6</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
<b>3. GEOLOGIA DA ÁREA .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá .....</b>	<b>10</b>
3.1.1 Bacia do Tucano.....	11
3.1.1.1 Formação São Sebastião.....	15
3.1.1.2 Formação Marizal .....	16
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 Radar de penetração no solo .....</b>	<b>19</b>
4.1.1 Fundamentos Teóricos .....	20
4.1.2 Princípios do método.....	24
4.1.3 Relação entre resolução, frequência e profundidade.....	25
4.1.4 GPR em rochas sedimentares e sedimentos .....	28
4.1.5 Aquisição de dados e processamento .....	30
4.1.6 Trabalhos anteriores sobre GPR em ambientes fluviais .....	32
<b>4.2 Resistividade elétrica .....</b>	<b>36</b>
4.2.1 Fundamentos Teóricos .....	36
4.2.2 Princípios da técnica de investigação.....	38
4.2.3 Propriedades elétricas em rochas e minerais .....	39
4.2.4 Aquisição e processamento de dados .....	40
4.2.5 Trabalhos anteriores com o uso de ER com GPR .....	41
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>44</b>
<b>5.1 Levantamento de radar de penetração de solo.....</b>	<b>45</b>
5.1.1 Comparação das seções GPR com afloramentos .....	58
<b>5.2 Levantamentos de resistividade elétrica.....</b>	<b>67</b>
5.2.1 Comparação com fácies sedimentares e geometrias em escala de afloramento .....	70
<b>6. DISCUSSÃO .....</b>	<b>74</b>
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>80</b>

## SUMÁRIO DE FIGURAS

Figura 1 – A) Localização geográfica das bacias R-T-J. B) Esboço geológico das bacias Recôncavo, Tucano (Norte, Central e Sul) e Jatobá (Magnavita et al., 2003).....	10
Figura 2 - Limites e arcabouço estrutural da Bacia do Tucano (Magnavita et al., 2003). .....	12
Figura 3 - Mapa regional de anomalia Bouger mostrando o rift R-T-J, com destaque no Baixo de Cícero Dantas (Santos et al., 2010). ....	13
Figura 4 - Carta estratigráfica e aspectos tectono-deposicionais da Bacia do Tucano (Santos et al., 2010).....	14
Figura 5- Coluna estratigráfica da Fm. São Sebastião (Santos et al., 2010).....	16
Figura 6 - Coluna estratigráfica da Fm. Marizal (Santos et al., 2010).....	17
Figura 7- A) aquisição dos dados em um ponto do levantamento e B) resultado do perfil da reflexão do radar (Neal, 2004). ....	25
Figura 8- Dois métodos de aquisição mais comuns utilizados em levantamentos GPR: A) Common offset e B) Common Mid Point (Neal, 2004). ....	25
Figura 9 - A) Ondas eletromagnéticas propagando-se em uma superfície em forma de cone, ilustrando a zona de máxima resolução vertical. B) Ondas mais próximas ao centro da zona de Fresnel contribuem para uma maior amplitude. C) A largura da zona de Fresnel está em função da profundidade do refletor e da frequência (Neal, 2004). ....	27
Figura 10 - Terminologia para definir e descrever radarfácies (Neal, 2004). A) Geometria da reflexão, B) Forma 3-D externa dos pacotes de radar e C) Fácies detectadas pelo radar. ....	30
Figura 11 - Levantamento GPR com antena de 100 MHz. ....	31
Figura 12- Esquema do arranjo dipolo-dipolo para vários níveis de investigação.....	39
Figura 13- Configuração do levantamento ER.....	41
Figura 14- A) Mapa geológico Bacia do Tucano adaptado de Freitas (2014) com os pontos de onde foram feitos os levantamentos. B) Mapa das principais cidades e estradas da área de estudo (Freitas, 2014).....	44
Figura 15- Levantamento GPR no Ponto 1 do mapa da Figura 14, a seção mostra em alguns trechos refletores levemente ondulados contínuos, interpretados como cruzados de baixo ângulo e limites de série sub-horizontais. ....	50
Figura 16- Seção de GPR no Ponto 2, notam-se os refletores em forma côncava para cima e dentro deles refletores plano-paralelos com terminação em onlap. Foram interpretados como estruturas de corte e preenchimento com forma canalizada e o preenchimento interno de arenitos ou pelitos plano-paralelo ou com séries de cruzadas menores que a resolução do método. ....	50
Figura 17- No Ponto 3 (Figura 14) a seção A mostra no início da seção refletores inclinados com alta amplitude e dentro de cada um deles refletores de menor amplitude de forma côncava para cima e refletores também de menor amplitude cruzados tabulares. Interpretados como limites de séries cruzados de dunas cavalgantes e	

estratos internos cruzados acanalados ou estratos internos cruzados tabulares representando as frentes de cada duna preservada. Mais adiante se observa um refletor com uma forte amplitude e inclinado, interpretado como mudança de granulação e no final da seção também ocorre a mesma outra mudança na granulação dos sedimentos.

..... 51

Figura 18- Na seção B do Ponto 3 (Figura 14) nota-se no meio da seção a presença de refletores inclinados com alta angulosidade representando os estratos frontais e as laterais da seção observa-se refletores subparalelos contínuos e dentro deles refletores inclinados de menor amplitude, interpretados com limites de série subparalelos de dunas cavalgantes em corte ortogonal à direção de migração com estratos internos cruzados tabulares que são as frentes de dunas preservadas..... 52

Figura 19- A última seção (C) do Ponto 3 a maior parte da seção é representada por refletores contínuos levemente ondulados e em alguns locais dentro desses refletores consegue-se notar alguns refletores de menor amplitude em forma côncava para cima. Interpretados como limites de séries de estratos cruzados acanalados formados por dunas cavalgantes com crista sinuosa em corte ortogonal à direção de migração com estratos internos cruzados acanalados que são as frentes de dunas preservadas. .... 52

Figura 20- A seção de GPR do Ponto 6 (Figura 14) apresenta refletores com alta amplitude, levemente ondulados e contínuos, dentro deles em alguns locais observa-se a existência de refletores de baixa amplitude em forma côncava para cima. Essa seção foi interpretada como limites de séries de dunas cavalgantes com crista sinuosa em corte ortogonal à direção de migração com estratos internos cruzados acanalados que são as frentes de dunas preservadas. .... 53

Figura 21- Ponto 5 a seção GPR foi feita em ambiente eólico, nota-se uma penetração um pouco maior que nas seções anteriores. Em quase toda seção apresentam-se refletores de alta amplitude e inclinados em direção sudoeste representando estratos cruzados de grande porte formados por dunas eólicas e os refletores que truncam os estratos cruzados sugerem superfícies inferiores erosivas para sucessões de interdunas. .... 53

Figura 22- Seção GPR do Ponto 1 com uma foto do afloramento mostrando cruzadas de baixo ângulo que aparecem como refletores ondulados com truncamentos de baixo ângulo na seção de GPR. Feições menores, como marcas onduladas e laminações cruzadas, estão abaixo da resolução do levantamento. .... 61

Figura 23- A) Seção GPR do Ponto 2 com a ampliação de dois canais principais e a foto de cada um desses canais ao lado, mostrando o truncamentos entre refletores e terminações em onlap contra refletores côncavos para o topo com comprimento métrico, foram interpretados como preenchimento de feições canalizadas, compatíveis com o observado no afloramento, que apresenta canais preenchidos por arenitos finos laminados e arenitos finos com estratificação cruzada acanalada em séries decimétricas. B) Parte do afloramento descrito por Figueiredo (2013) mostrando a localização de ambos os canais no afloramento. .... 62

Figura 24- O levantamento GPR no Ponto 4 na seção A. Foram encontradas basicamente quatro mudanças nos padrões dos refletores e as fotos de partes do aforamento ilustram essas mudanças nas estruturas sedimentares. Quadro azul- arenitos médios

com raros grânulos esparsos, organizados em séries de cruzadas acanaladas com limites de séries inclinados em direção ao levantamento da seção GPR. Quadro laranja- arenitos grossos a médios, com grânulos pequenos, seixos esparsos e forte segregação granulométrica, com níveis grossos maciços em meio aos arenitos médios. Os limites de séries tem pelo menos 2 m de espessura com cruzada tabular marcada por forte segregação granulométrica, mais ortogonal ao levantamento. Quadro verde- mesmas séries são de grande porte, tabulares com segregação de arenito muito grosso rico em pequenos seixos nos estratos cruzados. Quadro amarelo - arenitos muito grossos com segregação e espessura de série de mais de 1,5m. .... 63

Figura 25- Levantamento da seção GPR no ponto 4 seção B. Foram encontrados refletores plano-paralelos e dentro deles refletores de menor amplitude inclinados, interpretados com limites de séries plano-paralelo preenchidos por estratos cruzados tabulares, esse tipo de estrutura não aflorou. Mais a diante refletores inclinados em alto ângulo com espaçamento decimétrico foram interpretados como séries de grande porte, tabulares com segregação de arenito muito grosso rico em pequenos seixos nos estratos cruzados..... 64

Figura 26- Na seção de GPR, a estratificação cruzada de grande porte com superfícies internas de reativação é claramente visível. A maior penetração do sinal obtida nesta seção permitiu o reconhecimento de estratos cruzados de até 5 m de espessura. Refletores sub-horizontais associam-se aos arenitos com laminação plano-paralela, e suas terminações em onlap sobre refletores que truncam os estratos cruzados sugerem superfícies inferiores erosivas para as sucessões de interdunas. .... 65

Figura 27- A seção GPR foi passada exatamente na superfície sobre a qual encontram-se as pessoas na Figura da direita. O afloramento logo abaixo do levantamento revela arenitos médios a grossos com séries de estratificação cruzada tabular separadas por limites inclinados. Uma superfície lateralmente contínua, posicionada menos de 1 m abaixo do topo da seção, separa um conjunto de séries inclinadas a ângulos mais altos de outro com limites de série de baixo ângulo. Na seção de GPR essa superfície é claramente representada por um refletor contínuo suavemente côncavo para o topo, sobre o qual os refletores superiores terminam em onlap. A maior parte dos refletores representa limites de séries e alguns refletores de menor amplitude associados a estratos cruzados internos podem ser reconhecidos. .... 66

Figura 28- Seção modelada do Ponto 2. Parte mais rasa da seção é mais resistiva sugerindo presença de arenitos, em maior profundidade a condutividade aumenta interpretado como uma espessa camada pelítica e mais abaixo uma camada mais resistiva indicando novamente uma mudança litológica. .... 69

Figura 29- Seção modelada do Ponto 3. Nota-se que no início há presença de uma camada pelítica. No meio da seção há uma grande anomalia resistiva, indicando a presença de arenitos limpos mais ao topo da seção. No final da seção mais superficialmente a condutividade aumenta sugerindo um material mais pelítico. E abaixo há duas anomalias mais resistivas que significa a presença de arenitos arcóseanos..... 69

Figura 30- Seção do levantamento ER no Ponto 2 com fotos de cada tipo de rocha sedimentar apenas da parte mais resistiva do topo (arenitos finos micáceos e siltosos com laminação cruzada cavalgante, por vezes preservando marcas onduladas (foto

central), arenitos finos com laminação plano-paralela (foto à direita), arenitos finos a médios com estratificação cruzada acanalada (foto à esquerda). Em maior profundidade há exemplos de estruturas sedimentares não aflorantes..... 72

Figura 31- A) Parte da foto do afloramento do Ponto 3 adaptado de Figueiredo et al.,2013. B) Seção modelada do levantamento ER. O padrão de variação de camadas mais e menos resistivas no levantamento ER coincide em alguns locais com a intercalação métrica entre sucessões de arenitos conglomeráticos e arenitos finos siltsos com níveis pelíticos descritas por Figueiredo (2013). ..... 73

## SUMÁRIO DE TABELAS

Tabela 1- Definições e unidades utilizadas no método GPR.....	20
Tabela 2 - Relação entre a frequência da antena e profundidade de penetração (Porsani, 2011). .....	26
Tabela 3 - Valores de resolução teórica GPR em ambientes sedimentares típicos para diferentes frequências de antenas (Jol & Bristow, 2003). .....	26
Tabela 4 - Valores das frequências das antenas e a resolução vertical para cada uma delas (Porsani, 2011). .....	26
Tabela 5 - Exemplos de alguns materiais geológicos e suas propriedades elétricas (Neal,2004). .....	29
Tabela 6 - Definições e unidades utilizadas no método ER.....	36
Tabela 7 - Valores de resistividade adaptado de Gallas (2000). .....	40
Tabela 8 - Radar fácies encontradas nas seções acima com descrição e interpretação para cada uma delas. Imagem de radar sempre no topo e interpretação geológica sempre abaixo.....	54

## 1. INTRODUÇÃO

A interpretação de radar fácies a partir de dados de Radar de Penetração no Solo (GPR) é frequentemente aplicada na interpretação de estruturas sedimentares em rios ativos, sendo responsável por grandes avanços na caracterização da estrutura interna de depósitos fluviais (e.g. Gawthorpe *et al.*, 1993, Best *et al.*, 2003 e Smith *et al.*, 2009). A importância dessa técnica de investigação contrasta com sua rara utilização em depósitos fluviais antigos (e.g. Corbeanu *et al.*, 2001) e com a crescente aplicação de estudos arquiteturais de afloramentos como análogos de reservatórios de hidrocarbonetos.

De acordo com Tatum & Francke (2012), o método de interpretação de radar fácies a partir de dados de GPR é uma ótima ferramenta capaz auxiliar no melhor conhecimento de reservatórios. Por isso, a importância de estudar radar fácies em afloramento. Uma limitação decorrente da pobre documentação de casos de utilização de GPR para o estudo da arquitetura deposicional de sucessões antigas é a falta de comprovação da aplicabilidade das classificações elaboradas para depósitos inconsolidados.

Desta forma, a presente dissertação visa a contribuição para o avanço do método de estudo arquitetural de análogos de reservatórios de hidrocarbonetos com auxílio do GPR através da documentação de radar fácies em rochas sedimentares e sua interpretação baseada na comparação com afloramentos.

A área selecionada inclui exposições das Formações São Sebastião (Eocretáceo) e Marizal (Aptiano) na Bacia do Tucano (Nordeste do Brasil), em alvos anteriormente estudados do ponto de vista da arquitetura deposicional de afloramentos (Carrera, 2012; Figueiredo, 2013 e Freitas, 2014).

O objetivo do presente trabalho é aprimorar as ferramentas de interpretação de radar fácies pela comparação de dados de GPR com estruturas sedimentares e elementos arquiteturais observados em afloramentos, considerando sua resolução e suas limitações.

Duas limitações do método GPR já conhecidas na literatura são excesso de umidade e argilosidade (Daniels, 2004 e Neal, 2004). Por isso, outro método geofísico

denominado eletrorresistividade (ER) foi utilizado para complementar o estudo (Baines *et al.*, 2002; Pellicer & Gibson 2011 e Rey *et al.*, 2013), auxiliar nas investigações litológicas da área e explicar as limitações da penetração de sinal no método GPR.



## **2. OBJETIVOS**

Os afloramentos da Bacia do Tucano foram estudados anteriormente em detalhe com relação à sedimentologia, em estudos de análise de fácies e arquitetura deposicional (Carrera, 2012; Figueiredo, 2013 e Freitas, 2014). A qualidade das exposições e a existência de trabalhos prévios que revelam interessantes padrões de arquitetura deposicional fluvial tornam a área um alvo potencial para estudos sobre a aplicabilidade de métodos geofísicos com investigação na arquitetura deposicional fluvial em rochas sedimentares. Porém, o estudo arquitetural com métodos geofísicos ainda não havia sido executado nessa área.

Por isso, o objetivo principal do presente trabalho é aplicar dois métodos geofísicos em escala de afloramentos, bem expostos, previamente estudados em aspectos de análise direta de afloramentos e comparar os resultados. Assim, seria possível avaliar se é viável o uso desses métodos para posteriormente serem aplicados em locais que não há exposição dos afloramentos.

Os métodos geofísicos utilizados foram o GPR e o ER e cada tem um propósito distinto. O principal método do estudo foi o GPR, pois possui imagem em alta resolução. O objetivo desse método é determinar as estruturas sedimentares por meio dos padrões e das terminações de refletores, determinando a forma e angulosidade. Sua interpretação é muito semelhante e facilmente comparável aos resultados de estudos de afloramentos.

A aplicação do método ER teve como objetivo principal suprir as limitações do GPR em relação à argilosidade e umidade. Esse método consegue descrever a litologia da área investigada, podendo definir bem os locais argilosos que possuem pouca penetração de sinal no método GPR, conseguindo assim suprir sua limitação. Porém, sua resolução é diferente do GPR, pois ele não identifica algumas estruturas sedimentares que o GPR consegue definir, principalmente em sedimentos secos arenosos. Desta forma, é interessante utilizar os dois métodos concomitantemente, pois uma investigação consegue complementar a outra.

### 3. GEOLOGIA DA ÁREA

Nesse capítulo será apresentado uma breve descrição da geologia regional da área estudo, mostrando em escala das Bacia Recôncavo- Tucano –Jatobá até a escala de afloramentos das Formações São Sebastião e Marizal.

#### 3.1 Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá

Nesta seção, descreve-se a geologia e a geografia das Bacias Recôncavo-Tucano-Jatobá.

A Bacia do Tucano (BA) faz parte de um sistema de *rifts* que cobre uma área cerca de 45.000 km<sup>2</sup>, denominado Recôncavo-Tucano-Jatobá (R-T-J), situada na região Nordeste do Brasil, nos estados da Bahia, Sergipe e Pernambuco (Figura 1). O sistema de *rifts* intercontinentais R–T–J está associado à tectônica extensional da abertura do Atlântico Sul (Magnavita *et al.*, 2003) e é formado por um sistema de direção N-S (Recôncavo e Tucano) que muda abruptamente para ENE-WSW (Jatobá). As três bacias são separadas por altos/arcs do embasamento: a Bacia do Recôncavo é limitada a norte pelo Alto de Aporá e seguida pela de Tucano, que é separada de Jatobá pelo Alto do São Francisco (Silva *et al.*, 2003).

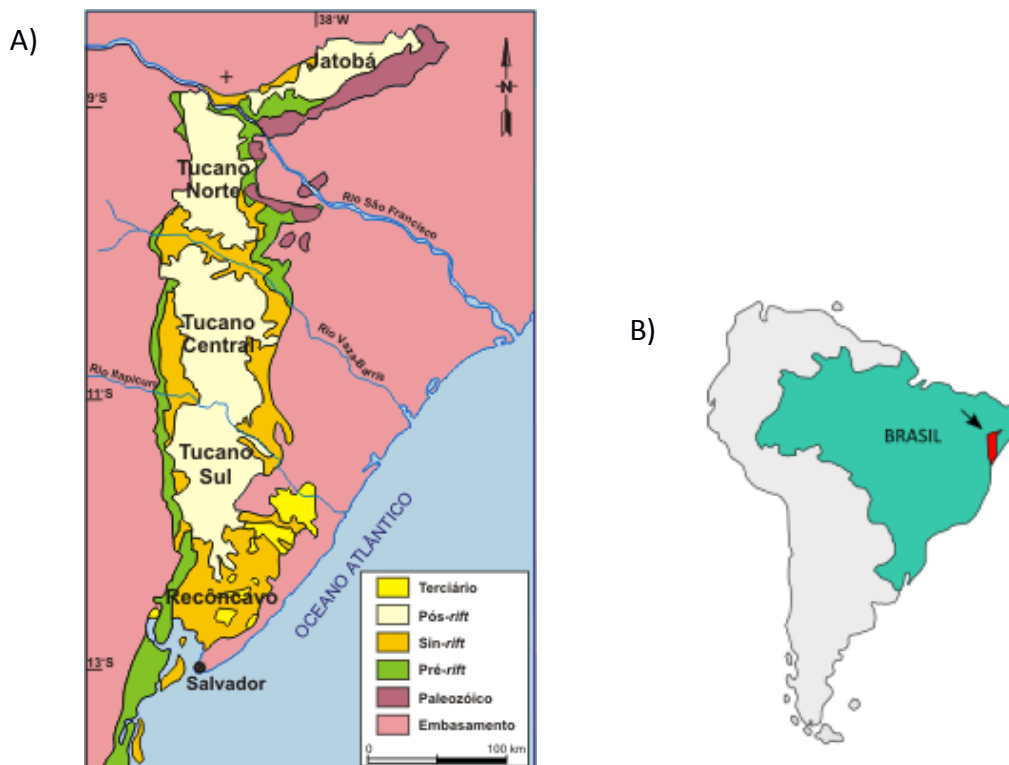


Figura 1 – A) Localização geográfica das bacias R-T-J. B) Esboço geológico das bacias Recôncavo, Tucano (Norte, Central e Sul) e Jatobá (Magnavita *et al.*, 2003).

## **Embasamento**

De acordo com Santos *et al.* (2010), o embasamento dessas bacias é formado por rochas pré-cambrianas com características de distintos ambientes tectônicos: terrenos granito-greenstone, cinturões móveis, faixas de dobramento e cavalgamento. As unidades geológicas do embasamento são constituídas por rochas de idade arqueana a Paleoproterozoica (Bloco de Serrinha), rochas do Neoproterozoico (Faixa Sergipana e do Grupo Estância) e por representantes de idade paleozoica (Formação Palmares). Segundo Magnavita (1996), há um forte paralelismo entre os traços estruturais do embasamento e as falhas que delimitam as principais unidades do *rift* R-T-J.

### **3.1.1 Bacia do Tucano**

Nesta subseção será descrito características da Bacia do Tucano e suas subdivisões assim como a parte estrutural e sucessões sedimentares.

A Bacia do Tucano possui uma área de aproximadamente 30.500 km<sup>2</sup>, e encontra-se dividida em três sub-bacias: Tucano Norte, Central e Sul; separadas pelos cursos dos rios Vaza-Barris e Itapicuru, respectivamente (Figura 2). O arcabouço estrutural constitui-se de semi-grabéns que se orientam para NE-SW e N-S. As sub-bacias são separadas por feições transversais orientadas NW-SE, que constituem zonas de acomodação ou de transferência. A Bacia do Tucano contém sedimentos depositados do Paleozoico ao Cenozoico, com interrupções erosivas importantes entre os estratos preservados. O desenvolvimento completo do *rift* (pré, sin e pós-*rift*) estendeu-se pelo menos, do Tithoniano ao Albiano. Uma característica distintiva da estratigrafia da bacia é a ausência de rochas ígneas (Magnavita *et al.*, 2003).

Segundo Magnavita *et al.* (2003), a sub-bacia de Tucano Central possui cerca de 14.700 km<sup>2</sup> em área, representando a 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. Sua borda falhada é determinada pela falha de Adustina, havendo ainda duas áreas plataformais: a plataforma de Umburana, a oeste, e a plataforma de Quilombo, a leste.

## Estrutura

A arquitetura estrutural é caracterizada por falhas de direção geral N-S, mergulhando para oeste, resultando em um estilo “dominó”. Uma grande falha antitética, mergulhando para leste de encontro à falha de Adustina, define o baixo de Cícero Dantas, onde o preenchimento sedimentar na Bacia do Tucano Central atinge 12.000 m de espessura, que é a região mais subsidente das bacias R-T-J (Figura 3) (Santos *et al.*, 2010).

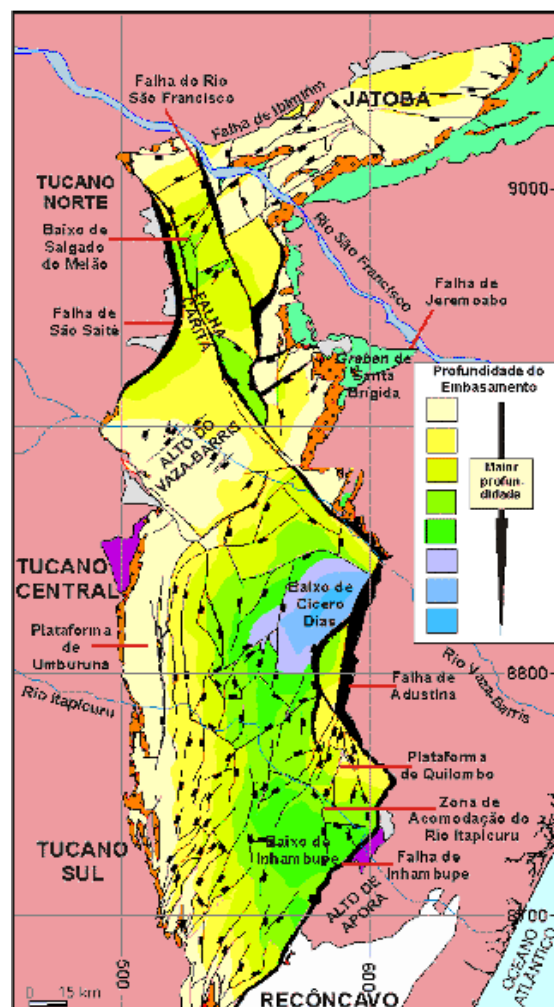


Figura 2 - Limites e arcabouço estrutural da Bacia do Tucano (Magnavita *et al.*, 2003).

