



Arthur de Melo Said Fabião Moreira da Silva

**O USO DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) EM ESTUDO
DE AFLORAMENTO CARBONÁTICO DO MEMBRO CRATO DA
FORMAÇÃO SANTANA NA BACIA DO ARARIPE CEARÁ (CE)-
BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
(Bacharelado em Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2013



UFRJ

Arthur de Melo Said Fabião Moreira da Silva

O USO DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) EM ESTUDO DE AFLORAMENTO CARBONÁTICO DO MEMBRO CRATO DA FORMAÇÃO SANTANA NA BACIA DO ARARIPE CEARÁ (CE) - BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora:

Prof^a Dra. Gleide Alencar Dias do Nascimento

Rio de Janeiro

Agosto de 2013

SILVA, Arthur de Melo Said Fabião Moreira

O Uso do Radar de Penetração no Solo (GPR) em Estudo de Afloramento Carbonático do Membro Crato da Formação Santana na Bacia do Araripe Ceará (CE)-Brasil/ Arthur de Melo Said Fabião Morerira da Silva - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2013.

x, 39p. : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2013.

Orientadora: Prof^a Dra. Gleide Alencar Dias do Nascimento.

1. Geologia. 2. Instituto de Geociências – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Prof^a Dra. Gleide Alencar do Nascimento Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Título.

Arthur de Melo Said Fabião Moreira da Silva

O USO DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) EM ESTUDO DE AFLORAMENTO CARBONÁTICO DO MEMBRO CRATO DA FORMAÇÃO SANTANA NA BACIA DO ARARIPE CEARÁ (CE) - BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora:

Prof^a Dra. Gleide Alencar Dias do Nascimento

Aprovada em: 16.08.2013

Por:

Gleide Alencar Dias do Nascimento (UFRJ)

Ismar de Souza Carvalho (UFRJ)

Antônio Nuno de Castro Santa Rosa (UFRJ/UNB)

A minha empenhada família que se mostrou uma amável e brilhante torcedora de meu sucesso.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que me apoiaram e me fortaleceram para chegar neste momento.

À professora orientadora Gleide Dias, pela ajuda e colaboração, abrindo mão de muitos dias valiosos de seu requisitado calendário.

Ao professor Ismar Carvalho, que auxiliou-me com orientações e sugestões valiosas.

Ao professor Francisco Idalécio, responsável pelo Geopark de Araripe, cujo altruísmo surpreende qualquer cidadão moderno.

Agradeço o colega Maurícus Menezes pela grande ajuda na aquisição de campo.

Muito Obrigado!

RESUMO

SILVA, Arthur de Melo Said Fabião Moreira Silva. **O Uso do Radar de Penetração no Solo (GPR) em Estudo de Afloramento Carbonático do Membro Crato da Formação Santana na Bacia do Araripe Ceará (CE) - Brasil.** 2013. x, 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

O objetivo desse estudo foi a identificação de carbonatos através do método Radar de Penetração no Solo (GPR) em um afloramento com rochas de calcário laminado localizado na pedreira Mina Pedra Branca de Nova Olinda na estrada que une as cidades de Juazeiro do Norte e Nova Olinda, no Estado do Ceará, Brasil. O afloramento se encontra na Bacia do Araripe na Formação Santana, Membro Crato (singular pelo calcário laminado e seu conteúdoossilífero). Este possui aproximadamente 14 m de altura, composto do topo para a base de: solo, calcário laminado, marga com pequenos níveis de calcário laminado, calcário laminado com a parte superior intemperizado. O GPR é um método geofísico que utiliza ondas eletromagnéticas os quais se propagam em subsuperfície afim de imagear estruturas geológicas, litologia, compartimentação pedológicas, corpos e etc. Uma linha de aquisição de dados GPR com 67 m foi obtida acima do afloramento a 8 m do mesmo. O equipamento utilizado para a aquisição foi RAMAC/GPR da MALA GeoScience com antena biestática de 50 MHz, não blindada cujo o modo de aquisição dos dados foi *common-offset*. O espaçamento inicial das antenas foi de 2 metros e o espaçamento contínuo de 1 m. O processamento e interpretação dos dados foram realizados no programa de REFLEXW – Interpex, cujas etapas do processamento foram: ajuste do tempo zero, *dewow*, *remove background*, filtro passa-banda, ganho, migração 2d. A interpretação consistiu após o processamento dos dados, onde foi possível identificar 3 hipérbolas, uma no lado esquerdo da seção radargrama com velocidade de 0,22 m/ns, outra no centro da seção com velocidade de 0,14 m/ns e por fim uma do lado direito com velocidade de 0,13 m/ns. A hipérbole com alta velocidade é aferida a ruídos externos associado à propagação da onda em superfície, e as demais hipérbolas estão associadas a artefatos do meio geológico. Na seção radargrama foi possível identificar um refletor mais forte referente à interface do calcário laminado intemperizado com o calcário menos alterado a aproximadamente 6 m de profundidade, correspondente a uma velocidade de propagação da onda no meio de 0,07m/ns. Pode-se observar que o método GPR fornece uma boa resposta para sua utilização em carbonatos.