## Sucessões Sedimentares

Segundo Costa *et al.* (2007), em função da similaridade do arcabouço estrutural e registro sedimentar as sub-bacias do Tucano Sul e Central podem ser representadas apenas por uma carta estratigráfica. Quatro seqüências deposicionais compõem o

registro estratigráfico, representadas por rochas sedimentares do Jurássico Superior e Cretáceo Inferior (Costa *et al.*, 2007).

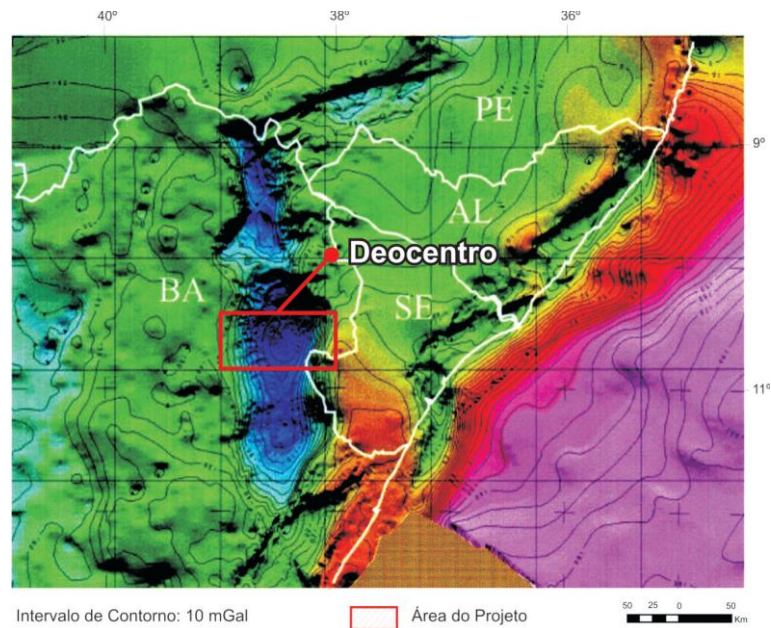


Figura 3 - Mapa regional de anomalia Bouger mostrando o rift R-T-J, com destaque no Baixo de Cícero Dantas (Santos *et al.*, 2010).

De acordo com Santos *et al.* (2010), a sequência estratigráfica da sub-bacia Central é representada por três fases evolutivas:

- pré-rift: depósitos aluviais do Grupo Brotas, arenitos fluviais e eólicos, do Membro Boipeba (Formação Aliança) e argilas lacustres do Membro Capianga (Formação Aliança) e posteriormente arenitos fluviais e eólicos da Formação Sergi (Magnavita *et al.*, 2003).
- sin-rift: teve duração próxima de 22 milhões de anos. Da base para o topo, os sedimentos são representados por folhelhos lacustres do Grupo Santo Amaro e por arenitos e argilitos de ambiente deltaico do Grupo Ilhas. Estas unidades são sobrepostas por uma espessa camada de arenitos fluviais e eólicos da Formação de São Sebastião (Magnavita *et al.*, 2003). Os conglomerados do leque aluvial da Formação de Salvador interdigitam-se lateralmente com quase toda fase sin-rift da bacia.



### 3.1.1.1 Formação São Sebastião

A Fm. São Sebastião cobre aproximadamente dois terços da bacia do Recôncavo e na bacia do Tucano tem ocorrência restrita a localidades na borda da bacia e no vale do Rio Vaza-Barris. Essa Formação engloba uma sequência arenosa, com intercalações de argilas sílticas, folhelhos e raros calcários.

A litologia, de modo geral, é composta de arenitos grossos a finos, amarelo-avermelhados, friáveis, feldspáticos intercalados com argilas sílticas, depositados em sistemas fluviais atuantes do Berriasiano ao Eoaptiano (Viana *et al.*,1971). A Figura 5 mostra uma coluna estratigráfica elaborada por Santos *et al.* (2010) que interpreta a Fm. São Sebastião sendo muito semelhante ao Grupo Ilhas.

Segundo Viana *et al.* (1971), na base, ocorre o Arenito Bebedouro, na porção intermediária aumentam as intercalações arenosas em forma de espessos bancos e no topo, com predominância de depósitos mais grossos, às vezes conglomeráticos.

O contato inferior da Formação São Sebastião com a Fm. Pojuca (Grupo Ilhas) é transicional, os sedimentos têm características de ambas às formações. Porém, o contato é facilmente estabelecido com base do último corpo espesso de arenito com características exclusivas da Fm. São Sebastião. Já o contato superior, de acordo com a carta estratigráfica de Santos *et al.* (2010), é discordante com a Fm. Marizal. Além disso, a Fm. São Sebastião lateralmente interdigita-se com a Fm. Salvador (Viana *et al.*,1971).

Os ostracodes são os fósseis mais importantes da formação e indicam uma idade cretácea inferior e correlaciona-se com parte da Fm. Penedo de Sergipe/Alagoas (Viana *et al.*, 1971).



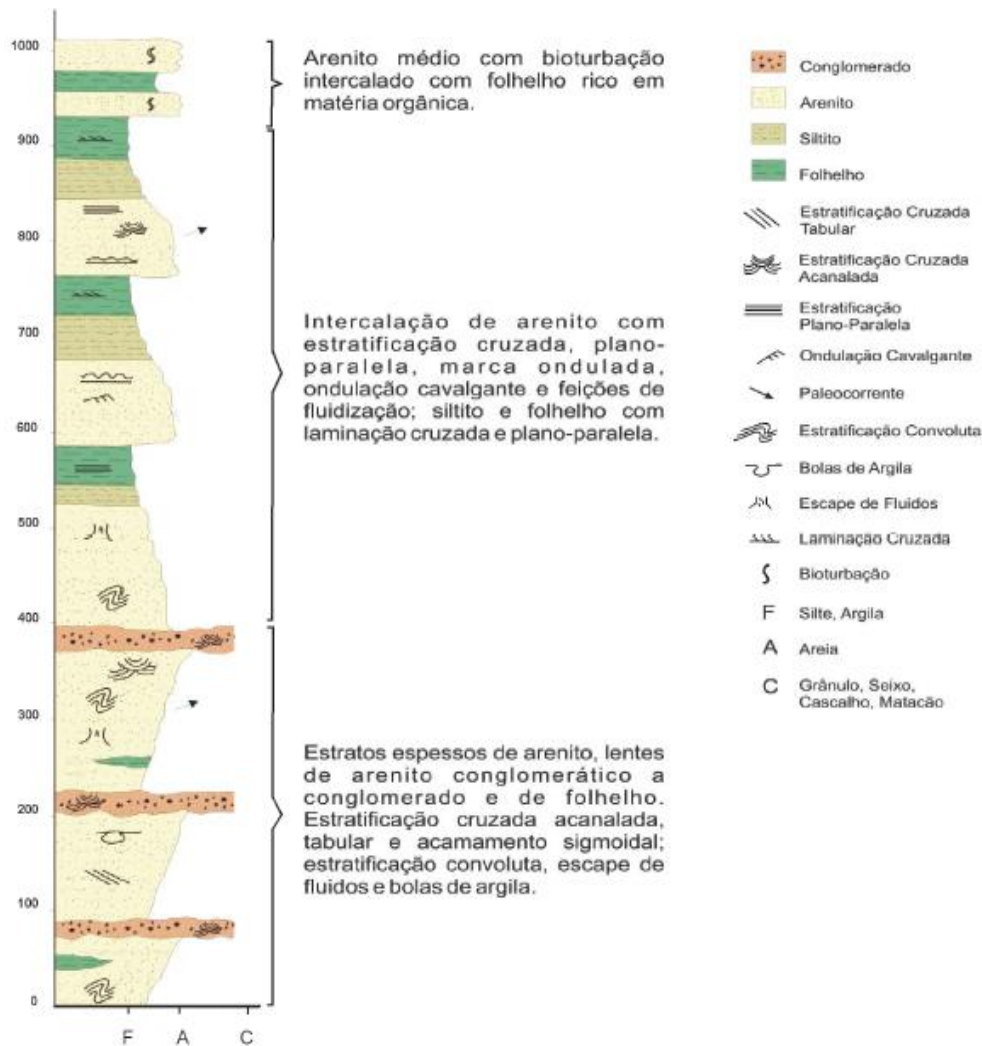


Figura 5- Coluna estratigráfica da Fm. São Sebastião (Santos et al., 2010).

### 3.1.1.2 Formação Marizal

Brazil (1947) foi o primeiro a mapear a área que foi nomeada como Fm. Marizal e foi interpretada como sedimentos sub-horizontais constituídos de arenitos grossos e conglomerados. Segundo Gava *et al.* (1983) e Viana *et al.* (1971) a Fm. Marizal ocupa dois terços da área da Bacia do Tucano e sua espessura média é em torno de 150 metros. Santos *et al.* (2010) descreve uma coluna estratigráfica da Fm. Marizal no Tucano Central (Figura 6).

Segundo Viana *et al.* (1971), a litologia é composta de arenitos e conglomerados, com menor ocorrência de siltitos, folhelhos e calcários. Os arenitos possuem cores variadas de cinza-esbranquiçado a amarelo-avermelhado. A granulação também varia de arenitos finos a grossos, mal selecionados e sub angulosos. Além disso, os arenitos são quartzozos, caulíníticos e argilosos. Os conglomerados são policompostos, com



cores de cinza-esbranquiçado à amarelo, constituídos de matações e seixos de arenitos vermelhos. A idade dessa Formação também é Cretácea Inferior, estabelecida através de palinomorfos e correlaciona-se com a Fm. Muribeca de Sergipe/Alagoas.

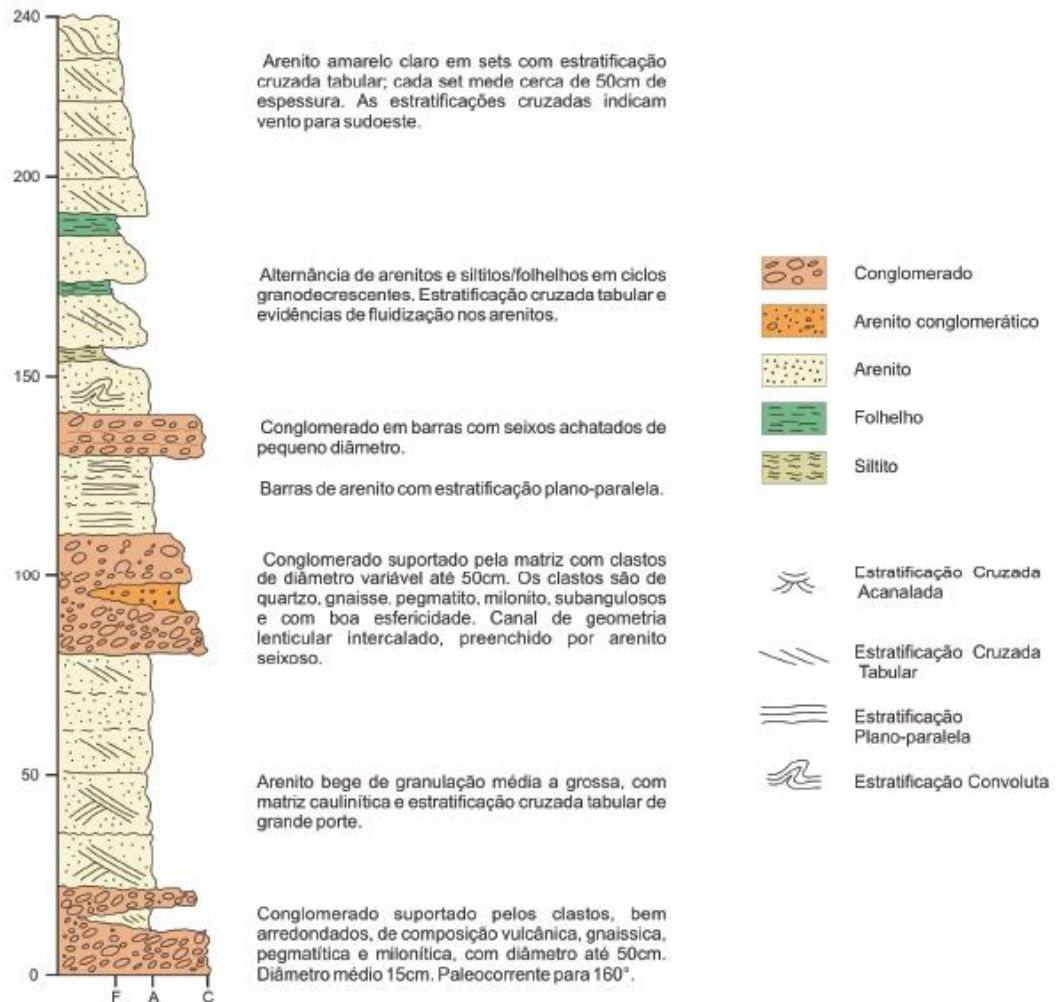


Figura 6 - Coluna estratigráfica da Fm. Marizal (Santos et al., 2010).

As bacias Recôncavo-Tucano-Jatobá do tipo *rift* possuem alta complexidade em suas estruturas e potencial petrolífero, por isso são alvos de muitos estudos. Além disso, algumas unidades aflorantes também apresentam interesse sedimentológico, como é o caso da Fm. São Sebastião e Marizal.

As Fm. São Sebastião e Marizal são bem expostas, com sucessões de paleorios e leques aluviais. Sabe-se que as análises e as interpretações desses ambientes são complexas e muito debatidas, pois seu comportamento deposicional não possui um padrão bem definido, sendo dependente de parâmetros como tamanho do rio,

inclinação, vazão etc. Logo, os estudos dessas formações são de grande valia para ampliar o conhecimento do comportamento de rios entrelaçados.

## **4. METODOLOGIA**

Neste capítulo serão descritos as metodologias utilizadas neste trabalho. Foram utilizados dois métodos geofísicos no estudo: GPR (Radar de penetração no solo) e o ER (resistividade elétrica), explicado com mais detalhes a seguir.

### **4.1 Radar de penetração no solo**

Nesta seção, mostrará uma breve introdução do que é método, sua utilização em sedimentos e o objetivo do uso dele no presente trabalho.

O Ground Penetrating Radar (em português Radar de penetração no solo ou georadar com sigla GPR) é um método geofísico não destrutivo que se utiliza de ondas eletromagnéticas em altas frequências, como as ondas de rádio na faixa de 10MHz à 2,5 GHz. As ondas eletromagnéticas (EM) são geradas por uma antena transmissora colocada na superfície da Terra. Elas são recebidas por outra antena denominada receptora também em superfície. Isso permite que o método GPR tenha uma imagem em alta resolução da subsuperfície rasa. Os dados são simultaneamente gerados em uma tela de “notebook” e armazenados no disco rígido (Porsani, 2011).

Na geologia sedimentar, o GPR teve início devido à sua rápida aquisição de dados e habilidade de coletar informações da subsuperfície sem o uso de poços ou afloramentos, além da similaridade das imagens com a sísmica já antes conhecidas (Neal, 2004). O GPR primeiramente foi utilizado para estudos estratigráficos: arquitetura estratigráfica, geometria de corpos arenosos, correlação e quantificação de estruturas sedimentares. Atualmente, o GPR possui ferramentas em que é possível uma modelagem de imagens em alta resolução em 3-D, mostrando uma visualização muito melhor da geometria de uma estrutura sedimentar ou a sua arquitetura. Mesmo o GPR sendo um método muito eficaz, é sempre necessário corroborar com outros métodos de investigações litológicas. Além disso, locais com grãos muito finos (argila) e áreas com águas muito salinas causam uma rápida atenuação do sinal GPR, causando muito pouca penetração do sinal no solo (Jol & Bristow, 2003).

O método GPR em ambientes fluviais tem sido muito utilizado, pois segundo Jol & Bristow (2003) há uma facilidade de acesso aos depósitos e uma grande procura em

investigação de aquíferos rasos. A grande complexidade dos depósitos de sistemas fluviais e suas grandes escalas de formas deposicionais fazem com que mais estudos sejam feitos nesses tipos de ambientes.

O objetivo do levantamento de GPR no presente trabalho foi determinar sua eficácia em afloramentos em sua maioria fluviais da Bacia do Tucano nas Formações Marizal e São Sebastião. Comparando os resultados com a arquitetura interpretada de afloramentos e com resultados de estudos semelhantes desenvolvidos em sistemas de rios ativos. Por fim, foi feita uma breve discussão sobre os conceitos de radar fácies relacionado ao presente trabalho.

#### 4.1.1 Fundamentos Teóricos

Nesta subseção, será descrito o fundamento do GPR. No caso como o sinal são ondas eletromagnéticas, ele pode ser descrito pelas equações de Maxwell's (descrevem matematicamente a física do eletromagnetismo) quanto as relações constitutivas (determinam as propriedades dos materiais), pois são princípios fundamentais que descrevem quantitativamente o sinal do método GPR (Annan, 2001).

A Tabela 1 detalha as definições e unidades utilizadas no método GPR, cujas notações serão utilizadas ao longo desta subseção.

Tabela 1- Definições e unidades utilizadas no método GPR.

Símbolo	Significado	Unidade em SI
$\vec{E}$	Vetor de força de campo elétrico (Annan, 2001).	Volt por metro (V/m).
$\vec{B}$	Vetor densidade do fluxo magnético (Annan, 2001).	Tesla (T).
$\vec{H}$	Intensidade do campo magnético (Annan, 2001).	Ampère por metro (A/m).
$\vec{J}$	Vetor densidade de corrente elétrica (Annan, 2001).	Ampère por metro quadrado (A/m <sup>2</sup> ).
$\vec{D}$	Vetor descolamento elétrico (Annan, 2001).	Coulomb por metro quadrado (C/m <sup>2</sup> ).
$\nabla$	Operador diferencial de primeira ordem (Nussenzveig, 1997).	
$\nabla^2$	Operador diferencial de segunda ordem (Nussenzveig, 1997).	
$\nabla \times$	Operador rotacional (Nussenzveig, 1997).	Por metro (/m).

$\nabla \cdot$	Operador divergência (Nussenzweig, 1997).	Por metro (/m).
$\frac{\partial}{\partial t}$	Derivada parcial no tempo (Nussenzweig, 1997).	Por segundo (/s).
$\sigma$	Habilidade do material de passar cargas elétricas livres sob a influência de um campo aplicado (Cassidy,2010).	Siemens/metros (S/m).
$\epsilon$	Habilidade de um material armazenar e liberar a energia EM na forma de cargas elétricas (Cassidy,2010).	Farads/metro (F/m).
$\epsilon_r$	Permissividade relativa(Cassidy,2010).	
$\epsilon_0$	Valor da permissividade dielétrica do vácuo (Cassidy,2010).	Farads/metro (F/m).
$\mu$	Mede a energia do campo magnético armazenado e perdido através da magnetização induzida (Cassidy,2010).	Henrys por metro (H/m).
$\mu_0$	Permeabilidade magnética no espaço livre (Cassidy,2010).	Henrys por metro (H/m).
$v$	Velocidade da onda (Annan, 2001).	Metros por segundo (m/s).
$\alpha$	Atenuação do sinal eletromagnético ao penetrar no solo (Annan, 2001)	Henrys Siemens por metro segundo (HS/ms)
$Z_{xy}$	Tensor de impedância correlaciona o vetor campo elétrico com o vetor de campo magnético (Annan, 2001).	Volts por ampère (V/A).
$R$	Coeficiente de reflexão (Porsani, 2011).	

### Equações de Maxwell

i) Lei de Faraday - Quando um campo magnético ( $\vec{B}$ ) que varia no tempo (t) é aplicado perpendicularmente sobre um corpo condutor, gera a movimentação de cargas elétricas mediante a um campo elétrico ( $\vec{E}$ ) paralelo ao deslocamento dessas cargas e ortogonal ao mesmo campo magnético (Annan, 2001). É definido pela equação:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (i)$$

sendo  $\vec{E}$  é o vetor de força de campo elétrico (V/m) e  $\vec{B}$  é o vetor densidade do fluxo magnético (T).

ii) Lei de Amperè - quando um corpo condutor é submetido a uma corrente elétrica variável, o mesmo gera um campo magnético em torno de si (Annan, 2001).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (\text{ii})$$

sendo  $\vec{H}$  a intensidade do campo magnético (A/m),  $\vec{J}$  é o vetor densidade de corrente elétrica (A/m<sup>2</sup>) e  $\vec{D}$  é o vetor deslocamento elétrico (C/m<sup>2</sup>) (Annan, 2001).

iii) Lei de Gauss para campo elétrico - o fluxo de deslocamento elétrico fora de uma superfície fechada é proporcional a carga elétrica total da superfície do condutor, incluindo dentro desta superfície fechada.

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (\text{iii}),$$

onde q é densidade de carga elétrica.

iv) Lei de Gauss para campo magnético - como não existem cargas livres as linhas de fluxos magnéticos devem fechar em si mesmos (Annan, 2001).

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (\text{iv})$$

### Equações Constitutivas

As equações abaixo descrevem as propriedades físicas do meio: a condutividade elétrica ( $\sigma$ ), a permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) e permeabilidade magnética.

Condutividade elétrica ( $\sigma$ ), que é habilidade do material de passar cargas elétricas livres sob a influência de um campo aplicado (Cassidy,2010).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (\text{v})$$

Permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ), que é a habilidade de um material armazenar e liberar a energia EM na forma de cargas elétricas (polarização) (Cassidy,2010).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}. \quad (\text{vi})$$

No método GPR é muito utilizado a permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ), que é a habilidade de restringir o fluxo de cargas livres ou o grau de polarização apresentado pelo material sob influência de um campo aplicado, em que  $\epsilon_r$  é definido por:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad (\text{vii})$$

sendo  $\epsilon_0$  o valor da permissividade dielétrica do vácuo ( $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$  F/m) (Cassidy,2010).

Permeabilidade magnética ( $\mu$ ) mede a energia do campo magnético armazenado que é perdida por meio da magnetização induzida (Neal 2004). Porém, o efeito magnético dos materiais possui pouco efeito na propagação das ondas do sinal GPR, e a permeabilidade magnética frequentemente é simplificada para o valor do espaço livre, sendo  $\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6}$  H/m (Cassidy, 2010).

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{viii})$$

### **Campos elétricos de ondas naturais**

A magnitude relativa depende do tipo de perda para o meio, o campo pode ser difuso ou propagado em ondas. No caso das condições do método GPR as respostas são dadas em ondas.

Se supuser que para altas frequências a condutividade elétrica é muito baixa  $\sigma \equiv 0$ , chega-se a equação da onda (Annan, 2001):

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad (\text{xi})$$

em que a velocidade ( $v$ ) é dada por

$$v = \frac{1}{\mu \epsilon}.$$

Segundo Annan (2001) todos os materiais geralmente possuem perdas de energia relacionada com a condutividade elétrica. Mesmo assumindo que em condições de altas frequências o valor da condutividade elétrica é quase nulo, no caso do valor da atenuação das ondas de GPR para aplicações reais esse efeito é de grande importância. Por isso, o valor da atenuação ( $\alpha$ ) é dado por

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}. \quad (\text{xii})$$

Outro fator importante para o método GPR é o coeficiente de reflexão ( $R$ ). Essa grandeza irá medir o valor refletido entre duas camadas adjacentes. Ou seja, quando há variações nas propriedade elétricas do meio podem causar uma impedância elétrica entre as diferentes camadas. O tensor de impedância ( $Z_{xy}$ ) correlaciona o vetor campo elétrico com o vetor de campo magnético é definido por

$$Z_{xy} = \left| \frac{E_x(z, t)}{H_y(z, t)} \right|. \quad (\text{xiii})$$

No caso do método GPR, como as frequências são muito altas, só são levadas em consideração apenas as propriedades dielétricas do material (Porsani, 2011). Assim, o coeficiente de reflexão (R) é expresso como

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \text{ (xiv)}$$

#### 4.1.2 Princípios do método

Nesta subseção será apresentado o modo de funcionamento do equipamento e seus arranjos principais.

O equipamento do método GPR possui duas antenas (transmissora e receptora). A antena transmissora (T) emite um pulso em alta frequência gerando ondas EM, que são repetidamente irradiadas para subsuperfície terrestre. A energia refletida de volta para superfície mostra as diferentes propriedades dielétricas dos materiais no meio. Essas diferenças dependem dos diferentes tipos de sedimentos, tamanho do grão, porosidade, compactação e presença de fluidos e fraturas. O retorno da energia refletida é recebido pela antena receptora (R) também em superfície. A energia refletida é registrada em função do tempo e mostrada em tempo real com uma imagem em alta resolução por um notebook (Figura 7) que também armazena os dados para processamentos posteriores (Porsani, 2011 e Jol & Bristow, 2003).

O método de aquisição mais utilizado para o levantamento de seção GPR é o *Common offset*, ou seja, neste método as antenas transmissora e receptora são movidas em conjunto, assim a distância das antenas sempre permanece a mesma e observa-se a imagem da seção através do notebook em tempo real. Porém, o método de aquisição mais comum utilizado para determinar velocidade do meio é o *Common Mid Point* (CMP), baseado na aquisição de dados de um mesmo ponto em profundidade com espaçamentos de antenas diferentes (Figura 8) (Neal, 2004).



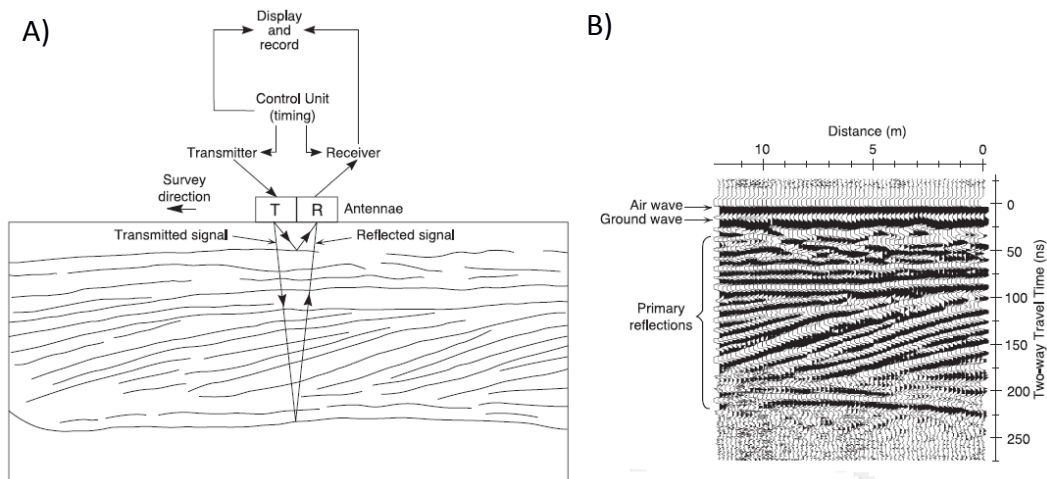


Figura 7- A) aquisição dos dados em um ponto do levantamento e B) resultado do perfil da reflexão do radar (Neal, 2004).

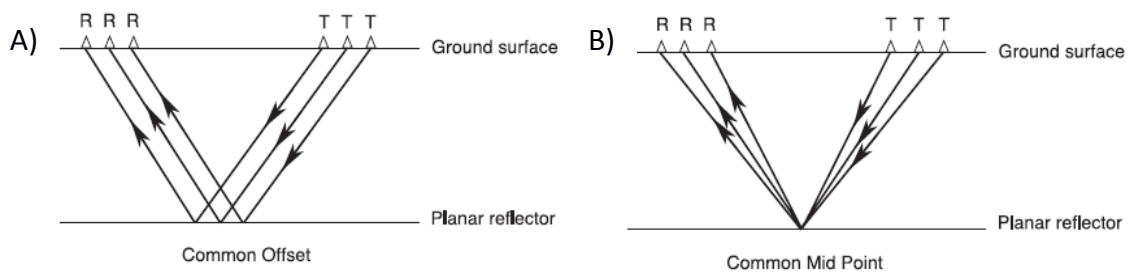


Figura 8- Dois métodos de aquisição mais comuns utilizados em levantamentos GPR: A) *Common offset* e B) *Common Mid Point* (Neal, 2004).

#### 4.1.3 Relação entre resolução, frequência e profundidade.

Nesta subseção será discutido qual a melhor frequência para cada tipo de alvo determinado e qual profundidade e resolução que cada frequência alcança.

Outro fator importante a ser explicado é a profundidade de penetração e frequência a ser utilizada para cada tipo de situação. A profundidade de penetração e a resolução da imagem do perfil são inversamente proporcionais e dependentes da frequência aplicada, ou seja, primeiro é necessário identificar o tamanho do alvo a ser investigado para determinar a frequência que melhor se ajusta ao estudo.

No caso de altas frequências (200,400 e 1000 MHz) a resolução é alta e com pouca penetração e para baixas frequências (25 e 50 MHz) o oposto (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2 - Relação entre a frequência da antena e profundidade de penetração (Porsani, 2011).

<b>Frequência da antena (MHz)</b>	<b>Profundidade máxima de penetração (m)</b>
1000	1
400	2
200	8
100	15
50	25
25	40
10	50

Tabela 3 - Valores de resolução teórica GPR em ambientes sedimentares típicos para diferentes frequências de antenas (Jol & Bristow, 2003).

<b>Frequência da antena</b>	<b>Litologias</b>		
	Areia saturada ( $v=0,06$ m/ns)	Areia úmida ( $v=0,1$ m/ns)	Areia seca ( $v=0,15$ m/ns)
<b>50 MHz</b>	0,3-0,6 m	0,5-1 m	0,75-1,5 m
<b>100 MHz</b>	0,15-0,3 m	0,25-0,5 m	0,375-0,75 m
<b>200 MHz</b>	0,075-0,15 m	0,125-0,25 m	0,1875-0,375 m

A resolução vertical é a medida capaz de distinguir dois sinais adjacentes no tempo, ela está relacionada diretamente com a frequência da antena (Reynold, 1997). A melhor resolução vertical teórica é dada como um quarto do comprimento de onda. Dentro dessa distância vertical algumas reflexões interferirão de maneira construtiva que resulta em uma única reflexão observada (tabela 4) (Neal, 2004).

Tabela 4 - Valores das frequências das antenas e a resolução vertical para cada uma delas (Porsani, 2011).

<b>Frequência da antena (MHz)</b>	<b>Resolução teórica vertical (m)</b>
200	0,125 - 0,25
100	0,25 - 0,5
50	0,5 - 1
25	1 - 2

A resolução vertical do perfil de reflexão de radar tem uma importante implicação para interpretação sedimentológica, pois a resolução vertical determina a escala de estruturas sedimentares que podem ser observadas. Dado que uma laminação individualmente possui espessura  $< 0,01$  m e um material que possui baixa perda sinal como areia com uma antena de alta frequência (maior resolução) possui resolução vertical máxima próxima de 0,02 m e 0,08 m respectivamente, só é possível identificar os limites ou o conjunto das laminações e não cada uma delas isoladamente (Neal, 2004).

Quando a estrutura sedimentar é menor que a resolução vertical, o que ocorre é que a velocidade da onda do material entre o intervalo de tempo da primeira para segunda reflexão é menor que o período da fonte do trem de ondas, assim o segundo refletor é mascarado pelo primeiro, não conseguindo identificar a estrutura sedimentar de fato (Reynold, 1997).

A largura da radiação das frentes de ondas esféricas da primeira zona de Fresnel é o que define a resolução horizontal. A largura da zona de Fresnel é em função do comprimento de onda e da profundidade do refletor. Uma consideração a ser levada em conta é o espaçamento entre os traços horizontais no perfil de radar. A escolha é feita em função da frequência da antena utilizada e natureza da estrutura sedimentar. Quanto maior a frequência da antena menor o tamanho máximo do passo, assim maior resolução da imagem e menor profundidade (Figura 9) (Neal, 2004).

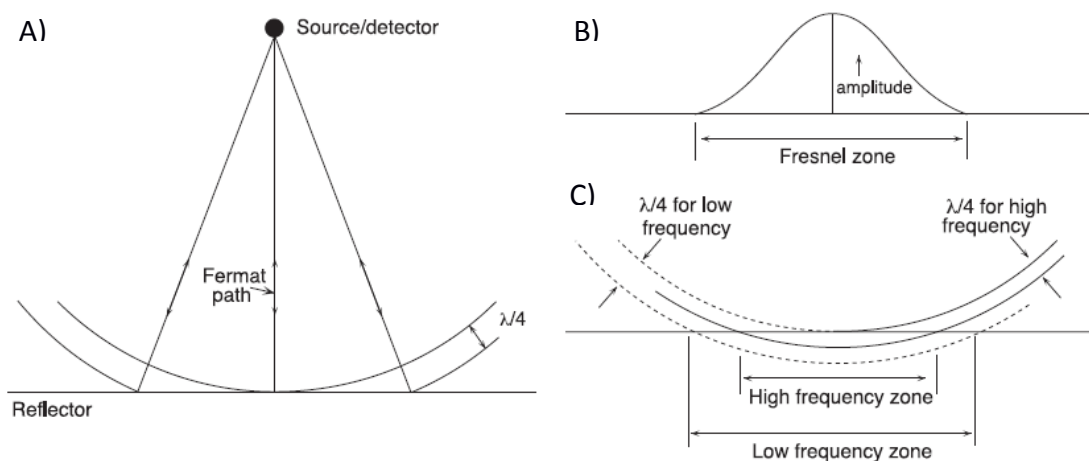


Figura 9 - A) Ondas eletromagnéticas propagando-se em uma superfície em forma de cone, ilustrando a zona de máxima resolução vertical. B) Ondas mais próximas ao centro da zona de Fresnel contribuem para uma maior amplitude. C) A largura da zona de Fresnel está em função da profundidade do refletor e da frequência (Neal, 2004).

#### **4.1.4 GPR em rochas sedimentares e sedimentos**

##### **Propriedades físicas das rochas sedimentares**

A rocha é um conjunto de um ou mais tipos de grãos minerais. Por essa definição, seria esperado que as propriedades físicas das rochas fossem uma simples combinação das propriedades de cada um dos minerais constituintes, mas na verdade o comportamento é bem mais complexo. Isso ocorre, pois se deve levar em consideração a presença de substâncias que não são minerais como, por exemplo, a água no espaço poroso. A água tem um efeito muito forte tanto na condutividade elétrica como a permissividade dielétrica. No caso das moléculas de água, devido a seu forte comportamento dipolar, tendem a rotacionar para se alinhar ao comportamento do campo aplicado, polarizando-se. Além disso, a água é um ótimo solvente e pode possuir uma grande quantidade de íons em solução, que influenciam diretamente a condutividade elétrica. A condutividade não depende apenas da quantidade de íons, mas também da sua mobilidade na porosidade da rochas e a interligação dos poros (Keller,1987).

Segundo Neal (2004), a mudança na quantidade e no tipo de fluido ocupado nos espaços dos poros, a mudança na porosidade, mudança do tipo do grão sedimentar, a mudança de empacotamento do grão, a mudança da forma do grão e orientação podem resultar em diferenças significativas para o sinal eletromagnético, dando origem a refletores nas imagens do perfil GPR (Tabela 5). Sendo assim, fraturas ou falhas, estruturas sedimentares e limites litológicos podem ser visualizados pelo método GPR. Assim como estruturas sedimentares, pois é um produto de mudanças composicionais ou de tamanho de grãos, gerando uma orientação ou empacotamento dos grãos. Isso resultando na mudança de porosidade e por isso relaciona-se sempre com a primeira reflexão do radar, principalmente quando são sedimentos clásticos com estruturas sedimentares hidro ou aerodinâmicas.

As rochas sedimentares, além da influência do conteúdo de água e sais em solução, sofrem a influência do conteúdo de argila presente. As argilas possuem alta capacidade de adsorção de água e trocas de cátions, o que implica em um alto grau de atenuação do sinal GPR. Assim, a profundidade de penetração do sinal GPR é inversamente relacionada ao conteúdo de argila presente na rocha (Daniels, 2004).

Tabela 5 - Exemplos de alguns materiais geológicos e suas propriedades elétricas (Neal,2004).

Medium	Relative dielectric permittivity ( $\epsilon_r$ )	Electromagnetic-wave velocity (m ns <sup>-1</sup> )	Conductivity (mS m <sup>-1</sup> )	Attenuation (dB m <sup>-1</sup> )
Air	1	0.3	0	0
Fresh water	80	0.03	0.5	0.1
Seawater	80	0.01	30,000	1000
Unsaturated sand	2.55–7.5	0.1–0.2	0.01	0.01–0.14
Saturated sand	20–31.6	0.05–0.08	0.1–1	0.03–0.5
Unsaturated sand and gravel	3.5–6.5	0.09–0.13	0.007–0.06	0.01–0.1
Saturated sand and gravel	15.5–17.5	0.06	0.7–9	0.03–0.5
Unsaturated silt	2.5–5	0.09–0.12	1–100	1–300 <sup>a</sup>
Saturated silt	22–30	0.05–0.07	100	1–300 <sup>a</sup>
Unsaturated clay	2.5–5	0.09–0.12	2–20	0.28–300 <sup>a</sup>
Saturated clay	15–40	0.05–0.07	20–1000	0.28–300 <sup>a</sup>
Unsaturated till	7.4–21.1	0.1–0.12*	2.5–10	<sup>b</sup>
Saturated till	24–34	0.1–0.12*	2–5	<sup>b</sup>
Freshwater peat	57–80	0.03–0.06	<40	0.3
Bedrock	4–6	0.12–0.13	10 <sup>-5</sup> –40	7 × 10 <sup>-6</sup> –24

### Interpretação: Radar fácies

As radar fácies originaram-se a partir de comparações com a estratigrafia sísmica. A técnica de interpretação é a mesma para ambas, mesmo com escalas de reflexão bem diferentes. Isso porque para sedimentos clásticos os comportamentos deposicionais de unidades hierárquicas aparecem tanto em escalas bem pequenas como a laminação até escalas de bacia sedimentar. Mesmo possuindo uma enorme distância nas escalas os contrastes físicos que agem nas unidades sedimentares são essencialmente os mesmos, porque as unidades possuem formas similares com suas estruturas internas. Logo, as terminologias utilizadas em radar fácies são muito semelhantes a da estratigrafia sísmica, porém com algumas modificações. Segundo Neal (2004) e Gawthorpe *et al.* (1993), elas podem ser classificadas através da forma da reflexão, o mergulho da reflexão, a amplitude do refletor, a relação entre as reflexões e suas continuidades (Figura 10).

Com a alta resolução do sinal eletromagnético em alta frequência, como no caso do GPR, é possível interpretar fácies sedimentar e a associação de fácies através da reflexão das ondas eletromagnéticas imageadas no perfil e isso auxilia a determinar ambientes de deposição e processos formativos (Neal, 2004).

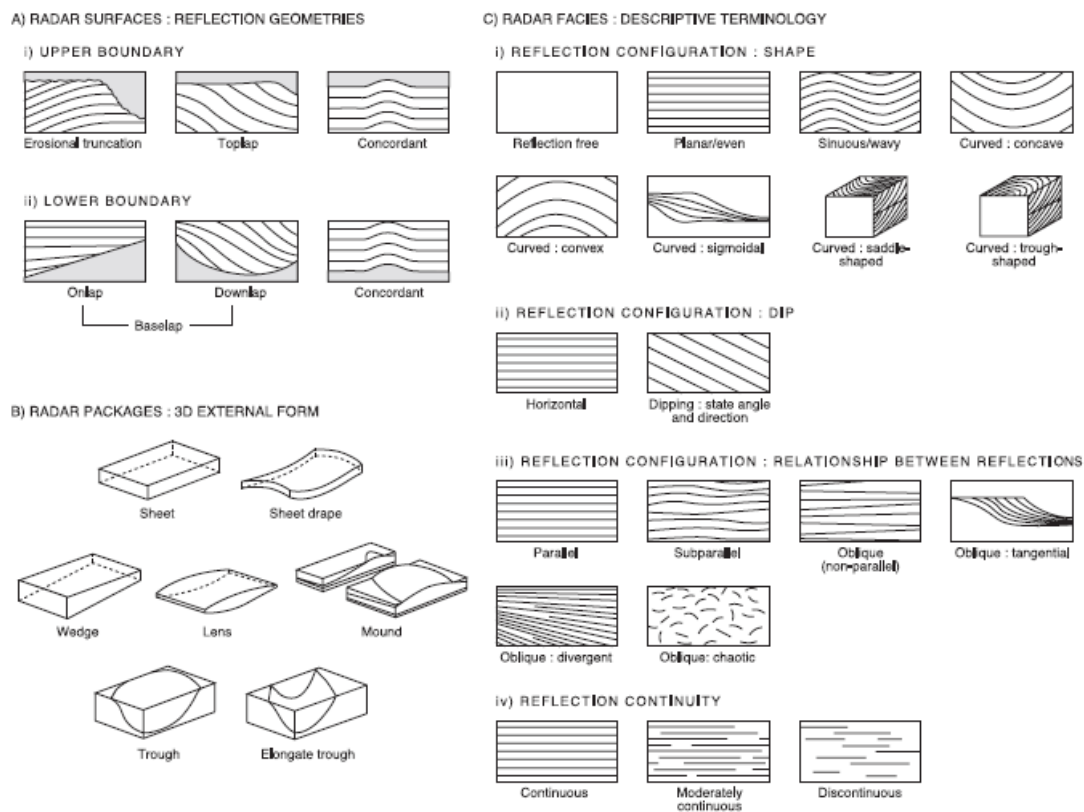


Figura 10 - Terminologia para definir e descrever radarfácies (Neal, 2004). A) Geometria da reflexão, B) Forma 3-D externa dos pacotes de radar e C) Fácies detectadas pelo radar.

#### 4.1.5 Aquisição de dados e processamento

Nesta subseção, descrevem-se quais os procedimentos utilizados no levantamento GPR, a coleta de dados em campo e o processamento utilizado.

O levantamento utilizou-se do arranjo *Common Offset*, ou seja, duas antenas da marca IDS, modelo RIS, cedidas pelo Laboratório de Geofísica Aplicada do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do Instituto de Geociências – USP. Os parâmetros iniciais foram inseridos no software de aquisição de dados K2, sendo o comprimento do registro em relação ao tempo de 250 ns, o número de amostra para cada traços foi de 512 e o espaçamento dos traços 4,8 cm. O arranjo do equipamento foi dado da seguinte forma: as antenas, a primeira transmissora e a segunda receptora são conectadas uma atrás da outra por um cabo transmissor de sinal. No receptor em uma das laterais é encaixado um odômetro de 50 cm que mede a distância da seção. Há outro cabo transmissor da antena receptora para a unidade de controle GPR, além dos cabos que ligam à bateria e ao computador a unidade controle. O espaçamento entre as antenas é constante, ou seja, ao caminhar com o equipamento o software K2 permite visualizar a

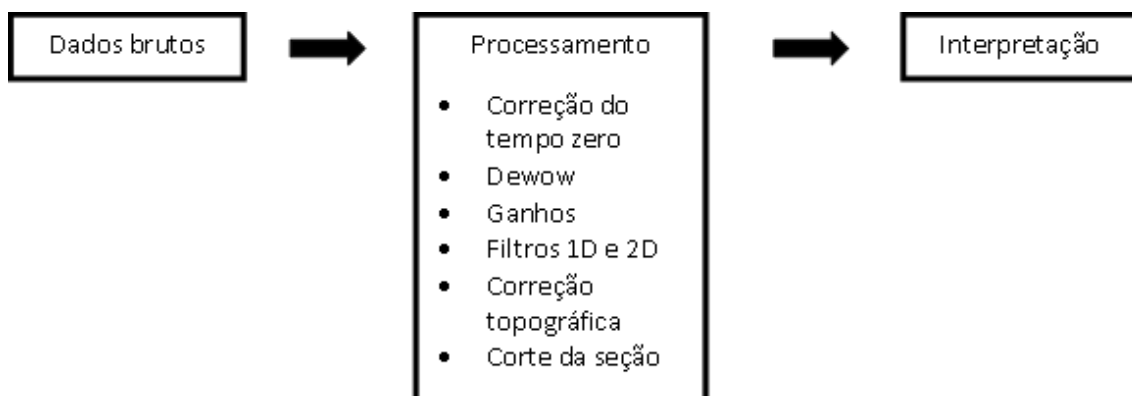
seção em tempo real, além de salvar os dados para serem processados posteriormente (Figura 11).

Os valores de velocidade foram definidos por meio de hipérbolas encontradas nas seções. Esses valores também corroboram com os valores encontrados na literatura para rochas tipo arenito (Tabela 3).



Figura 11 - Levantamento GPR com antena de 100 MHz.

O software utilizado para processar os dados brutos foi o *Reflexw*, pois é um programa com diversos recursos e fácil manuseio. A seguir é representado o fluxograma desde os dados brutos, processamento, até interpretação utilizada no trabalho:



Algumas etapas importantes do processamento será detalhado abaixo, segundo Neal (2004) e Cassidy (2010):

- Correção do tempo zero: corrige a seção para a posição de superfície de tempo inicial, desconsiderando ruídos vindos acima do que o GPR recebe.



- *Dewow*: correção de baixas frequências através de um filtro passa alta que otimiza a precisão do pico do espectro da frequência central, suprindo o déficit causado pela baixa frequência ou saturação de sinal que pode ser devido a chegadas antecipadas como por exemplo ondas aéreas.
- Ganhos: acentua o sinal na seção. Foi utilizado o ganho manual, no qual os valores foram escolhidos pontualmente, afim de não saturar algumas partes da seção já bem definidas e acentuar os locais da seção com grande atenuação.
- Filtros: Utilizados para remover “ruídos”. Os filtros 1D são tipicamente filtros temporais, foi utilizado o filtro passa banda, define-se valores de altas e baixas frequências, delimitando a região de interesse de frequências baseado na frequência central. Nesse caso, ruídos horizontalizados foram atenuados. Os filtros 2D operam no espaço e no tempo, nesse caso foi utilizado o filtro FK (*frequency wavenumber*), onde os dados são transformados no domínio da frequência por número de onda e através do espectro gerado pode-se delimitar a região de interesse. Este filtro foi utilizado para atenuar presença de hipérbolos e ruídos verticais.
- Correção topográfica: os valores de topografia foram corrigidos através do método diferencial, por um GPS topográfico (*Differential Global Positioning System*- DGPS), da marca Trimble modelo 5700 L1/L2.
- Corte de seção: corta a seção apenas na área de interesse.

#### **4.1.6 Trabalhos anteriores sobre GPR em ambientes fluviais**

Nesta subseção serão apresentados alguns trabalhos com levantamento GPR e sua importância para a evolução na interpretação de sedimentos em ambientes fluviais.

Um dos trabalhos precursores de radar fácies foi o de Gawthorpe *et al.* (1993). Neste trabalho, os autores fizeram um levantamento de GPR 2D em uma barra em pontal moderna, no Rio Madson, Montana (EUA) e utilizaram uma técnica de interpretação muito similar à da sísmica. As radar fácies foram definidas como uma mudança na característica do refletor assim como sua configuração, continuidade, frequência e amplitude. Elas são representadas por uma combinação particular de



propriedades físicas devido a sua litologia, tipo de estratificação e conteúdo de fluidos. Elas são utilizadas para interpretar processos deposicionais e ambientes. O uso de radar fácies é largamente aplicado para interpretação de seções GPR até os dias atuais.

Vandenberghe & Overmeeren (1999) estudaram diferentes tipos de rios no sul da Alemanha: Tegen, Bosscherheide e Mill (entrelaçados), Beugen e Lottum (meandranes) e Haps (transicional). Por meio das seções GPR foi possível diferenciar e identificar os três tipos de rios e a diferença entre o canal e a planície de inundação de cada um, definidos através da forma, continuação dos refletores e deposição de sedimentos diferentes.

Best *et al.* (2003) e Smith *et al.* (2009) adquiriram dados GPR nos Rios entrelaçados Jamuna (Bangladesh) e Paraná (Argentina) respectivamente. Foram adquiridos dados GPR em barras com seções paralelas e perpendiculares ao fluxo. Cada radar fácies é descrita através da sua angulosidade, continuação lateral, altura, largura, forma e amplitude da onda. Por meio desses parâmetros já são descritas as características sedimentares e a interpretação da deposição dos sedimentos. Best *et al.* (2003) descreveram quatro radar fácies separando-as por tamanho de escala: Grande escala – reflexão planar ou cruzada grande, interpretada como migração de canal de barra marginal; Média escala – forma acanalada ou reflexão planar descontínua, interpretada como dunas de areia de crista sinuosa; Pequena escala – reflexões descontínuas, interpretadas como pequenas estratificações acanaladas, representando pequenas dunas de cristas sinuosas. E as radar fácies de alta amplitude com reflexões ondulantes foram interpretadas como camadas recobertas por lama em regiões com fluxo pouco intenso. Já Smith *et al.* (2009), não definiram suas radar fácies por meio de escalas de tamanho. As três radar fácies foram definidas como: forma acanalada e refletores sub-horizontais sendo migração de dunas. Refletores inclinados de alto ângulo sendo migração de barras marginais ou final da barra. E alta amplitude de reflexão sendo camada de argila. Nesses casos os autores obtiveram uma interpretação direta, apenas com dados de radar fácies, cada um deles utilizou uma definição de padrão de radar fácies que achou mais conveniente.

Heinz & Aigner (2003) fizeram análises GPR em 3D em um afloramento de rios entrelaçados no sudoeste da Alemanha. Os autores definiram dois grupos deposicionais distintos e os classificaram através do reconhecimento de registros preservados pelos

afloramentos. Foram identificados os elementos deposicionais de corte e preenchimento e elementos acrescionários. Por meio de diversas seções 2D paralelas e perpendiculares espaçadas de 1 m, foi possível mensurar o tamanho e a continuação desses depósitos, o que não seria possível apenas com análises do corte do afloramento. O GPR conseguiu proporcionar a visualização de uma sucessão em 3D possibilitando verificar os elementos arquiteturais em toda sua dimensão.

Com o início de trabalhos com GPR em 3D introduziu-se mais trabalhos em afloramentos devido a possibilidade de modelagem em reservatórios análogos. Corbeanu *et al.* (2001) fizeram levantamentos GPR em canais fluviais da Bacia do Coyote, Utah, Estados Unidos. Através de todas as seções 2D paralelas e perpendiculares espaçadas de 1 m obteve-se a imagem 3D em alta resolução, foram determinadas quatro radar fácies através de terminação de refletores e amplitude do sinal. A separação de cada unidade no afloramento e a posterior modelagem de reservatório foi concatenada com outros dados como: análise de petrofácies, permeabilidade, raios gama e análise de testemunho.

Tatum & Francke (2012) utilizaram o GPR 2D e 3D em dunas eólicas contemporâneas no sul da Líbia, Ubari para construir um reservatório análogo de hidrocarbonetos. Os autores identificaram tipos de sequências sedimentares (superfícies de primeira e segunda ordem e diferentes tipos de dunas) e o GPR juntamente com dados de porosidade e a permeabilidade resultaram em um modelo geológico de um reservatório análogo.

A comparação de radar fácies com afloramento ainda é pouco estudada, devido à dificuldade de interpretação em ambientes fluviais juntamente com dificuldades de logísticas de aquisição sobre afloramentos, além de presença de argila nesse ambiente e alguns fatores diagenéticos que podem afetar a penetração do sinal. Porém, é necessário que sejam feitos mais estudos comparativos entre afloramento e seção GPR para avaliar a resolução que o método pode adquirir e se é confiável a interpretação de depósitos sedimentares através de radar fácies. Além disso, o crescimento nessa área é necessário devido a possibilidade de compreensão de reservatórios petrolíferos.

A maioria dos artigos citados acima são interpretados em grande parte apenas por radar fácies, trincheiras escavadas ou testemunhos rasos. Porém, as trincheiras possuem pouca profundidade e os testemunhos não revelam continuidade lateral e

geometrias. Por isso, a interpretação é praticamente feita apenas pela seção GPR. O grande problema é que não se sabe se o que a seção GPR mostra é exatamente como os sedimentos estão depositados, pois não há outro parâmetro de comparação. Porém, ao passar o GPR em um afloramento já bem descrito sedimentologicamente há uma comparação mais confiável e interpretação pode não ser a mesma encontradas para ambas.

## 4.2 Resistividade elétrica

Nesta seção serão descritos fundamentos teóricos, os princípios do método, técnica e arranjo, o comportamento do método em rochas e o uso desse método em trabalhos que utilizaram o GPR concomitantemente.

### 4.2.1 Fundamentos Teóricos

Nesta subseção descrevem-se fórmulas que constituem os princípios físicos de resistividade elétrica.

A seguir a tabela 6 com as definições e unidades utilizadas para descrever as fórmulas do método ER.

Tabela 6 - Definições e unidades utilizadas no método ER.

Símbolo	Significado	Unidade em SI
$\vec{E}$	Vetor de força de campo elétrico (Keller e Frischknecht, 1977).	Volt por metro (V/m).
$\vec{J}$	Vetor densidade de corrente elétrica (Keller e Frischknecht, 1977).	Ampère por metro quadrado (A/m <sup>2</sup> ).
$\sigma$	Habilidade do material de passar cargas elétricas livres sob a influência de um campo aplicado (Cassidy, 2010).	Siemens/metros (S/m).
$\rho$	Inversamente proporcional a condutividade (Keller e Frischknecht, 1977).	Metros por Siemens (m/S).
$\delta R$	Variação da resistência (Keller e Frischknecht, 1977).	Ohm ( $\Omega$ )
$\delta L$	Variação do comprimento (Keller e Frischknecht, 1977).	Metros (m)
$\delta A$	Variação da área (Keller e Frischknecht, 1977).	Metros quadrados (m <sup>2</sup> ).
$\delta U$	Variação do potencial (Kearey <i>et al.</i> , 2002).	Volts (V).
$\vec{U}_{total}$	Potencial total do sistema (Keller e Frischknecht, 1977).	Volts (V).
K	Fator geométrico (Keller e Frischknecht, 1977).	

A lei de Ohm é uma expressão matemática que define a condutividade de um material, ou seja, a lei afirma que a intensidade do campo elétrico ( $\vec{E}$ ) em um ponto no material é proporcional à densidade de corrente ( $\vec{J}$ ) que passa nesse mesmo ponto (Keller e Frischknecht, 1977), definida por

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (1)$$

sendo, a condutividade ( $\sigma$ ) definida quando o material possui habilidade de se conduzir eletricamente quando uma voltagem é aplicado sobre ele. Note que a resistividade ( $\rho$ ) é inversamente proporcional a condutividade ( $\sigma$ ), sendo resistência de uma material quando aplicado uma voltagem sobre ele dado por

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, (2)$$

em que  $\rho$  é definido por

$$\rho = \frac{\delta R \delta A}{\delta L}, (3)$$

sendo um cilindro condutor de resistência  $\delta R$ , comprimento  $\delta L$ , área de seção transversal  $\delta A$  a resistividade.

#### **Fluxo de corrente no solo** (Kearey *et al.*, 2002)

A lei de Ohm pode ser reescrita de outra maneira e ser relacionada à variação de potencial ( $U$ ), resistência ( $R$ ) e corrente ( $I$ ) dada por  $-\delta U = \delta R I$ . Além disso, substituindo na equação (3) obtém-se

$$\frac{\delta \vec{U}}{\delta L} = \frac{-\rho I}{\delta A} = -\vec{J} \rho, (4)$$

, ou seja, o campo elétrico é o gradiente do potencial escalar

$$\left( \frac{\delta \vec{U}}{\delta L} = \vec{E} \right). (5)$$

Agora considerado um fluxo de corrente no solo, com apenas uma fonte, a corrente flui radialmente a partir da fonte e considera que a distribuição de corrente é uniforme na área de penetração (semiesférico). Assim, a área é dada por  $\delta A = 2\pi r^2$ , define  $r$  como o valor da distância da fonte até a superfície equipotencial. Desta forma, a equação acima pode ser descrita como:

$$\frac{\delta \vec{U}}{\delta r} = \frac{-\rho I}{2\pi r^2}. (6)$$

Integrando ambos os lados da equação (6), obtém-se a relação do potencial a uma dada distância ( $\vec{U}_r$ ), dada por

$$\vec{U}_r = \frac{\rho I}{2\pi r}. (7)$$

Segundo Keller e Frischknecht (1977), há diversas fontes de corrente o potencial total pode ser calculado como a soma de cada potencial de fontes diferentes consideradas independentes.

Considerando um arranjo com quatro eletrodos, dois de corrente A e B e dois de potencial M e N (Figura 12), o potencial total do sistema é dado por

$$\vec{U}_{total} = \vec{U}_A + \vec{U}_B, (8)$$

sendo AM a distância entre eletrodo de corrente A até o de potencial M, AN, BM e BN as outras distâncias entre eletrodos de corrente e potencial a fórmula da diferença de potencial é dada por

$$\overline{\Delta U} = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) - \left( \frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right) \right\}. \quad (9)$$

E então a resistividade de um solo homogêneo e dado por

$$\rho_a = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \left( \frac{\overline{\Delta U}}{I} \right) = K \frac{\overline{\Delta U}}{I}, \quad (10)$$

Sendo K o fator geométrico e  $\rho_a$  a resistividade aparente.

Porém, na prática o solo não é um meio homogêneo, ou seja, haverá irregularidades em relação aos pontos medidos, ou seja, a expressão acima é utilizada como resistividade aparente  $\rho_a$ , devido as heterogeneidades da subsuperfície.

#### 4.2.2 Princípios da técnica de investigação

Nesta subseção serão detalhados os princípios da técnica de investigação caminhamento elétrico e descrever o tipo de arranjo utilizado no levantamento que foi o dipolo- Dipolo.

##### **Caminhamento elétrico**

A técnica baseia-se na medição de parâmetros físicos como a resistividade e cargabilidade (no caso desse estudo especificamente a resistividade) que são obtidos através de investigações pontuais em subsuperfície lateralmente e em profundidade. E a somatória desses pontos em subsuperfície resulta em uma seção com diferentes níveis de investigação que poderá mostrar as heterogeneidades do local investigado e uma possível interpretação litológica (Braga, 2007).

Segundo Keller e Frischknecht (1977) o caminhamento elétrico é utilizado para determinar diferentes resistividades verticais, ou seja, determinar descontinuidades laterais do material geológico, no caso desse estudo investigar diferentes resistividades sedimentares.

A técnica constitui de dois eletrodos de corrente e dois de potencial que são mantidos a uma distância fixa conhecida e movidos progressivamente ao longo da seção. Nesse estudo o arranjo utilizado foi o dipolo-dipolo.

### Arranjo: Dipolo- Dipolo

Nesse tipo de arranjo há uma distância fixa entre os eletrodos de corrente A e B e potencial M e N. No primeiro nível de investigação os 4 eletrodos possuem mesma distância ( $2l=AB=BM=MN$ ) e caminham lateralmente a essa distância fixada. No segundo nível de investigação os eletrodos de potencial caminham lateralmente para próxima posição de eletrodos e uma distância fixada caminham lateralmente e assim sucessivamente para os próximos níveis (Figura12).

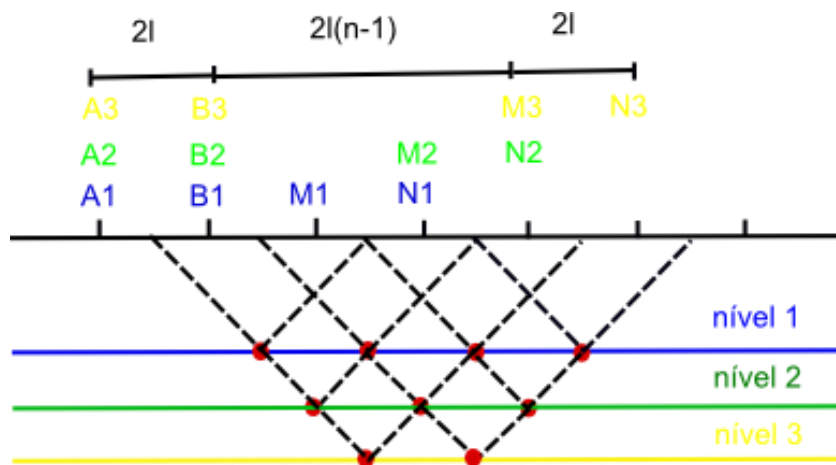


Figura 12- Esquema do arranjo dipolo-dipolo para vários níveis de investigação.

Telford *et al.* (1990) definem matematicamente a explicação acima e simplifica a equação 9 considerando  $AM=BN= 2nl$ ,  $BM= 2l(n-1)$  e  $AN=2l(n+1)$ :

$$\rho_a = 2\pi n^3 l \frac{\Delta U}{I} \quad (10)$$

#### 4.2.3 Propriedades elétricas em rochas e minerais

Diversas propriedades elétricas das rochas e minerais são significativas como: potenciais elétricos, condutividade/ resistividade elétrica, constante dielétrica e a permeabilidade magnética (possui influência indiretamente). Porém, de todas as citadas acima a condutividade elétrica é a mais difundida (Telford *et al.*,1990).

Segundo Keller e Frischknecht (1977) a condução elétrica ocorre através de processos eletrônicos ou iônicos. Condutores sólidos são divididos em três classes dependendo do mecanismo de corrente de condução: metálicos (metais nativos), semicondutores (sulfetos) e eletrólitos sólidos (siliciclásticas). Porém, as rochas não são formadas apenas por minerais por isso as propriedades elétricas não são determinadas apenas através das propriedades dos minerais constituintes. Todas as rochas possuem

poros que podem estar preenchidos ou não e isso influencia diretamente nas propriedades elétricas.

Orellana (1972) disse que um mesmo tipo de rocha pode mostrar comportamentos diferentes dependendo de algumas influências que podem ser exercidas sobre elas como: conteúdo de água, tamanho do grão, porosidade, metamorfismo e efeitos tectônicos. O valor de resistividade muda de um ambiente para outro, porém sempre está numa faixa determinada de resistividade, podendo assim determinar o tipo de rocha (tabela 7).

Tabela 7 - Valores de resistividade adaptado de Gallas (2000).

<b>Resistividade das águas (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>	
Água do solo	1-100
Água da chuva	30-1000
Água do mar	0.2
Gelo	$10^5 - 10^8$
<b>Resistividade de litologias, abaixo do nível d'água (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>	
Ígneas e metamórficas	100-10.000
Sedimentos consolidados	10-1000
Sedimentos inconsolidados	1-100

No caso mais específico dos sedimentos Baines *et al.* (2002) diz que a resistividade está diretamente ligada ao tamanho do grão. Ou seja, normalmente em locais com umidade, cascalhos são mais resistentes que areia, que por sua vez são mais resistentes que o silte e o mais condutivos de todos a argila.

#### **4.2.4 Aquisição e processamento de dados**

Nesta subseção descreverá como foi adquirido os dados em campo do levantamento ER assim como o processamento utilizado.

No levantamento de resistividade elétrica foi utilizada a técnica de investigação de caminhamento elétrico. O equipamento utilizado para adquirir a resistividade aparente do solo foi o resistímetro multieletrodo da marca IRIS, modelo *Syscal Switch Pro*®, com 48 canais, cedido pelo Laboratório de Geofísica Aplicada do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do Instituto de Geociências – USP (Figura 13). O programa de entrada do equipamento foi o *Electric Pro*®, no qual é possível montar diversos arranjos no notebook e transferir os dados para o resistímetro. Os parâmetros dados nesse trabalho foram dados como: arranjo dipolo-dipolo com espaçamento entre



os eletrodos de 2,5 m a profundidade estimada foi de aproximadamente 9,5 m e 647 pontos investigados.

Além do equipamento que mede a resistividade aparente em subsuperfície foram utilizados uma bateria interna para o receptor e uma bateria externa para o transmissor, dois cabos especiais totalizando 48 conectores ligados através de jacarés nos eletrodos, totalizando uma seção de 117,5 m.

Após a aquisição dos dados, estes são transferidos para o notebook através de um outro programa de saída *Prosys*®, o arquivo é transformado em DAT para ser utilizado pelo software de inversão RES2DINV da Geotomo Software.

Segundo Saraiva (2010) o programa RES2DINV utiliza a inversão através dos métodos dos mínimos quadrados, dessa maneira não há necessidade que haja o conhecido a princípio de modelo geológico proposto. O programa modela a subsuperfície do solo investigado sem as distorções observadas nas pseudo-seções de resistividade aparente (dados brutos), devido ao efeito de borda e eletrodos causado pela geometria estipulada.



Figura 13- Configuração do levantamento ER.

#### **4.2.5 Trabalhos anteriores com o uso de ER com GPR**

Nesta subseção, serão apresentados trabalhos que utilizam os dois métodos concomitantemente, sendo que o principal objetivo do ER é determinar a litologia da área investigada.

Baines *et al.* (2002) foram um dos precursores de investigação de resistividade elétrica com objetivo de mapear a litologia e a geometria de vales e canais. Já era vasta a investigação de GPR em ambientes sedimentares, porém o mapeamento de resistividade elétrica era um desenvolvimento recente na área que trouxe outra maneira rápida e eficiente de mapear a subsuperfície em sedimentos. Devido a um diferente tipo de investigação de propriedade física esse método trouxe outra maneira de interpretação dos sedimentos. Eles são interpretados a partir da sua resistividade: areias arcóseas e cascalhos são normalmente mais resistentes, enquanto siltes e argilas são mais condutivos. Partindo desse princípio básico o autor investigou dois canais e dois vales e comparou com outros métodos previamente investigados como: poços, testemunhos e GPR. Os resultados foram satisfatórios, pois nos quatro locais de investigação foi possível verificar o preenchimento de canais e vales, claramente observados em anomalias resistivas representadas por areia ou cascalho, além disso, os resultados foram compatíveis com os outros métodos de investigações citados acima.

Trabalhos atuais já utilizaram os dois métodos em conjunto, como no caso de Pellicer & Gibson (2011) que utilizaram ER e o GPR para mapear e interpretar sedimentos inconsolidados do Quaternário na área de Midlands na Irlanda. Foram levantados quatro perfis de ER para encontrar a profundidade do embasamento e determinar a classificação litológica dos sedimentos e cinco seções de GPR para descrever a arquitetura interna de sedimentos inconsolidados dentro de locais com baixa condutividade, além da classificação e caracterização sedimentológica e estruturas deformacionais. O objetivo do uso dos dois métodos deu-se pela determinação da composição litológica e o detalhamento da arquitetura interna em subsuperfície de sedimentos inconsolidados e com isso um melhor entendimento de processos atuantes na área estuda. O mais importante nesse trabalho foi que os resultados dos métodos foram complementares e juntamente com outras análises de laboratório permitiram a caracterização geológica da área de estudo e a reconstrução de um ambiente deposicional.

Em outro trabalho recente, Rey *et al.* (2013) utilizaram os métodos ER e GPR para investigar ambientes fluviais, tanto em afloramentos quanto em uma planície aluvial ativa do terreno do Rio de Guadalquivir, sul da Espanha. A utilidade do uso dos dois métodos é analisar e comparar os estudos através da estratigrafia e sedimentologia. A morfologia de corpos (geometria), as litofácies (cascalho, areia e silte) e canais enterrados em subsuperfície foram caracterizadas pelo ER e comparados com observações feitas em campo. Pelo GPR foram adquiridas a morfologia e a forma de preenchimento dos sedimentos com mais detalhes do que pelo ER. Neste estudo foram encontrados canais de migração, acréscimo lateral de barras em pontal e a presença de acréscimo vertical em depósitos de planície de inundação através da combinação dos dois métodos.

Portanto foi visto que trabalhos que utilizam os métodos de GPR e ER integrados ainda são recentes, porém mostram resultados amplamente satisfatórios, sendo que um método é complementar ao outro. Mas, a maioria dos estudos tem foco em sedimentos inconsolidados, diferentemente do presente trabalho que visa o estudo em afloramento bem expostos.

Para finalizar lembrar que o objetivo principal deste trabalho está nas análises e interpretação de radar fácies. Porém como qualquer outro método ele não consegue suprir todas as necessidades de uma investigação e precisa de outras investigações auxiliares. Nesse caso, o método elétrico possui resposta melhor para solos argilosos do que o GPR que possui maior penetração em solos arenosos.

## 5. RESULTADOS

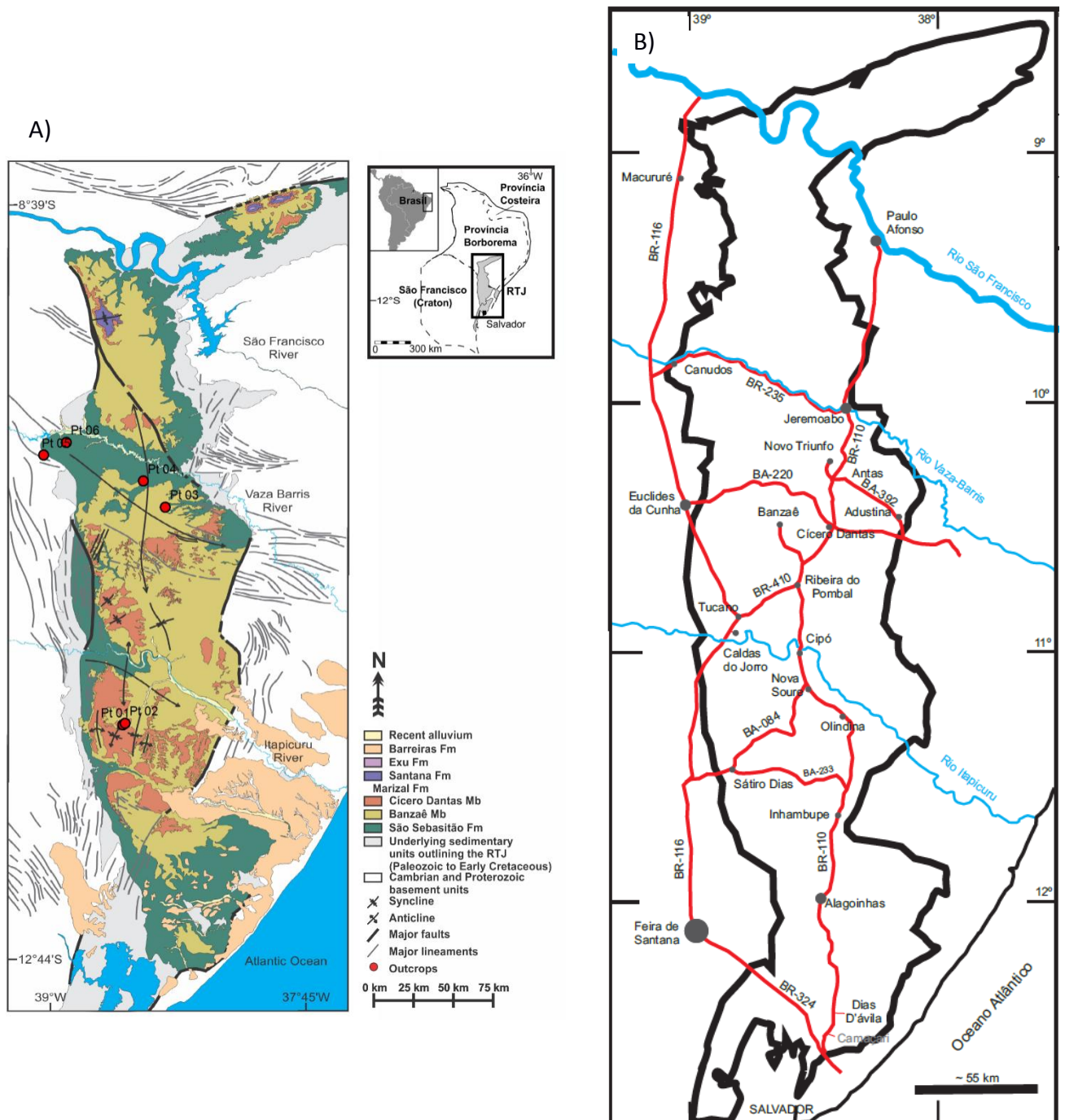


Figura 14- A) Mapa geológico Bacia do Tucano adaptado de Freitas (2014) com os pontos de onde foram feitos os levantamentos. B) Mapa das principais cidades e estradas da área de estudo (Freitas, 2014).

### **5.1 Levantamento de radar de penetração de solo**

Esta seção apresenta os resultados do radar de penetração no solo. Os levantamentos foram realizados nas sub-bacias do Tucano Sul e Central e suas localizações exatas estão representados no mapa da Figura 14.

Foram realizadas duas campanhas de aquisição de dados GPR. O primeiro em maio e o segundo em novembro de 2014. Em ambas as etapas de campo foram utilizadas antenas de 100 MHz. Os pontos de levantamento GPR são descritos a seguir, do Sul da Bacia em direção ao Norte.

#### **Formação Marizal na localidade de Raso (BA), Sub-bacia do Tucano Sul.**

No Ponto 1 da Figura 14 localizado na Sub-bacia do Tucano Sul, próximo à cidade de Sátiro Dias, na Formação de Marizal. O levantamento teve o comprimento total de 90 m e foi realizado paralelo à rodovia BA 403. A profundidade de investigação chegou a no máximo 2,5 m. Em alguns locais houve perda de sinal, provavelmente em decorrência de irregularidades no terreno, pois o GPR foi passado diretamente na rocha. Em alguns locais onde a rocha é irregular, o equipamento não consegue obter a imagem precisa da subsuperfície ocorrendo distorções na seção, podendo ter pouca penetração ou até mesmo a perda total de sinal. Isso ocorre em alguns trechos da seção, como em 0 à 10 m, 30 m à 40 m e de 60 à 80 m. O restante da seção mostrou as mesmas características de refletores. Que foram refletores levemente ondulados descontínuos ou com truncamentos de baixo ângulo, interpretados como limites de série sub-horizontais (Figura 15).

#### **Formação São Sebastião na localidade de Jeremoabo (BA), Sub-bacia do Tucano Central.**

O Ponto 3 trata-se de um afloramento nos dois lados da estrada BR 110. No corte melhor exposto, descrito por Figueiredo (2013), não foi possível passar o GPR, devido às condições do afloramento. Já o outro corte permitiu a realização do levantamento, pois acima do afloramento encontra-se uma saída da estrada principal. A seção teve um comprimento próximo a 200 m, e profundidade de investigação também rasa, alcançando por volta de 2 m (Figura 16). Mesmo com pouca penetração foi possível identificar pequenos canais, representados por refletores em forma côncava para cima,

com extensão maior que 5 m e sobrepostos por refletores plano paralelos com terminações em *onlap*, nas distâncias de 55 m à 90 m, e 170 m à 210 m. Eles foram interpretados como estruturas de corte e preenchimento com forma canalizada e preenchimento interno plano-paralelo ou com séries de cruzadas menores que a resolução do método. O restante da seção é representado por refletores plano paralelo contínuo, que sugerem que nesses trechos a resolução da antena de 100 MHz não permitiu o imageamento das estruturas sedimentares.

### **Formação São Sebastião no povoado dos Branco (BA), Sub-bacia do Tucano Central.**

O Ponto 4 constitui em um afloramento escavado há pouco tempo na estrada BR 235. O levantamento foi feito diretamente na rocha em três orientações diferentes. Na seção A (Figura 17), o levantamento acompanhou o afloramento no sentido da estrada e teve comprimento 140 m, chegando em alguns trechos à profundidade de 4,5 m de investigação. No início da seção, entre 0 e 40 m, observam-se refletores levemente inclinados com grande amplitude e espaçamento próximo de 0,7 m. Foram interpretados como limites de série cruzados de dunas cavalgantes. Já dentro de cada limite de série observam-se duas formas de refletores diferentes. No primeiro mais ao topo em menor amplitude que os limites de séries notaram-se refletores em forma côncava para cima com comprimento menor que 4 m, interpretados como estratos cruzados acanalados que são as frentes de cada duna preservada. A inclinação dos limites de série na mesma direção dos estratos cruzados sugerem migração de dunas na porção frontal de uma barra. No segundo, em maior profundidade na seção, também com menor amplitude que os limites de séries cruzados, observaram-se refletores inclinados com alto ângulo e espessura de 0,4 m e foram interpretados como estratos cruzados tabulares que representam as frentes de dunas de cristas retas, a inclinação dos limites de série na mesma direção dos estratos cruzados também sugere acréscimo para jusante. Nas distâncias de 40 m e 60 m observa-se um refletor inclinado com alta amplitude e abaixo dele não há mais penetração do sinal, isso sugere uma forte impedância dielétrica que pode ser resultado de mudança abrupta por exemplo, no tipo do sedimento ou na granulação, nesse caso. A partir de 80 m até 115 m, o sinal consegue chegar a uma maior penetração e volta a ter um padrão semelhante ao início da seção



só que com uma resolução menor, possivelmente devido a mudança do grau de alteração ou cimentação. Entre as distâncias de 115 m e 130 m houve perda de sinal, que pode ter ocorrido devido à irregularidade da superfície rochosa. E no final da seção entre 130 m e 140 m notou-se um refletor inclinado separando uma mudança abrupta no tipo de sedimento ou granulação.

Na seção B (Figura 18) praticamente transversal à seção A, o comprimento da seção foi curto, apenas 36 m e a profundidade alcançou 2,5 m. O intuito dessa seção foi mostrar as estruturas sedimentares vistas de outro ângulo. Do início até 14 m a seção mostra refletores com alta amplitude, plano paralelos com espaçamento entre eles de 0,5 m. Dentro de cada um deles notam-se refletores inclinados com menor amplitude, ou seja, são os mesmos limites de séries que seção anterior e internamente estratos cruzados tabulares. Porém em corte paralelo à direção média dos estratos cruzados, os limites de séries parecem horizontais (seção B) e vistos lateralmente os limites são inclinados (seção A), revelando forma de um plano inclinado. Próximo de 14 m até 20 m, os refletores aumentam de amplitude e inclinam-se a altos ângulos para direita (Sudoeste da seção GPR). O espaçamento é decimétrico entre os refletores de maior amplitude. Os conjuntos de refletores inclinados apresentam mais de 1 m de espessura. Localmente ocorrem refletores menores, descontínuos e com terminação em *onlap* sobre os mais contínuos. São interpretados como estratos cruzados de grande porte. O alto ângulo e a espessura dos conjuntos de estratos cruzados são compatíveis com faces de avalanche em barras unitárias e as pequenas variações na direção ou inclinação das frentes das barras estão associadas à superfícies de reativação. A partir de 20 m, os refletores voltam ao padrão do início da seção, porém com menor penetração e resolução, provavelmente em decorrência da irregularidade da superfície rochosa.

A seção C (Figura 19) acompanhou o afloramento em sentido oposto à seção A. O comprimento da seção foi próximo de 100 m e a profundidade chegou até 2,5 m. Obteve-se melhor resolução 0 à 22 m e notou-se a presença de limites de séries levemente ondulados preenchidos por refletores com menor amplitude e formas côncavas para cima com comprimento de até 3 m. Foram interpretadas como limites de séries de dunas cavalgantes de cristas sinuosas em corte ortogonal à direção de migração, com estrutura interna de estratos cruzados acanalados que são as frentes de dunas preservadas.

### **Formação São Sebastião próximo ao município Canudos (BA), Sub-bacia do Tucano Central.**

No Ponto 6, o levantamento foi feito sobre o afloramento (Figura 20) próximo à BR 235. Devido a questões logísticas, não foi possível obter uma seção longa, com uma distância de apenas 23 m e profundidade máxima de 2,5 m. Nessa seção foi possível observar refletores bem definidos, com alta amplitude, sutilmente ondulados e contínuos com espaçamento de 0,3 m. Foram interpretados como limites de série sub-horizontal de uma duna/barra sinuosa em corte ortogonal à direção de migração. Dentro de alguns deles é possível identificar refletores com amplitudes baixas em forma côncava para cima que chegam até 3 m de comprimento, foram interpretados como estratos cruzados acanalados internos que representam as frentes de cada duna preservada.

### **Formação São Sebastião próximo ao município de Canudos (BA) próximo a Toca velhas das araras, Sub-bacia do Tucano Central.**

O último levantamento de GPR no Ponto 5, foi a única seção em arenitos de ambiente eólico. O comprimento da seção (Figura 21) foi de 140 m e o sinal penetrou mais que nas outras seções chegando bem próximo de 5 m. A seção como um todo apresenta refletores cruzados bem definidos e com alta angulosidade, com espaçamento entre eles de 0,5 m. Foram interpretados como estratos cruzados de grande porte formados por dunas eólicas. Observou-se acima dos refletores cruzados, refletores sub-horizontais com terminações *onlap* e espaçamento entre eles decimétricos. Interpretados como estratos sub-horizontais com terminações *onlap* sobre sugerindo superfícies inferiores erosivas para sucessões de interdunas.

Apenas na parte central entre 45 m e 64 m houve perda de sinal. Notou-se que nesse trecho havia um vale e no dia anterior ao levantamento havia chovido, causando a saturação da rocha na parte mais baixa da seção, isso fez com houvesse a perda sinal nesse local.

Através das seções descritas foi possível identificar oito tipos de radar fácies característicos das unidades investigadas, resumidos a seguir na Tabela 8. Notam-se que as radar fácies 2 e 7, 3 e 6 possuem a mesma interpretação de ambiente deposicional, o que as diferenciou em classificação de radar fácies foi a mudança de inclinação dos



refletores na seção GPR e isso dependeu da orientação em que os levantamentos foram passados nos afloramentos.

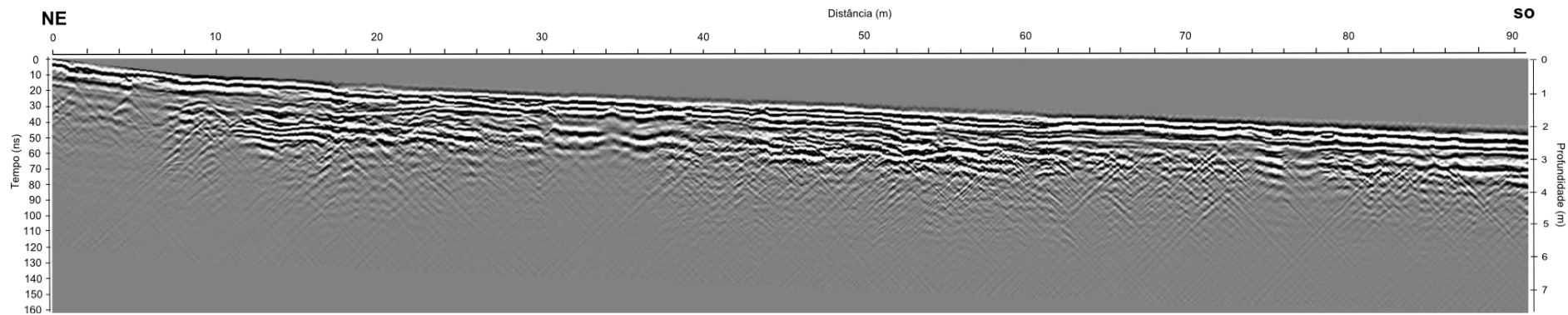


Figura 15- Levantamento GPR no Ponto 1 do mapa da Figura 14, a seção mostra em alguns trechos refletos levemente ondulados contínuos, interpretados como cruzados de baixo ângulo e limites de série sub-horizontais.

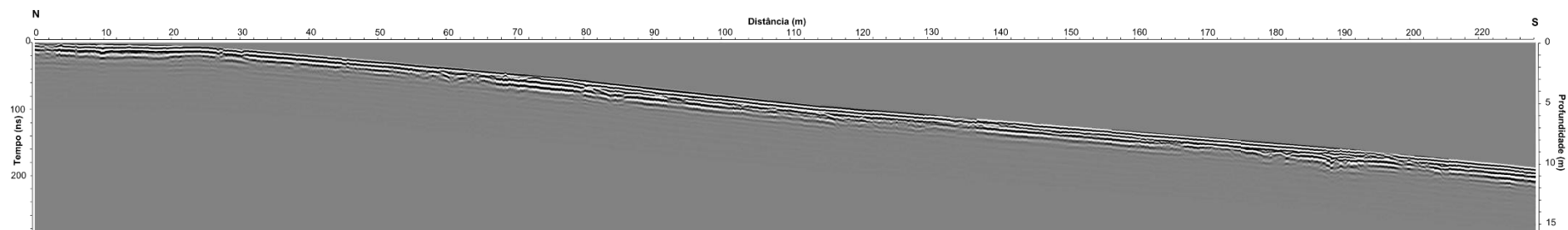


Figura 16- Seção de GPR no Ponto 2, notam-se os refletos em forma côncava para cima e dentro deles refletos plano-paralelos com terminação em onlap. Foram interpretados como estruturas de corte e preenchimento com forma canalizada e o preenchimento interno de arenitos ou pelitos plano-paralelo ou com séries de cruzadas menores que a resolução do método.

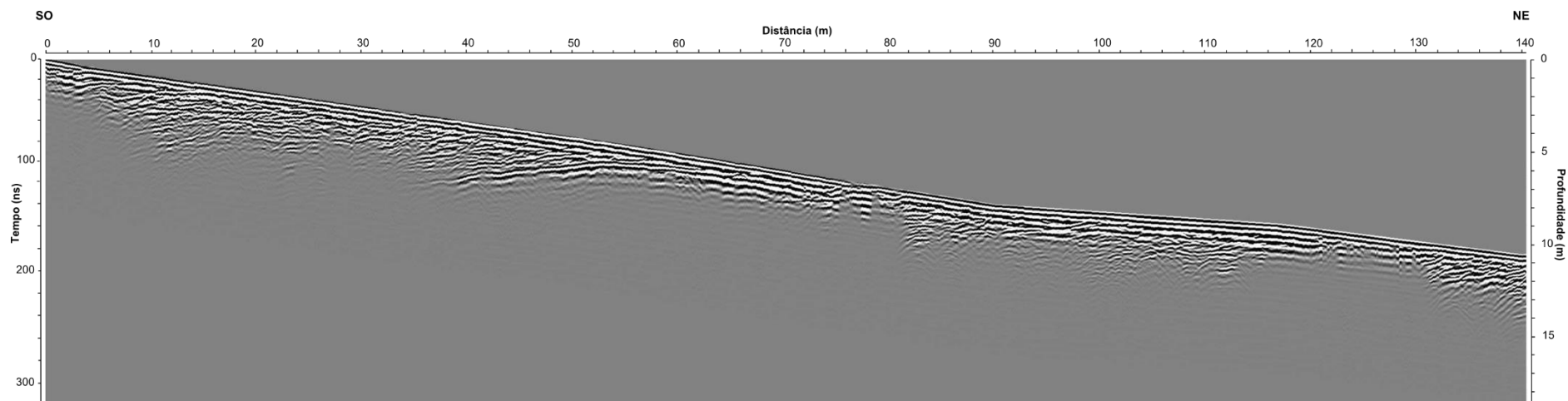


Figura 17- No Ponto 3 (Figura 14) a seção A mostra no início da seção refletores inclinados com alta amplitude e dentro de cada um deles refletores de menor amplitude de forma côncava para cima e refletores também de menor amplitude cruzados tabulares. Interpretados como limites de séries cruzados de dunas cavalgantes e estratos internos cruzados acanalados ou estratos internos cruzados tabulares representando as frentes de cada duna preservada. Mais adiante se observa um refletor com uma forte amplitude e inclinado, interpretado como mudança de granulação e no final da seção também ocorre a mesma outra mudança na granulação dos sedimentos.

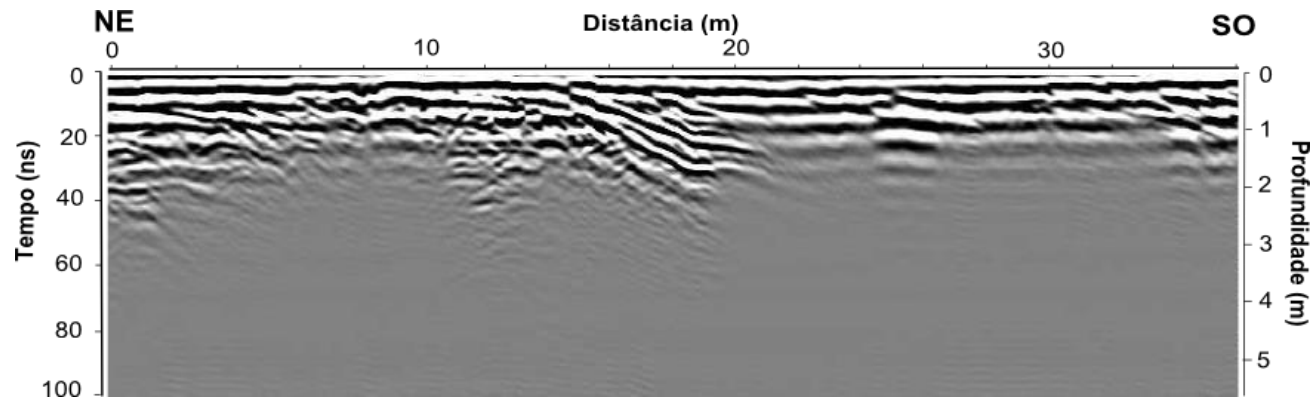


Figura 18- Na seção B do Ponto 3 (Figura 14) nota-se no meio da seção a presença de refletores inclinados com alta angulosidade representando os estratos frontais e as laterais da seção observa-se refletores subparalelos contínuos e dentro deles refletores inclinados de menor amplitude, interpretados com limites de série subparalelos de dunas cavalgantes em corte ortogonal à direção de migração com estratos internos cruzados tabulares que são as frentes de dunas preservadas.

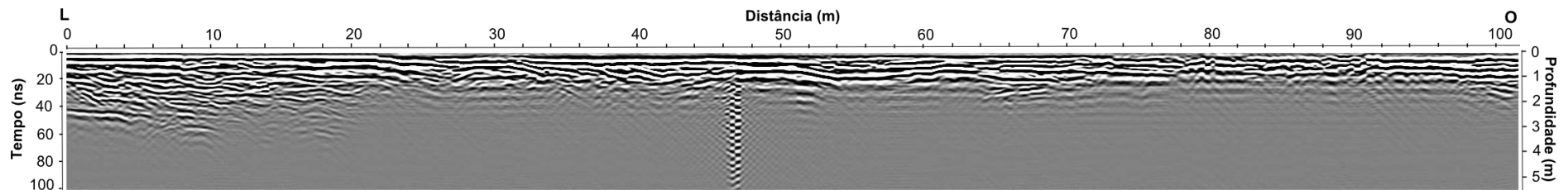


Figura 19- A última seção (C) do Ponto 3 a maior parte da seção é representada por refletores contínuos levemente ondulados e em alguns locais dentro desses refletores consegue-se notar alguns refletores de menor amplitude em forma côncava para cima. Interpretados como limites de séries de estratos cruzados acanalados formados por dunas cavalgantes com crista sinuosa *em corte ortogonal à direção de migração* com estratos internos cruzados acanalados que são as frentes de dunas preservadas.

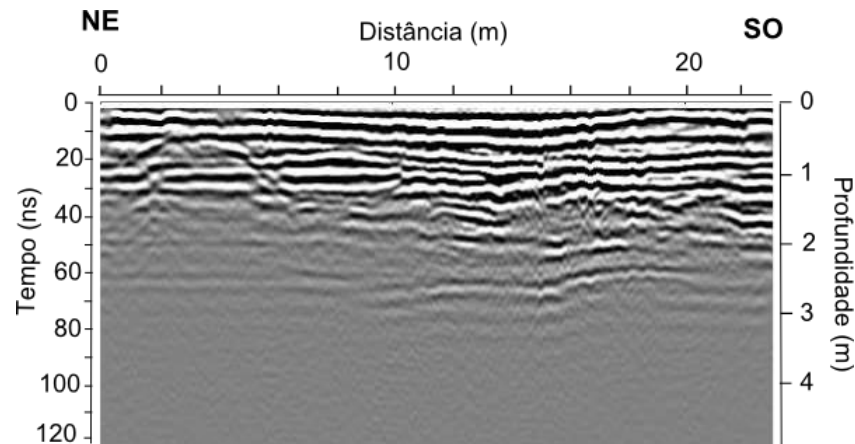


Figura 20- A seção de GPR do Ponto 6 (Figura 14) apresenta refletos com alta amplitude, levemente ondulados e contínuos, dentro deles em alguns locais observa-se a existência de refletos de baixa amplitude em forma côncava para cima. Essa seção foi interpretada como limites de séries de dunas cavalgantes com crista sinuosa em corte ortogonal à direção de migração com estratos internos cruzados acanalados que são as frentes de dunas preservadas.

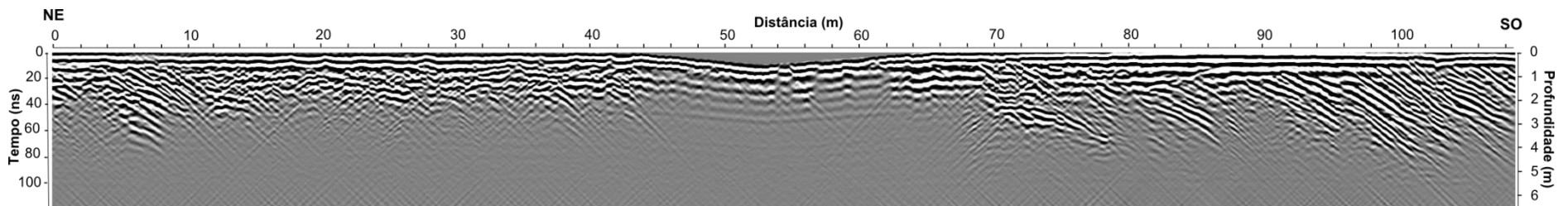
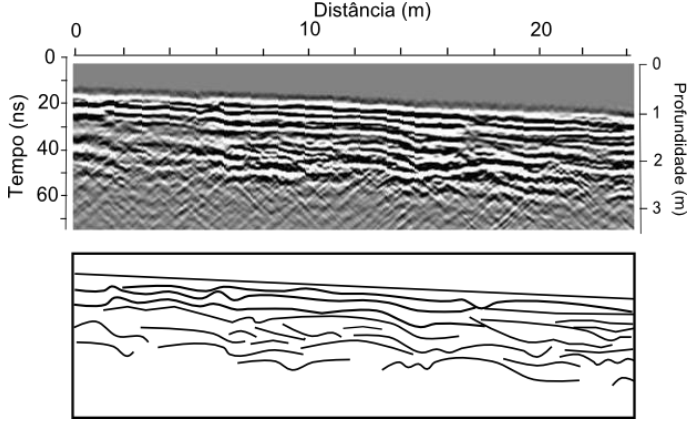
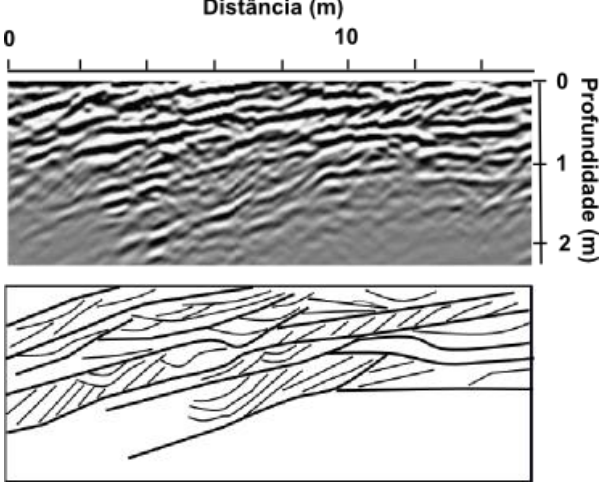
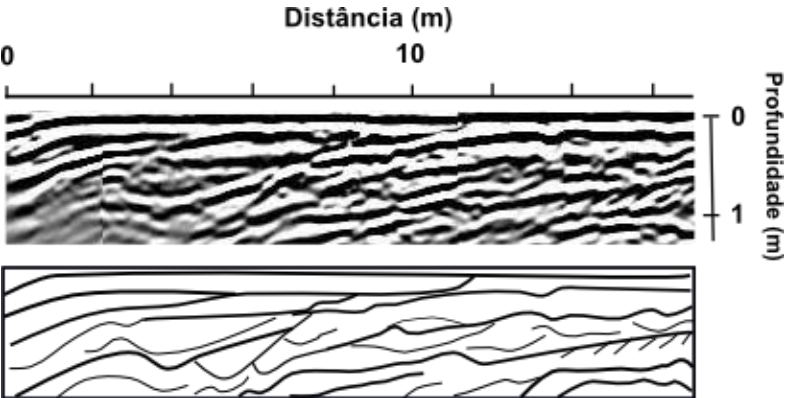
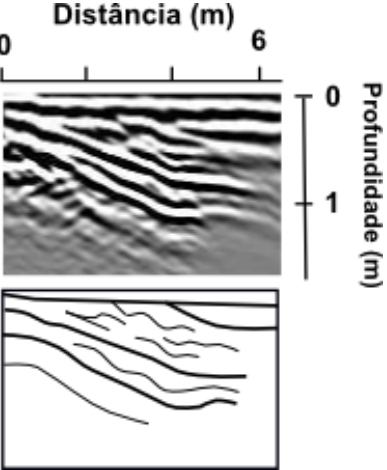


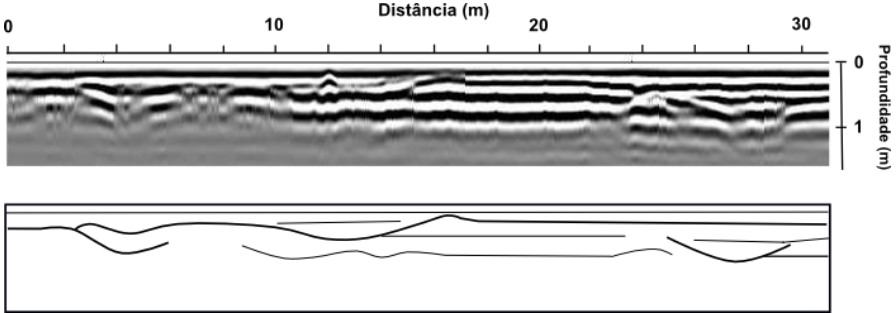
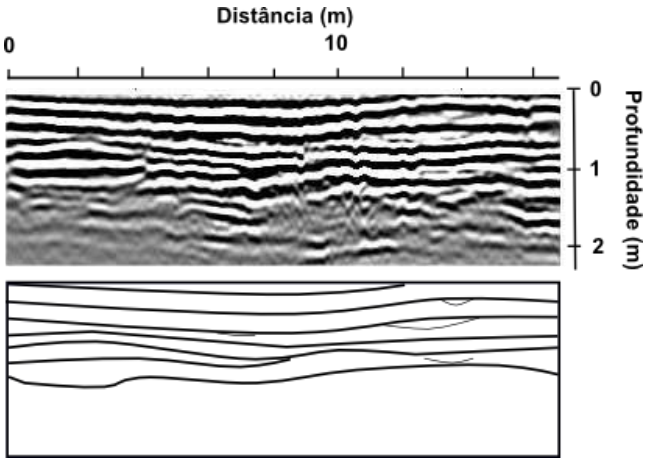
Figura 21- Ponto 5 a seção GPR foi feita em ambiente eólico, nota-se uma penetração um pouco maior que nas seções anteriores. Em quase toda seção apresentam-se refletos de alta amplitude e inclinados em direção sudoeste representando estratos cruzados de grande porte formados por dunas eólicas e os refletos que truncam os estratos cruzados sugerem superfícies inferiores erosivas para sucessões de interdunas.

Tabela 8 - Radar fácies encontradas nas seções acima (topo) com descrição e figura ilustrativa da interpretação geológica (base) para cada uma delas.

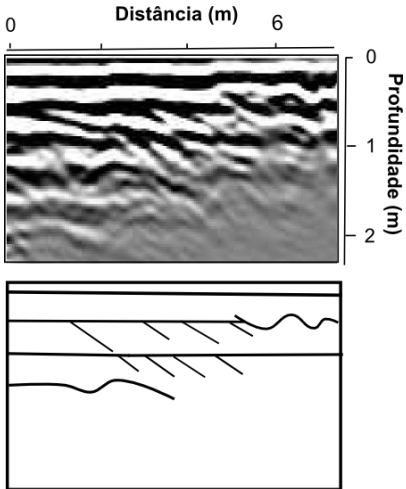
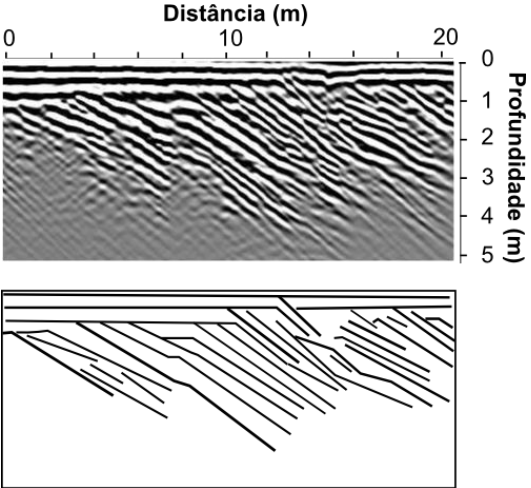
Radar fácies	Descrição	Interpretação
<p>1</p> 	<p>Refletores levemente ondulados contínuos ou com truncamentos de baixo ângulo com espaçamento entre os refletores menor que 0,3 m.</p>	<p>Limites de série sub-horizontais de estratos cruzados abaixo da resolução do levantamento.</p>
<p>2</p> 	<p>Refletores inclinados de baixo ângulo com grande amplitude e espaçamento entre os refletores próximo de 0,7m. Entre os refletores de grande amplitude ocorrem refletores de menor amplitude inclinados com ângulos mais altos para direção semelhante, com espaçamento de poucos decímetros.</p>	<p>Limites de séries inclinados separando conjuntos de estratos cruzados tabulares. Os limites de séries são interpretados como resultado de cavalgamento entre dunas e os estratos cruzados tabulares internos representam as frentes de cada duna preservada. A inclinação dos limites de série na mesma direção dos estratos cruzados sugere migração de dunas na porção frontal de uma barra, com acréscimo para jusante.</p>



<p>3</p> 	<p>Refletores inclinados de baixo ângulo com grande amplitude e espaçamento próximo de 0,7 m. Entre os refletores de grande amplitude ocorrem refletores de menor amplitude, descontínuos e de forma de cônica para o topo, com continuidade lateral de até 4 m.</p>	<p>Limites de séries separando conjuntos de estratos cruzados acanalados. Os limites de séries são interpretados como resultado de cavalgamento entre dunas e os estratos cruzados acanalados internos representam as frentes de cada duna preservada. A inclinação dos limites de série na mesma direção dos estratos cruzados sugere migração de dunas.</p>
<p>4</p> 	<p>Refletores inclinados com alto ângulo e espaçamento decimétrico entre os refletores de maior amplitude. Os conjuntos de refletores inclinados apresentam mais de 1m de espessura. Localmente ocorrem refletores menores, descontínuos, e com terminação em <i>onlap</i> sobre os mais contínuos.</p>	<p>Os refletores inclinados são interpretados como resultado de estratos cruzados de grande porte. O alto ângulo e a espessura dos conjuntos de estratos cruzados (mais de 1 m) são compatíveis com fácies de avalanche em barras unitárias. Pequenas variações na direção ou inclinação das frentes das barras estão associadas a superfícies de reativação, que aparecem como refletores com terminações internas ao conjunto de refletores inclinados.</p>

<p>5</p> 	<p>Refletores em forma levemente ondulada ou côncava para o topo com continuidade lateral maior que 4 m e sendo recobertos por refletores horizontais com terminações em <i>onlap</i>.</p>	<p>Estruturas de corte e preenchimento com forma canalizada e preenchimento interno plano-paralelo ou com séries de cruzadas menores que a resolução do método. São interpretados como pequenos canais abandonados, preenchidos por areia ou pelitos em contexto de topos de barras fluviais.</p>
<p>6</p> 	<p>Refletores bem marcados sub-horizontais ou pouco ondulados contínuos. O espaçamento entre cada refletor é próximo de 0,3 m. Dentro dos refletores de maior amplitude há refletores de forma côncava para o topo, menores que 2 m com amplitude muito baixa.</p>	<p>Limite de série sub-horizontal. É interpretado com uma barra. Ela possui crista levemente sinuosa, em corte ortogonal à direção de migração. Os limites de séries são interpretados como resultado de cavalgamento entre dunas e os estratos cruzados acanalados internos representam as frentes de cada duna preservada.</p>



<p>7</p> 	<p>Refletores bem marcados plano-paralelos. O espaçamento entre cada refletor é próximo de 0,4 m. Dentro deles há refletores de menor amplitude inclinados mergulhando para direita com espaçamento entre eles de decimétricos.</p>	<p>Limite de série plano-paralelo e estratos internos cruzados tabulares. Os limites de séries são interpretados como dunas cavalgantes em corte ortogonal à direção de migração e os estratos cruzados tabulares representam as frentes de cada duna preservada.</p>
<p>8</p> 	<p>Refletores com grande amplitude, inclinados mergulhando em alto ângulo. O espaçamento entre os refletores são próximos de 0,5 m. Refletores sub-horizontais com terminações <i>onlap</i> e espaçamento entre eles decimétricos.</p>	<p>Estratos cruzados de grande porte formados por dunas eólicas. Os estratos sub-horizontais associam-se aos arenitos com laminação plano-paralela, e com terminações <i>onlap</i> sobre os refletores que truncam os estratos cruzados sugerem superfícies inferiores erosivas para sucessões de interdunas.</p>

### 5.1.1 Comparação das seções GPR com afloramentos

Nesta subseção serão comparados resultados das seções GPR e estruturas sedimentares vistas em afloramentos. As descrições serão feitas através dos pontos dos afloramentos já interpretados anteriormente.

Ponto 1: A seção de GPR foi adquirida em arenitos do topo do Membro Banzaê da Formação Marizal na localidade de Raso, Sub-bacia do Tucano Sul, que foi interpretado como depósitos costeiros dominados por ondas por Freitas (2014). O afloramento adjacente, imediatamente abaixo do levantamento e equivalente aos dois metros superiores da seção de GPR revela arenitos finos com marcas onduladas simétricas e laminação cruzada, arenitos finos com laminação plano-paralela e cruzadas de baixo ângulo (Figura 22). A geometria desses depósitos em escala métrica é de difícil observação no afloramento. Estas cruzadas de baixo ângulo aparecem como refletores ondulados com truncamentos de baixo ângulo na seção de GPR. Feições menores, como marcas onduladas e laminações cruzadas, estão abaixo da resolução do levantamento GPR.

Ponto 3: A seção de GPR foi adquirida em arenitos e arenitos conglomeráticos da Formação São Sebastião próximo a Jeremoabo (BA), os quais foram interpretados como barras fluviais por Figueiredo (2013). O levantamento foi realizado paralelamente ao afloramento detalhado na Figura 23 a uma distância cerca de 15 metros (do outro lado da estrada). O afloramento apresenta séries de estratificações cruzadas e tabulares de 20 cm a 35 cm de espessura separadas por limites suavemente inclinados. Alguns desses limites podem ser observados como refletores na seção de GPR, ainda que seu espaçamento seja maior. Isso provavelmente resulta da baixa resolução do levantamento, sendo que muitos limites de séries não foram detectados, e estratificação cruzada interna a eles não foi imageada. Em afloramento, frequentemente notam-se concentrados de areia grossa e grânulos nas porções inferiores das séries de estratos cruzados, organizados paralelamente aos limites de séries inferiores. Provavelmente a maior permeabilidade desses níveis permitiu o imageamento de refletores paralelos aos limites de série, enquanto o contraste mais discreto de granulação nos estratos cruzados e a menor dimensão dessas estruturas não permitiu seu imageamento. Truncamentos entre refletores e terminações em *onlap*

contra refletores côncavos para o topo, com comprimento métrico, foram interpretados como preenchimento de feições canalizadas, compatíveis com o observado no afloramento, que apresenta canais preenchidos por arenitos finos laminados e arenitos finos com estratificação cruzada acanalada em séries decimétricas.

Ponto 4: A seção de GPR foi adquirida em arenitos médios a grossos da Formação São Sebastião próximo à localidade de Brancos, às margens do Rio Vaza-Barris no município de Jeremoabo (BA), interpretados como barras fluviais por Figueiredo (2013). As diferentes seções levantadas apenas se diferenciam pelo ângulo aparente das estruturas sedimentares encontradas, em decorrência de variações na direção de levantamento. O afloramento apresenta arenitos médios com raros grânulos esparsos, organizados em séries de 15 a 35 cm de cruzadas acanaladas com limites de séries, com orientação  $160^{\circ}/20^{\circ}$ . Adjacente aos estratos anteriores afloram arenitos grossos a médios, com grânulos pequenos, seixos esparsos e forte segregação granulométrica, com níveis grossos maciços de até 2 cm em meio aos arenitos médios. Os limites de séries têm pelo menos 2 m de espessura com estratificações cruzadas tabulares marcada por forte segregação granulométrica, ela é ortogonal ao levantamento e com orientação de  $160^{\circ}/32^{\circ}$ . Há presença de séries de grande porte, tabulares com segregação de arenito muito grosso rico em pequenos seixos nos estratos cruzados com orientação de  $140^{\circ}/20^{\circ}$ . E no final do afloramento iniciaram-se arenitos muito grossos com segregação e espessura de série de mais de 1,5 m. Essa variação entre limites de séries inclinados com estratificação cruzada acanalada e estratificação cruzada tabular (Figura 24), assim como alguns dos estratos cruzados maiores de alto ângulo interpretado como estrato de grande porte (Figura 25) foi imageada na seção de GPR. Interessante frisar que radar fácies 1 e 7 só foram vistas nas seções GPR, esse tipo de estrutura não aflorou.

Ponto 5: A seção de GPR foi adquirida em arenitos finos com cimentação por óxido de ferro e estratos cruzados de grande porte da Formação São Sebastião próximo a Canudos (BA), na área de proteção ambiental da Toca Velhas das Araras, foram interpretados como depósitos de campo de dunas eólicas por Figueiredo (2013). Na área do levantamento afloram arenitos finos bem selecionados com estratos cruzados de grande porte (de 2 a 6 m), predominantemente tabulares, contendo superfícies de reativação com modificação do ângulo ou direção dos estratos cruzados. A estratificação

é marcada por níveis milimétricos a centimétricos de arenitos mais finos e mais grossos. Ocorrem também arenitos finos com laminação plano-paralela, interpretados como depósitos de interdunas. Na seção de GPR (Figura 26), a estratificação cruzada de grande porte com superfícies internas de reativação é claramente visível. A maior penetração do sinal obtida nesta seção permitiu o reconhecimento de estratos cruzados de até 5 m de espessura. Refletores sub-horizontais associam-se aos arenitos com laminação plano-paralela, e suas terminações em *onlap* sobre refletores que truncam os estratos cruzados sugerem superfícies inferiores erosivas para as sucessões de interdunas.

Ponto 6: A seção de GPR foi adquirida em arenitos médios a grossos da Formação São Sebastião, município de Canudos (BA), às margens do Rio Vaza-Barris, interpretados como depósitos de barras fluviais por Figueiredo (2013). O afloramento logo abaixo do levantamento revela arenitos médios a grossos com séries de até 20 cm de estratificação cruzada tabular separadas por limites inclinados. Uma superfície lateralmente contínua, posicionada a menos de 1 m abaixo do topo da seção, separa um conjunto de séries inclinadas a ângulos mais altos de outro com limites de série de baixo ângulo. Na seção de GPR (Figura 27), essa superfície é claramente representada por um refletor contínuo suavemente côncavo para o topo, sobre o qual os refletores superiores terminam em *onlap*. A maior parte dos refletores representa limites de séries, porém, alguns refletores de menor amplitude associados a estratos cruzados internos podem ser reconhecidos, revelando que os estratos cruzados internos encontram-se próximos ao limite de detecção do levantamento.

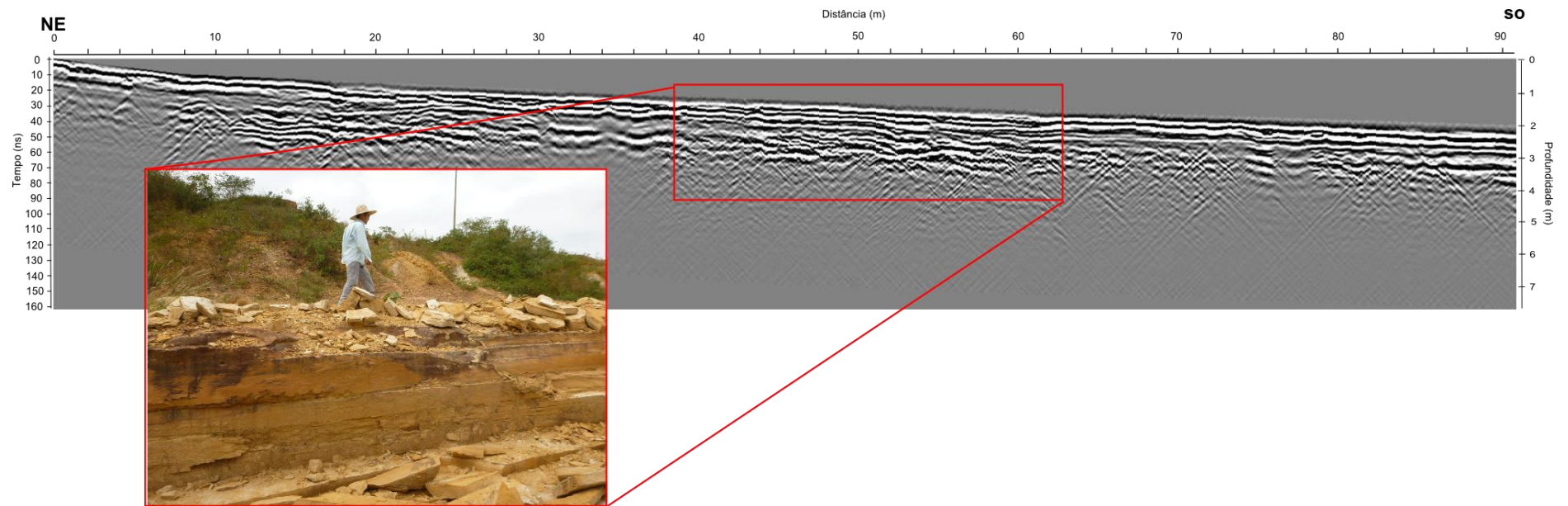


Figura 22- Seção GPR do Ponto 1 com uma foto do afloramento mostrando cruzadas de baixo ângulo que aparecem como refletores ondulados com truncamentos de baixo ângulo na seção de GPR. Feições menores, como marcas onduladas e laminações cruzadas, estão abaixo da resolução do levantamento.



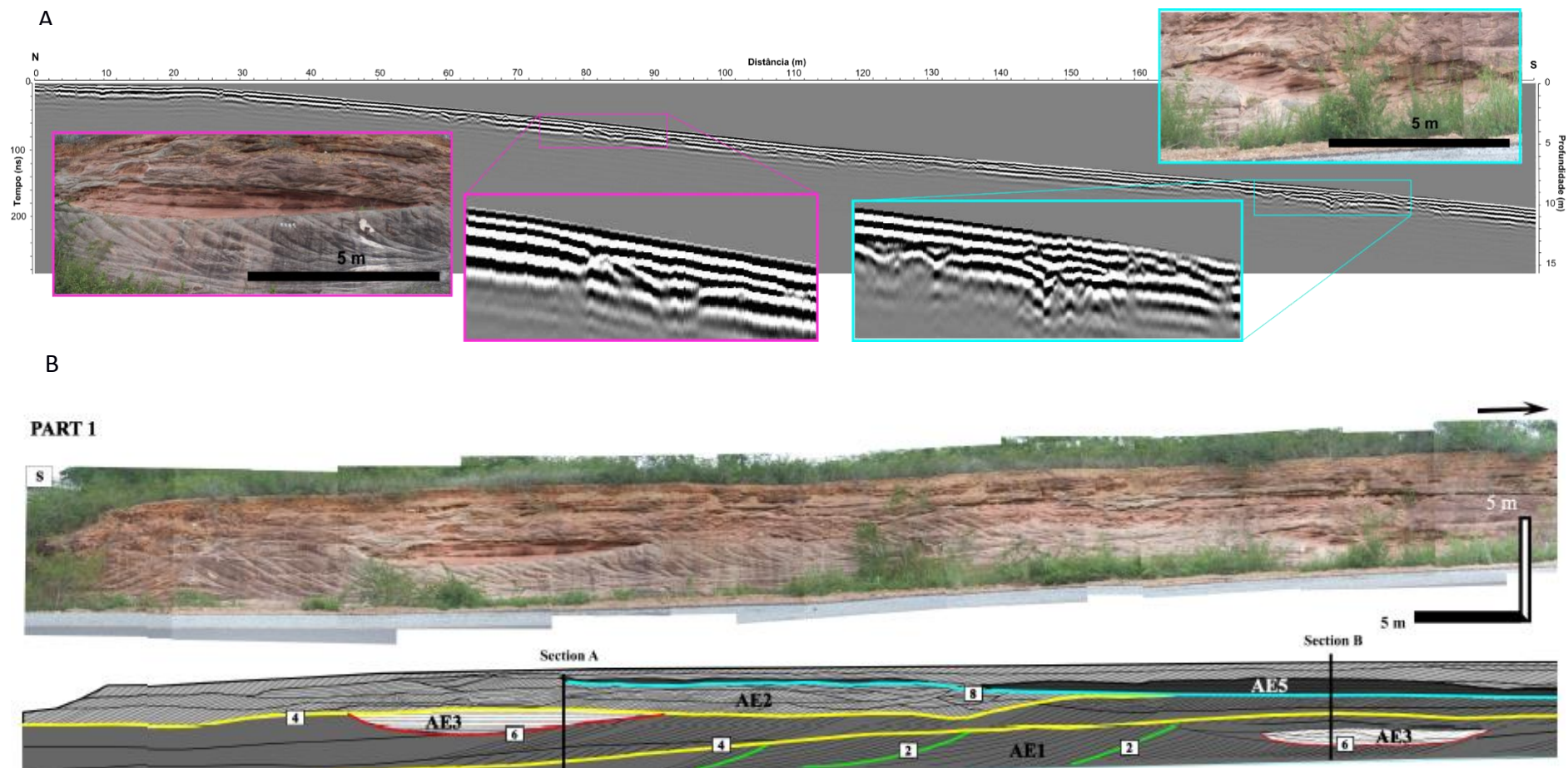


Figura 23- A) Seção GPR do Ponto 2 com a ampliação de dois canais principais e a foto de cada um desses canais ao lado, mostrando o truncamentos entre refletos e terminações em onlap contra refletos côncavos para o topo com comprimento métrico, foram interpretados como preenchimento de feições canalizadas, compatíveis com o observado no afloramento, que apresenta canais preenchidos por arenitos finos laminados e arenitos finos com estratificação cruzada acanalada em séries decimétricas. B) Parte do afloramento descrito por Figueiredo (2013) mostrando a localização de ambos os canais no afloramento.

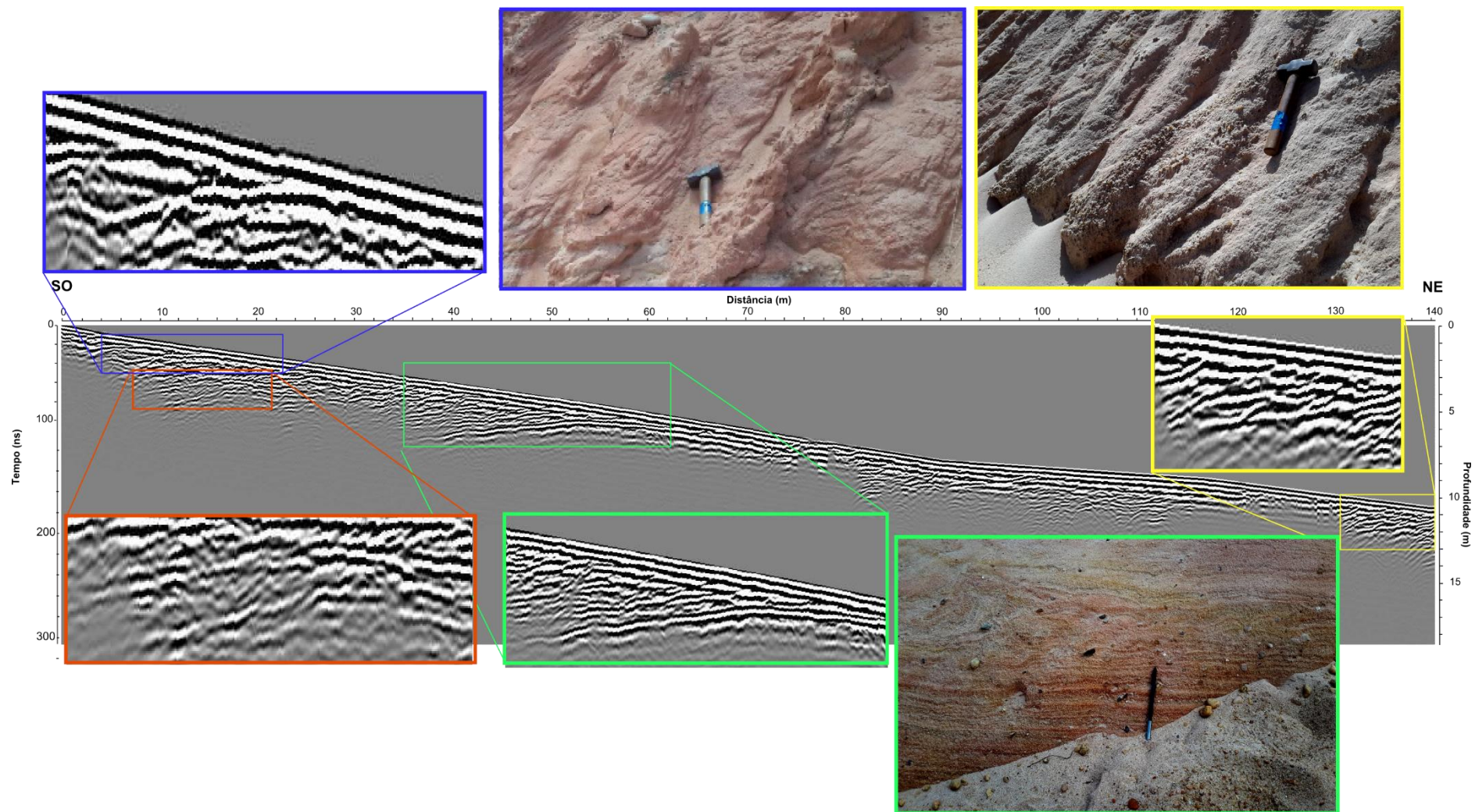


Figura 24- O levantamento GPR no Ponto 4 na seção A. Foram encontradas basicamente quatro mudanças nos padrões dos refletores e as fotos de partes do aforamento ilustram essas mudanças nas estruturas sedimentares. Quadro azul- arenitos médios com raros grânulos esparsos,



organizados em séries de cruzadas acanaladas com limites de séries inclinados em direção ao levantamento da seção GPR. Quadro laranja-arenitos grossos a médios, com grânulos pequenos, seixos esparsos e forte segregação granulométrica, com níveis grossos maciços em meio aos arenitos médios. Os limites de séries tem pelo menos 2 m de espessura com cruzada tabular marcada por forte segregação granulométrica, mais ortogonal ao levantamento. Quadro verde- mesmas séries são de grande porte, tabulares com segregação de arenito muito grosso rico em pequenos seixos nos estratos cruzados. Quadro amarelo - arenitos muito grossos com segregação e espessura de série de mais de 1,5m.

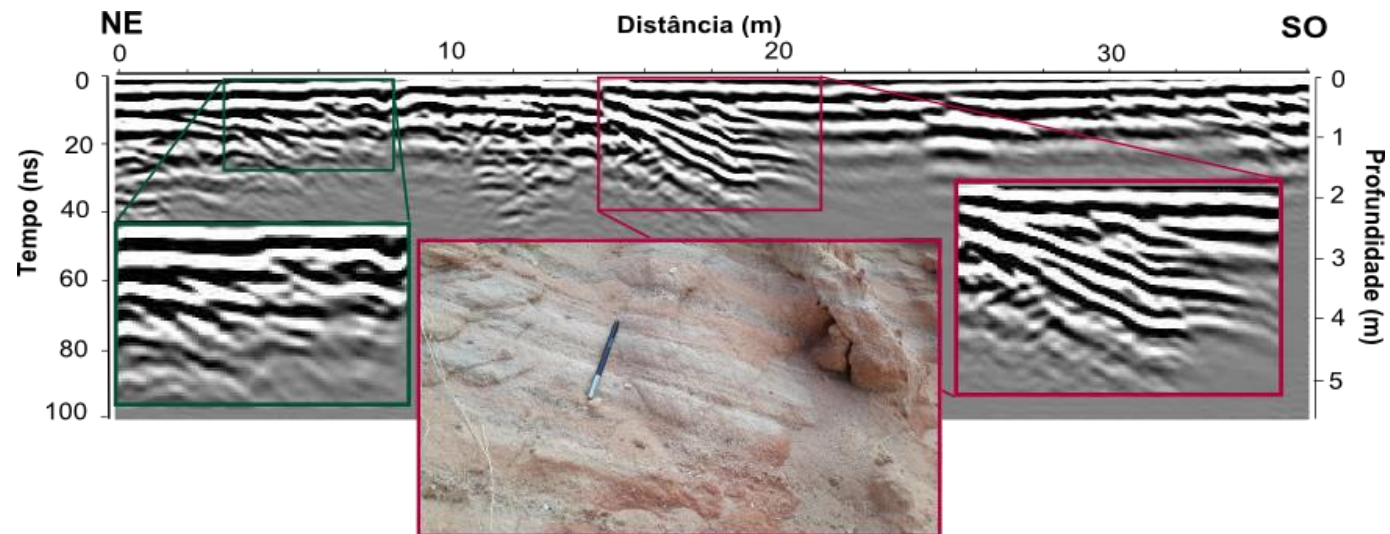


Figura 25- Levantamento da seção GPR no ponto 4 seção B. Foram encontrados refletores plano-paralelos e dentro deles refletores de menor amplitude inclinados, interpretados com limites de séries plano-paralelo preenchidos por estratos cruzados tabulares, esse tipo de estrutura não aflorou. Mais a diante refletores inclinados em alto ângulo com espaçamento decimétrico foram interpretados como séries de grande porte, tabulares com segregação de arenito muito grosso rico em pequenos seixos nos estratos cruzados.



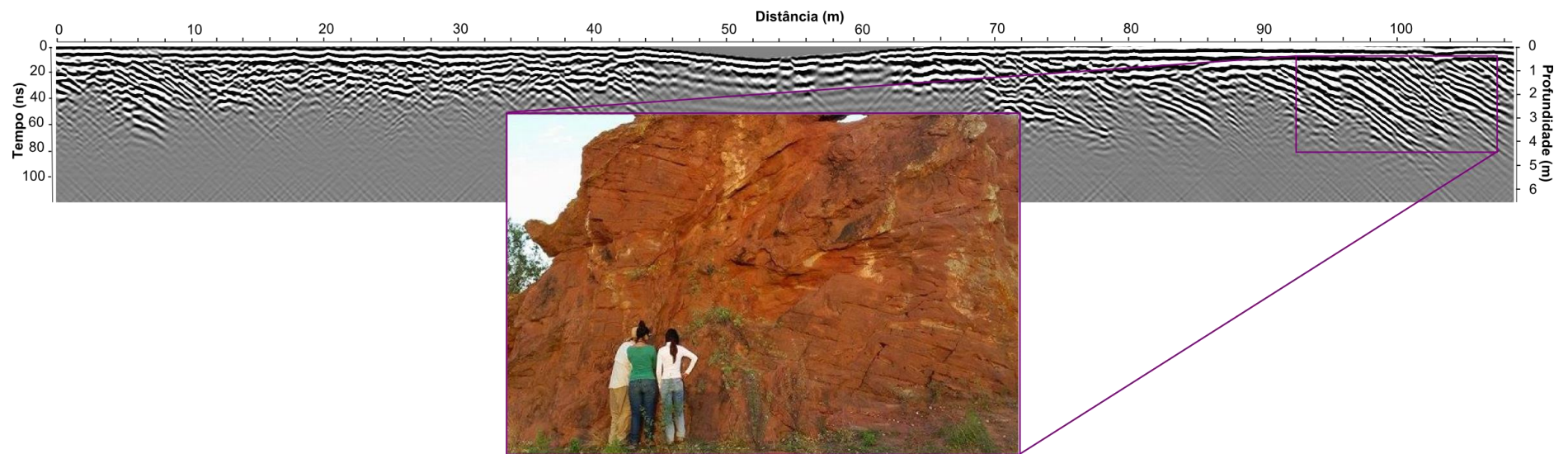


Figura 26- Na seção de GPR, a estratificação cruzada de grande porte com superfícies internas de reativação é claramente visível. A maior penetração do sinal obtida nesta seção permitiu o reconhecimento de estratos cruzados de até 5 m de espessura. Refletores sub-horizontais associam-se aos arenitos com laminação plano-paralela, e suas terminações em *onlap* sobre refletores que truncam os estratos cruzados sugerem superfícies inferiores erosivas para as sucessões de interdunas.

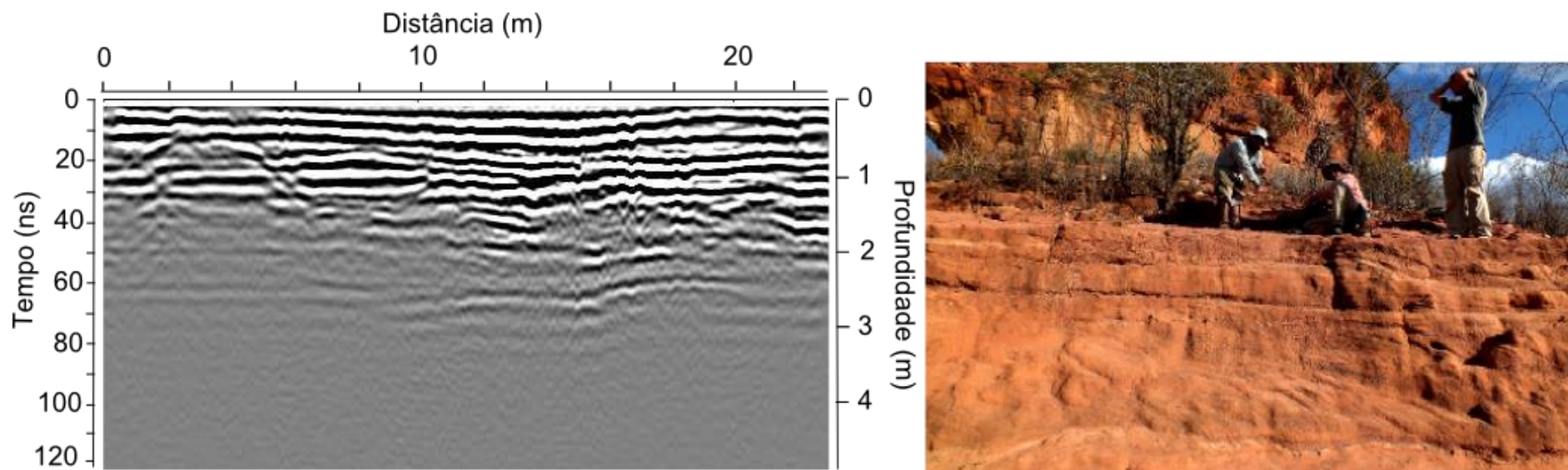


Figura 27- A seção GPR foi passada exatamente na superfície sobre a qual encontram-se as pessoas na Figura da direita. O afloramento logo abaixo do levantamento revela arenitos médios a grossos com séries de estratificação cruzada tabular separadas por limites inclinados. Uma superfície lateralmente contínua, posicionada menos de 1 m abaixo do topo da seção, separa um conjunto de séries inclinadas a ângulos mais altos de outro com limites de série de baixo ângulo. Na seção de GPR essa superfície é claramente representada por um refletor contínuo suavemente côncavo para o topo, sobre o qual os refletores superiores terminam em *onlap*. A maior parte dos refletores representa limites de séries e alguns refletores de menor amplitude associados a estratos cruzados internos podem ser reconhecidos.

## **5.2 Levantamentos de resistividade elétrica**

Nesta seção são apresentados os resultados dos levantamentos de resistividade elétrica. Foram realizados dois levantamentos ER em áreas que já eram previamente descritos maiores conteúdos de argila nas sucessões investigadas, as localizações específicas do levantamento está representando na Figura 14.

### **Formação Marizal na localidade de Raso, Sub-bacia do Tucano Sul.**

O primeiro levantamento no Ponto 2 foi realizado em uma estrada local não pavimentada, próximo à BA 403, na localidade de Raso, próximo a Sátiro Dias (BA), em sucessão da Fm. Marizal. Como pode ser visto na Figura 28, na parte mais rasa do levantamento ocorreu uma camada delgada com dimensões de aproximadamente 2 m de espessura por 70 m de comprimento sendo mais resistiva ( $25 \Omega\text{m} - 38\Omega\text{m}$ ), sugerindo a presença de arenitos nesta camada, visto que algumas partes destes arenitos afloram. Logo abaixo e ao lado dessa camada de arenito, nota-se uma longa camada praticamente contínua e mais condutiva ( $4\Omega\text{m} - 11 \Omega\text{m}$ ) indicando uma camada pelítica. Observou-se que essa camada pelítica foi cortada por uma anomalia mais resistiva ( $40 \Omega\text{m}$ ) no meio da seção, em torno de 60m e espalhou-se mais em profundidade indicando uma diferença litológica que não pôde ser correlacionada com feições aflorantes.

### **Formação São Sebastião próximo a Jeremoabo (BA), Sub-bacia do Tucano Central.**

Na seção da Figura 29 o levantamento foi realizado no Ponto 3, em um afloramento da Fm. São Sebastião onde ocorrem níveis pelíticos mais delgados. O afloramento apresentou suave mergulho para S. Notou-se que entre no início da seção até 40 m de distância e em profundidade próximo à 4 m há uma anomalia mais condutiva ( $15 \Omega\text{m} - 30 \Omega\text{m}$ ), sugerindo a presença de uma camada pelítica. Com o aumento de profundidade houve uma sutil anomalia de forma geométrica arredondada mais resistiva ( $60 \Omega\text{m}$ ) entre 20 m e 30 m de distância próxima de 6,5 m profundidade, isso sugere a influência do pequeno canal arenoso. No meio da seção entre 45 m e 70 m de distância há uma grande anomalia resistiva ( $118 \Omega\text{m} - 240 \Omega\text{m}$ ), isso indica uma camada mais espessa de arenitos limpos mais ao topo da seção. Essa mesma anomalia continua em profundidade e não pode ser correlacionada com feições aflorantes. Entre

73 m e 90 m mais superficialmente a condutividade aumentou, sugerindo há presença de um material mais pelítico e abaixo dela duas anomalias mais resistivas, uma mais superficialmente e com menor tamanho e resistividade (60  $\Omega$ m- 120  $\Omega$ m) e outra em maior em tamanho e resistividade (60  $\Omega$ m- 240  $\Omega$ m), o aumento da resistividade sugeriu a presença de arenitos arcóseanos.

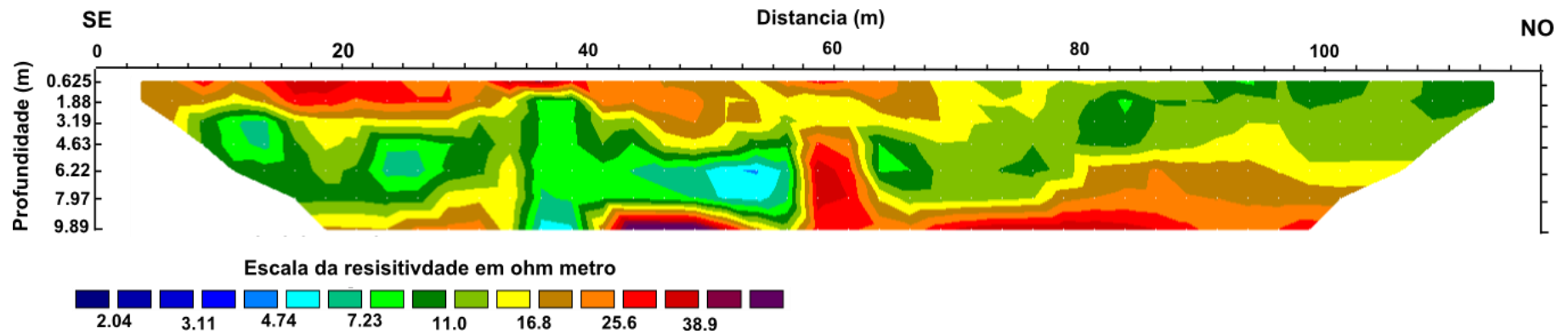


Figura 28- Seção modelada do Ponto 2. Parte mais rasa da seção é mais resistiva sugerindo presença de arenitos, em maior profundidade a condutividade aumenta interpretado como uma espessa camada pelítica e mais abaixo uma camada mais resistiva indicando novamente uma mudança litológica.

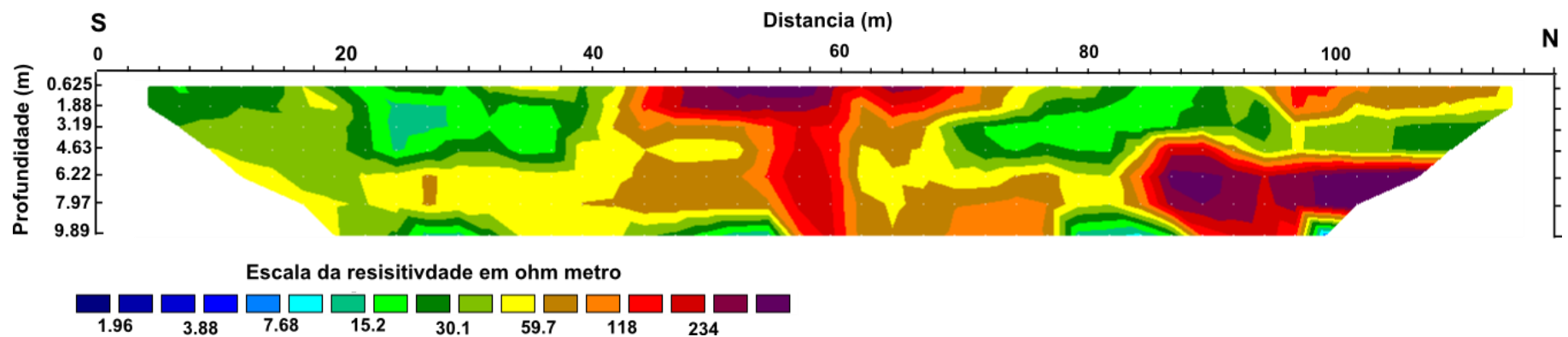


Figura 29- Seção modelada do Ponto 3. Nota-se que no início há presença de uma camada pelítica. No meio da seção há uma grande anomalia resistiva, indicando a presença de arenitos limpos mais ao topo da seção. No final da seção mais superficialmente a condutividade aumenta sugerindo um material mais pelítico. E abaixo há duas anomalias mais resistivas que significa a presença de arenitos arcóseanos.

### **5.2.1 Comparação com fácies sedimentares e geometrias em escala de afloramento**

Nesta subseção os dois pontos onde foram feitos os levantamentos ER serão comparados com fácies sedimentares e geometrias do afloramento.

Ponto 2: As exposições de rocha na área do primeiro levantamento de ER apresentam três fácies sedimentares superficiais: arenitos finos micáceos e siltosos com laminação cruzada cavalgante, por vezes preservando marcas onduladas (Figura 30, foto central), arenitos finos com laminação plano-paralela (Figura 30, foto à direita), arenitos finos a médios com estratificação cruzada acanalada (Figura 30 foto à esquerda). A geometria dessas fácies é tabular, em camadas horizontais lateralmente contínuas por dezenas de metros. Apenas pouco mais de dois metros da seção afloram, nos quais a litologia da camada mais condutiva reconhecida no levantamento não pode ser observada. O levantamento foi realizado no topo da seção predominantemente arenosa do Membro Banzaê da Fm. Marizal (Freitas 2014), no contato com as fácies pelíticas da Camada Fossilífera Amargosa. O levantamento revela que provavelmente um nível contendo argilominerais ocorre também abaixo do contato nesta localidade. A descrição de barras em pontal na mesma posição estratigráfica em afloramento a poucos quilômetros de distância por Freitas (2014) sugere que a camada mais condutiva aqui reconhecida pode estar relacionada a fácies de decantação em um sistema fluvial meandrante no topo do Membro Banzaê.

Ponto 3: As principais fácies sedimentares encontradas no afloramento são arenitos grossos com estratificação cruzada acanalada e seixos esparsos, arenitos finos a médios com estratificação cruzada acanalada, arenitos finos com laminação plano paralela e arenitos muito finos siltosos e micáceos, com delgadas intercalações de siltitos. Feições canalizadas com menos de 1,5 m de profundidade e até 10 m e extensão no afloramento ocorrem na parte sul da seção.

O mergulho suave das camadas para sul (direita na Figura 31) permitiu o reconhecimento das litologias investigadas em subsuperfície. O padrão de variação de camadas mais e menos resistivas no levantamento ER coincide com a intercalação métrica entre sucessões de arenitos conglomeráticos e arenitos finos siltosos com níveis pelíticos descritas por Figueiredo (2013).

Ao analisar a Figura 31, entretanto, nota-se que o afloramento é bem heterogêneo e complexo, com feições canalizadas preenchidas por arenitos finos, e intercalações de arenitos e pelitos em alguns níveis. A seção ER possui uma mudança de padrão constantemente, porém muitas estruturas descritas por Figueiredo (2013) não foram possíveis de identificar com o método ER devido ao tamanho de resolução imposto no levantamento. Como dito na metodologia foi utilizado uma distância de 2,5 m entre os eletrodos, por isso só é possível identificar estruturas sedimentares métricas.



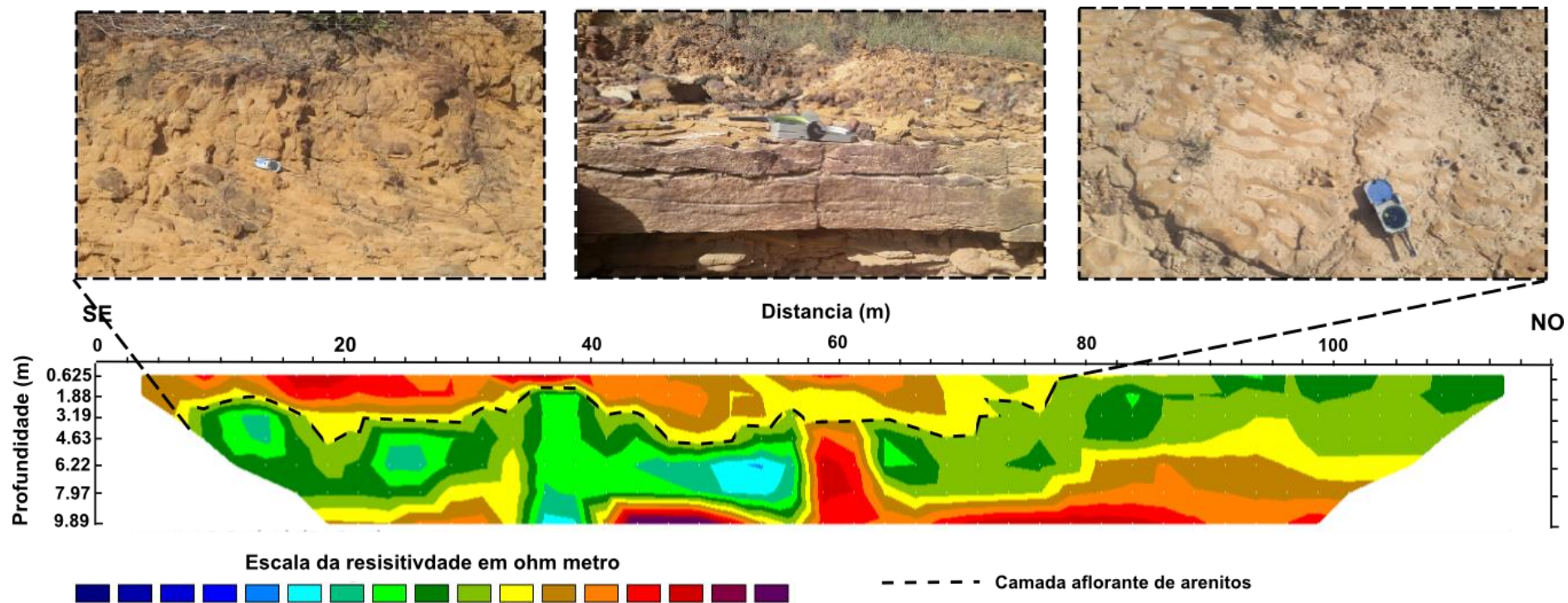


Figura 30- Seção do levantamento ER no Ponto 2 com fotos de cada tipo de rocha sedimentar apenas da parte mais resistiva do topo (arenitos finos micáceos e silteosos com laminação cruzada cavalgante, por vezes preservando marcas onduladas (foto central), arenitos finos com laminação plano-paralela (foto à direita), arenitos finos a médios com estratificação cruzada acanalada (foto à esquerda). Em maior profundidade há exemplos de estruturas sedimentares não aflorantes.



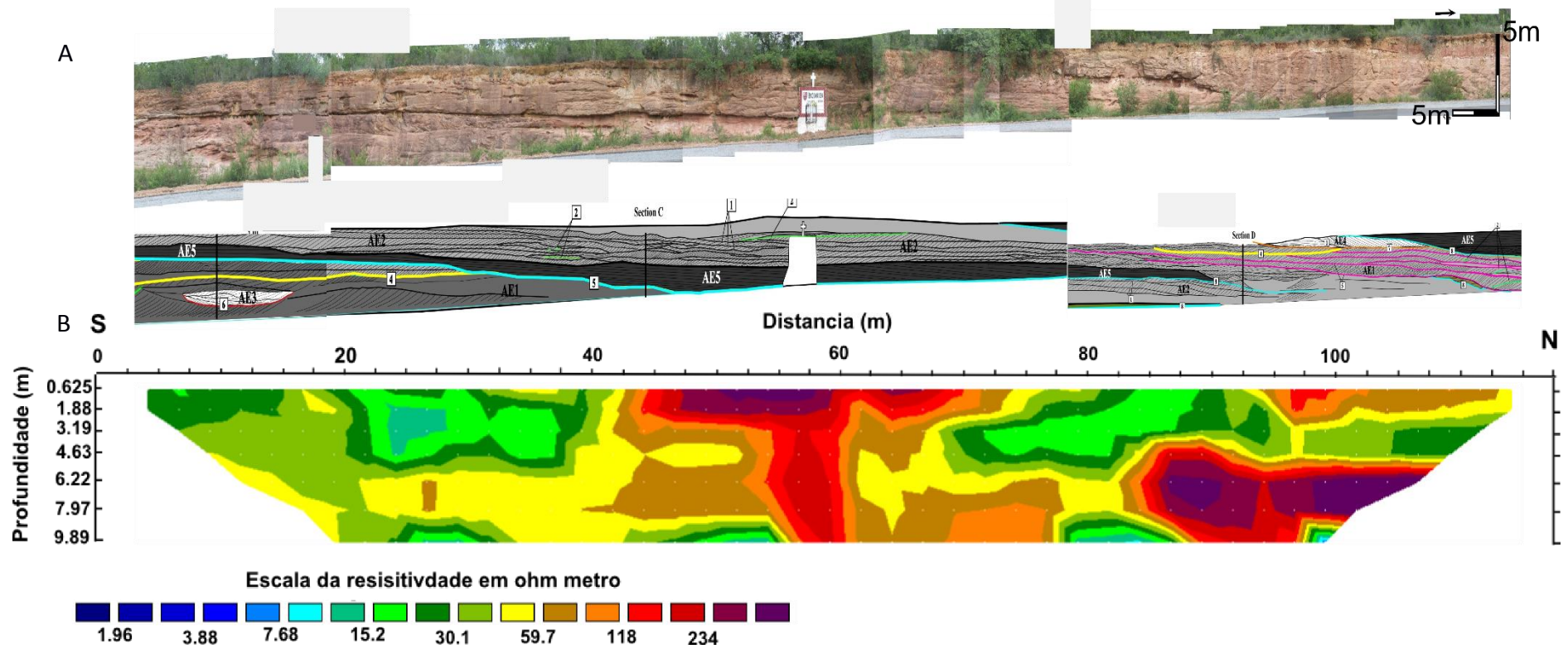


Figura 31- A) Parte da foto do afloramento do Ponto 3 adaptado de Figueiredo et al.,2013. B) Seção modelada do levantamento ER. O padrão de variação de camadas mais e menos resistentes no levantamento ER coincide em alguns locais com a intercalação métrica entre sucessões de arenitos conglomeráticos e arenitos finos siltosos com níveis pelíticos descritas por Figueiredo (2013).

## 6. DISCUSSÃO

O estudo das estruturas sedimentares por radar fácies em afloramentos nas Formações São Sebastião e Marizal na Bacia do Tucano apresentaram semelhanças com os resultados de trabalhos em rios ativos. De fato, as principais radar fácies encontradas nas sucessões estudadas da Bacia do Tucano são frequentemente descritas em sistemas fluviais ativos na literatura: limites de séries de dunas cavalgantes com estratos cruzados internos, tabulares ou acanalados, canais isolados e estratos frontais de alto ângulo de barras unitárias (e.g. Best *et al.*, 2003, Skelly *et al.*, 2003, Wooldridge & Hickin 2005 e Smith *et al.*, 2006 e 2009). A principal diferença no estudo de afloramentos refere-se à profundidade de penetração do sinal. Assim, dos autores citados acima Smith *et al.* (2006) foram os que obtiveram menor penetração em subsuperfície chegando a apenas 6 m no rio Saskatchewan, utilizando uma antena de 200 MHz. Enquanto Best *et al.* (2003) com o uso da antena de 100 MHz no rio Jamuna chegaram a profundidade de até 15 m. No presente trabalho, em sucessões fluviais semelhantes, porém litificadas, chegou-se a apenas 4,5 m com uso das antenas de 100 MHz. Em sucessões eólicas litificadas, a penetração foi maior. Porém ao comparar com o trabalho de Tatum & Francke (2012) o sinal chegou a penetrar até 40 m com antena de baixa frequência de 30 MHz, em sistemas eólicos ativos. Isso significa que ambientes em que os sedimentos são inconsolidados o sinal consegue atingir maiores profundidades do que em rochas sedimentares. Isso sugere que processos diagenéticos podem influenciar na atenuação de sinal nas rochas sedimentares. O que se sabe na literatura (Daniels, 2004) é que a influência da argilosidade prejudica a propriedade física envolvida, que no caso é a permissividade dielétrica, e que alguns processos diagenéticos podem formar argilominerais no espaço poroso ou alterar feldspatos detríticos para argilominerais. De fato, as sucessões investigadas apresentam feldspatos detríticos, e o grau de alteração das rochas investigadas é variável.

Um fator relevante no presente trabalho foi a boa resolução de algumas seções do presente trabalho. Determinaram-se estruturas de tamanho de até 0,4 m, como no caso dos estratos internos cruzados. No caso de Best *et al.* (2003) e Smith *et al.* (2009),

que utilizaram antenas de mesma frequência, a espessura das menores estruturas sedimentares imageadas passaram de 1 m.

Ao comparar as variadas condições de aquisição dos resultados obtidos no presente trabalho pode-se chegar a algumas suposições sobre os fatores que controlam a penetração e a resolução dos levantamentos.

Quando o levantamento GPR foi feito em estradas de terra o sinal penetrou menos e obteve-se menor resolução de imagem, enquanto nas seções feitas diretamente na rocha, notou-se uma maior penetração e melhor resolução, mas devido a irregularidades da superfície rochosa, em alguns locais houve menor penetração ou perda total do sinal.

Ao comparar as seções de ambiente fluvial e ambiente eólico notou-se que houve uma maior penetração, mesmo que sutil, em ambiente eólico. Em ambiente fluvial há uma maior heterogeneidade de sedimentos, com alternância frequente de camadas arenosas e pelíticas, e isso fez com que houvesse menor penetração do sinal devido a argiloidade. Já em ambiente eólico os sedimentos são mais bem selecionados com pouca presença de argila e feldspatos detríticos.

Outra comparação que pode ser feita é entre as próprias Formações Marizal e São Sebastião. Apenas em uma seção da Fm. Marizal pôde ser descritas estruturas sedimentares, nas demais seções não foi possível determinar as estruturas sedimentares vista em afloramentos, ou pela pouca penetração do sinal ou devido à falta de resolução para as estruturas dos afloramentos. Enquanto na Fm. São Sebastião foi possível determinar estruturas sedimentares em todas as seções nas quais foram realizados os levantamentos GPR. Segundo Figueiredo (2013), Freitas (2014) e Figueiredo *et al.* (2015), a Formação Marizal tende a ser mais feldpática que a Formação São Sebastião, apresentando também fragmentos líticos imaturos em suas fácies conglomeráticas. Assim, provavelmente o grau de alteração das sucessões investigadas, próximas à superfície, deve resultar em argila neo-formada por intemperismo na Formação Marizal. De fato, a única seção em que estruturas puderam ser imageadas na Formação Marizal refere-se à rara sucessão interpretada como depósito de ambiente costeiro (Freitas, 2014), com maior maturidade mineralógica que as sucessões fluviais dominantes.

Através dos resultados obtidos, verificou-se que não houve muita penetração do sinal chegando a no máximo 5 m profundidade e a pouca penetração depende de diversos fatores litológicos e ambientais. Porém, foi possível determinar algumas estruturas sedimentares rasas com uma alta resolução do sinal, podendo definir estruturas de até 0,4 m, raramente encontrados em seções GPR.

Ao comparar as seções do método GPR com as seções do método ER observou-se que realmente a presença da argilosidade influencia negativamente nos resultados do GPR. Como visto, foram feitos dois levantamentos ER um no Ponto 2 e outro no Ponto 3. No Ponto 2 representando pela Figura 28, o levantamento GPR foi feito no início da seção, onde havia a presença da camada de arenito. Porém, essa camada era muito delgada, com cerca de 2 m de espessura e abaixo dela havia uma espessa camada condutiva. Além disso, os levantamentos foram realizados na estrada, o que dificultaria ainda mais a penetração do sinal eletromagnético. Na seção GPR nesse ponto não houve penetração de sinal ou resolução insuficiente para encontrar estruturas sedimentares. Uma das causas poderia ser a espessa camada condutiva abaixo dos 2 m de arenitos.

No caso do Ponto 3, ambas as seções geofísicas deram resultados relevantes. Isso porque como observado nas figuras 23 e 29 os perfis GPR e ER não foram passados exatamente no mesmo ponto. A seção GPR foi feita do outro lado do afloramento em uma estrada de terra, na parte mais arenosa do afloramento, enquanto o ER foi feito exatamente no afloramento descrito por Figueiredo (2013) na parte em que ocorre uma fina e extensa camada pelítica. Por isso, nesse caso ambas as seções obtiveram resultados consideráveis. Ou seja, em locais onde há uma camada condutiva (sugerindo uma camada argilosa) onde ocorre uma grande limitação do uso do GPR, uma solução para esse tipo superfícies seria o método que ER que consegue distinguir bem o contraste das camadas arenosas das pelíticas e também mostra algumas geometrias sedimentares dependendo do tamanho da resolução imposta pelo método.

A umidade é outro fator relevante. Durante a primeira campanha no levantamento GPR choveu durante grande parte das atividades de campo. Nos dias chuvosos não houve penetração de sinal. Os dados que puderam ser interpretados foram apenas os obtidos em dias posteriores aos de chuva (Figuras 20 e 21). Como já dito antes, notou-se que nos locais onde houve a saturação dos poros do sedimento, como vales ou baixadas, houve perda total de sinal (Figura 21).

## 7. CONCLUSÕES

Os afloramentos das Formações São Sebastião e Marizal da Bacia do Tucano foram amplamente estudados em relação à sedimentologia por meio de estudos de análises de fácies e arquitetura deposicional. Porém, o estudo arquitetural com métodos geofísicos ainda não haviam sido executados nessa área. Desta forma, a principal contribuição do presente trabalho foi aplicar métodos geofísicos em afloramentos bem expostos e comparar os resultados com estudos sedimentares feitos na área e outros trabalhos feitos em rios ativos.

Por meio de estudos dos perfis de GPR nas Sub-bacias do Tucano Sul e Central, nas Formações São Sebastião e Marizal foram encontrados oito radar fácies. As radar fácies 2 e 7, 3 e 6 possuem a mesma interpretação de ambiente deposicional, o que as definiram como radar fácies diferentes foi a mudança de inclinação dos refletores na seção GPR e isso dependeu da orientação que em que os levantamentos foram executados nos afloramentos.

1. Refletores levemente ondulados com truncamentos de baixo ângulo foram interpretados como limites de série sub-horizontais de estratos cruzados abaixo da resolução do levantamento.
2. Refletores de grande amplitude inclinados e dentro deles refletores de menor amplitude inclinados com ângulo mais alto. Foram interpretados como limites de séries inclinados separando conjuntos de estratos cruzados tabulares. A inclinação dos limites de série na mesma direção dos estratos cruzados sugere a migração de dunas na porção frontal de uma barra, com acréscimo para jusante.
3. Refletores inclinados com grande amplitude e dentro deles refletores de menor amplitude, descontínuos e de forma côncava para o topo foram interpretados como limites de séries separando conjuntos de estratos cruzados acanalados. A inclinação dos limites de séries na mesma direção dos estratos cruzados sugere migração de dunas.
4. Refletores inclinados com alto ângulo em séries com espessuras métricas e espaçamentos decimétricos entre os refletores de maior amplitude. Os refletores inclinados são interpretados como resultado de estratos cruzados de grande porte por migração de barras unitárias. O alto ângulo e a espessura dos conjuntos de

estratos cruzados (mais de 1 m) são compatíveis com faces de avalanche em barras unitárias.

5. Refletores com formas côncavas para o topo foram interpretados como estruturas de corte e preenchimento representando pequenos canais recobertos. E refletores horizontais com terminações em *onlap* dentro dos canais foram interpretados como séries plano-paralelos ou séries cruzadas menores que a resolução do método, compostos por areia ou pelitos em contexto de topos de barras fluviais.
6. Refletores sub-horizontais de grande amplitude e dentro deles refletores com formas côncavas para o topo com menor amplitude. Foram interpretados como limites de séries sub-horizontais separando conjuntos de estratos cruzados acanalados, em corte ortogonal à direção de migração.
7. Refletores bem marcados plano-paralelos e dentro deles refletores com menor amplitude foram interpretados como limites de séries plano-paralelos de dunas cavalgantes em corte ortogonal à direção de migração e estratos internos cruzados tabulares.
8. Refletores com grande amplitude, inclinados em alto ângulo e refletores sub-horizontais com terminações *onlap*. Foram interpretados como estratos cruzados de grande porte de dunas eólicas e os estratos sub-horizontais associam-se aos arenitos com laminação plano-paralela, as terminações em *onlap* sobre os refletores que truncam os estratos cruzados sugerem superfícies inferiores erosivas para sucessões de interdunas.

Ao comparar as seções de GPR com as estruturas sedimentares dos afloramentos conclui-se que houve compatibilidade entre os refletores encontrados nas seções GPR e as estruturas sedimentares observadas diretamente. Em alguns casos notam-se que a resolução do método foi eficaz para identificar estruturas decimétricas, dificilmente encontradas em trabalhos de radar fácies (e.g. Best *et al.*, 2003 e Smith *et al.*, 2009). Porém, as profundidades das seções não ultrapassaram de 5 m. Ou seja, com uma antena de 100 MHz foi possível identificar refletores em alta resolução, mas em subsuperfície rasa.

Os resultados dos perfis de ER também foram relevantes, visto que o método conseguiu identificar camadas com litologias e formas geométricas diferentes, sendo

eficaz principalmente para diferenciar as camadas arenosas das pelíticas. Isso foi muito importante pois pôde justificar porque em locais onde há camadas pelíticas (mais condutivas) as seções GPR não obtiveram bons resultados. Dessa maneira, conclui-se que o uso em conjunto do GPR com o ER é uma boa maneira de executar estudos arquiteturais na área de estudo, pois os métodos se complementam. O GPR conseguiu visualizar perfis em alta resolução, mas limitou-se pelo fato de não penetrar em camadas argilosas. Já o ER conseguiu distinguir diferentes tipos de litologia, identificando camadas mais condutivas (pelíticas) e isso auxiliou nos estudos de arquitetura deposicional.

Desta forma, os métodos geofísicos aplicados mostraram grande potencial para mais estudos futuros, devido aos resultados satisfatórios em comparação com os estudos arquiteturais já realizados na área da Sub- Bacia Tucano Sul e Central (Fm. São Sebastião e Marizal) e nos outros estudos de GPR e ER em sedimentos inconsolidados.

Como os resultados foram satisfatórios futuramente seria interessante uma investigação dos métodos em 3 D para conseguir determinar a continuidade dos corpos sedimentares onde não há mais a exposição lateral do afloramento e iniciar estudos arquiteturais desses afloramentos como análogos de reservatórios de hidrocarbonetos.

## 8. REFERÊNCIAS

- Annan A. P. 2001. Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Sensors & Software Inc, 192 p.
- Best J.L., Ashworth P. J., Bristow C. S., Roden J. 2003. Three-dimensional sedimentary architecture of large, mid-channel sand braid bar, Jamuna River, Bangladesh. *Jornal Sedimentary Research*, 73(4): 516-530.
- Baines D., Smith D.G., Froese D. G., Bouman P., Nimeck G. 2002. Electrical resistivity ground imaging (ERGI): a new tool for mapping the lithology and geometry of channel-belts and valley-fills. *Sedimentology*, 49: 411-449.
- Braga A. C. O. 2007. Métodos geoeletricos aplicados nos estudos de captação e contaminação das águas subterrâneas. Apostila de geofísica aplicada. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus Rio Claro, 79 p.
- Brazil J. 1947. Resume of geologic reconnaissance of Northe of Bahia sedimentar embayment, Northeast Bahia- and West edge of Sergipe, Salvador. *Relatório Petrobrás*, 281, 24 p.
- Carrera S. C. 2012. Análise de Proveniência e arquitetura deposicional da Formação Marizal, Aptiano, Bacia do Tucano-Central, BA. Monografia de Trabalho de Formatura (TF- 2012/43), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 52 p.
- Cassady N. J. 2010. Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids. In: Jol, H (eds). *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier B.V, p. 41-72.
- Cassady N. J. 2010. Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis. In: Jol, H (eds). *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier B.V, p. 141-172.
- Corbeanu R. M., Soegaard K., Szerbiak R. B., Thurmond J. B., McMechan G. A., Wang D., Snelgrove S., Forster C. B., Menitove A. 2001. Detailed internal architecture of a fluvial channel sandstone determined from outcrop, cores, and 3-D ground-penetrating radar: Example from the middle Cretaceous Ferron Sandstone, east-central Utah. *Boletim American Association of Petroleum Geologists*, 85(9):1583-1608.



- Costa I.P., Milhomem P. S., Bueno G.V., Silva H.S.R.L., Kosin M.D. 2007. Sub-bacia de Tucano Norte e Bacia de Jatobá. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 445-453.
- Daniels D. 2004. Properties of materials. In: Daniels D. (eds) *Ground Penetrating Radar*. 2 ed. Institution of Engineering and Technology, p. 73-246.
- Figueiredo F. T. 2013. Proveniência e arquitetura de depósitos fluviais das Sub-Bacias Tucano Central e Norte, Cretáceo (BA). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 193 p.
- Figueiredo F. T., Almeida R. P., Freitas B. T., Marconato A., Carrera S. C., Turra B. B. 2015. Tectonic activation, source área stratigraphy, and provenance changes in a rift basin: the early cretaceous tucano basin (NE- Brazil). *Basin Research*, doi 10.1111/bre.121115.
- Freitas B. T. 2014. A Formação Marizal (Aptiano) na Bacia do Tucano (BA): Contribuições à análise da arquitetura de depósitos fluviais e implicações paleobiogeográficas. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 175 p.
- Gallas J. D. F. 2000. Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral. *Hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus Rio Claro, 174 p.
- Gava A., Nascimento D.A., Vidal J.L.B. 1983. Geologia. In: *Levantamento de recursos naturais. Projeto RADAM Brasil: folha SC. 24/25*, p. 27-372.
- Gawthorpe R. L., Collier R. E., Alexandre J., Bridge J. S., Leeder M. R. 1993. Ground penetrating radar: application to sandbody geometry and heterogeneity studies. In: North C. P. & Prosser D. J. (eds). *Characterization of Fluvial and Aeolian Reservoirs*. Geological Society Special Publication 73: 421-432.
- Heinz J. & Aigner T. 2003. Three-dimensional GPR analysis of various Quaternary gravel-bed braided river deposits (southwestern Germany). In: Bristow, C. S.; Jol, H. M. (eds). *Ground Penetrating Radar in Sediments*. London: Geological Society Special Publications, p. 99-110.
- Jol H. M. & Bristow C. S. 2003. GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In: Bristow, C.S. & Jol, H.

- M. (eds.). Ground Penetrating Radar in Sediments. Geological Society Special Publications, p. 9-27.
- Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002. Geofísica de Exploração. Oficina de textos, 429 p.
- Keller G. V. 1987. Rock and mineral properties. Investigation in Geophysics. In: Nabighian, M. N. (eds.). Eletromagnetic methods in applied Geophysics. 3.ed., v.1.: Society of Exploration Geophysicists, p.13-51.
- Keller G. V & Frischknecht F. C. 1977. Electrical methods in geophysical prospecting. Oxford: Pergamon Press, 517 p.
- Magnavita L. P. 1996. Estruturas e Tectônica do Rift do Recôncavo-Tucano-Jatobá. In: Texto Explicativo para o Mapa Geológico do Estado da Bahia. Salvador: SGM, p. 239-259.
- Magnavita L. P., Destro N., Carvalho M.S.S., Milhomem, P. S., Souza-Lima, W. 2003. Bacias Sedimentares Brasileiras: Bacia Tucano. Fundação Paleontológica Phoenix. (Série Bacias Sedimentares, 53). Disponível em: <[http://www.phoenix.org.br/Phoenix52\\_Abr03.htm](http://www.phoenix.org.br/Phoenix52_Abr03.htm)>. Acesso em 16 out 2013.
- Neal A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth-Science Reviews, 66:261–330.
- Nussenzveig H. M. 1997. Curso de física básica 3, eletromagnetismo. São Paulo: Edgard Blüncher, p 323.
- Orellana E. 1972. Prospeccion geoeletrica en corriente continua. Madrid: Paraninfo, 523 p.
- Pellicer X. M & Gibson P. 2011. Electrical resistivity and ground penetrating radar for the characterization of the internal architecture of Quaternary sediments in the Midlands of Ireland. Journal Applied Geophysics, 75: 638-647.
- Porsani J. L. 2011. Método GPR: Aplicações. Escola de Verão de Geofísica Aplicada, Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, p 27.
- Rey J., Martínez J., Hidalgo M. C. 2013. Investigating fluvial features with electrical resistivity imaging and ground-penetrating radar: The Guadalquivir river terrace (Jaen, Southern Spain). Sedimentary Geology, 295: 27-37.
- Reynold J. M. 1997. Ground Penetrating Radar. In: Reynolds J. M. (eds). An introduction to applied and environmental geophysics. Chichester John Wiley, p: 682-745.

- Santos C. C., Reis C., Pereira A. J. 2010. Projeto Bacia do Tucano Central. Salvador: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 88 p.
- Saraiva F. A. 2010. Avaliação de métodos geofísicos no comportamento espacial de plumas de necrochorume. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 93 p.
- Silva A. J. P., Lopes, R. C., Vasconcelos A. M., Bahia A R. B. C. Bacias sedimentares paleozoicas e meso-cenozoicas interiores. 2003. In: Bizzi L. A., Schobbenhaus C., Vidotti R. M., Gonçalves J. H. (Eds.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: textos, mapas & SIG. Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, p. 55-85.
- Skelly R. S., Bristow C. S, Ethridge F. G. 2003. Architecture of channel-belt deposits in an aggrading shallow sandbed braided river: the lower Niobra Rives, northeast Nebraska. *Sedimentary Geology*, 158: 249-270.
- Smith G.H.S., Ashworth P. J., Best J. L., Woodward J., Simpson G.J. 2006. The sedimentology and alluvial architecture of sandy braided South Saskatchewan River, Canada. *Sedimentology*, 53: 413-434.
- Smith G. H. S., Ashworth P. J., Best J. L., Orfeo O., Parsons D. R. 2009. The sedimentary and alluvial architecture of large braid bar, Rio Paraná, Argentina. *Jornal Sedimentary Research*, 79: 629-642.
- Tatum, D. I. & Francke, J. 2012. Constructing hydrocarbon reservoir analogues of aeolian system using ground penetrating radar. *Jornal Applied Geophysics*, 81:21-28.
- Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E. 1990. Applied geophysics. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 770 p.
- Vandenbergh J. & van Overmeeren R.A. 1999. Grounding penetrating radar images of selected fluvial deposits in the Netherlands. *Sedimentary Geology*, 128:245-270.
- Viana C. F., Gama Junior E. G., Simões I. A., Moura J. A., Fonseca J. R., Alves R. J. 1971. Revisão estratigráfica da Bacia do Recôncavo/Tucano. *Boletim Técnico da Petrobras*, 14(3-4): 157-192.
- Wooldridge C. L & Hickin E. J. 2005. Radar architecture and evolution of channel bars in wandering gravel-bed rivers: Fraser and Squamish rivers, British Columbia, Canada. *Jornal Sedimentary Research* 75: 844-60.