Palavras-chave: GPR, Carbonato; Membro Crato

Abstract

SILVA, Arthur de Melo Said Fabião Moreira. **O Uso do Radar de Penetração no Solo (GPR) em Estudo de Afloramento Carbonático do Membro Crato da Formação Santana na Bacia do Araripe Ceará (CE) - Brasil.** 2013 x, 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The aim of this study was the identification of carbonates by the method of Ground Penetrating Radar (GPR) on an outcrop of rocks with laminated limestone quarry located in Mina Pedra Branca from Nova Olinda on the road that connects the cities of Juazeiro do Norte and Nova Olinda in the state of Ceará, Brazil. The outcrop is located in the Basin of Araripe the Santana Formation, Crato Member (singular by laminated limestone and for its fossil content), it has approximately 14 m of high, composed from top to base: soil, laminated limestone, marl with small levels of laminated limestone, laminated limestone with the upper weathered. The GPR is a geophysical method that uses electromagnetic waves which propagate in order to image subsurface geological structures, lithology, soil partitioning, bodies and etc. An online data acquisition GPR was 67 m obtained above to 8 m outcrop thereof. The equipment used for the acquisition was RAMAC / GPR MALA GeoScience antenna bi-static 50 MHz unshielded whose mode of data acquisition was common-offset. The initial spacing of the antennas were spaced 2 meters and continue through 1 m. The processing and interpretation of the data were performed in the program REFLEXW - Interpex whose processing steps were: setting time zero, dewow, removes background, bandpass filter, gain, migration 2d. The interpretation consisted after the data processing, which was possible to identify three hyperbolas, one on the left side section radargrama speed of 0.22 m / s, one in the center of the section with a speed of 0.14 m / s and finally one on the right with a speed of 0.13 m / ns. Hyperbole is measured with high speed external noise associated with surface wave propagation, and other hyperboles are associated with artifacts of the geological environment. In radargrama section, was possible to identify a reflector stronger regarding the interface of the laminated limestone weathered chalky less changed to about 6 m depth, corresponding to a velocity of propagation of the wave in the medium of 0.07 m / s. It can be observed that the GPR provides a good response for use in carbonates.

Keywords: GPR; Carbonate; Crato Member

Lista de figuras

Figura 1 - Figura 1 - Localização das diferentes bacias nordestinas e suas respectivas abrangências. Adaptado de Franco (2004) e Martill (2007).....	13
Figura 2 - Adaptação da estratigrafia do boletim de geociências da Petrobrás com as discordâncias a direita (Adaptado de Assine,(2007).....	17
Figura 3 - Imagem do noroeste da Chapada do Araripe, com a indicação do afloramento (A1 e A2) (Adaptado de Viana & Neumann, 1999).....	19
Figura 4 - a) Mapa de localização da Pedreira Pedra Branca com vias de acesso e a área a ser estudada. Imagem retirada Google Earth (data das imagens, 2009-2010). b) Imagem do afloramento com a linha de aquisição em vermelho com azimute de 247 graus e comprimento de 67 metros.Fonte Google Earth (2009).....	20
Figura 5 - Afloramento Pedreira Nova Olinda. Afloramento com total de 14 metros, sendo o calcário laminado superior com aproximadamente 2,2 metros, a margem posterior com aproximadamente 2 metros, o calcário intemperizado com 2,4 metros aproximadamente e por fim o calcário fresco da base do afloramento com aproximadamente 5 metros.....	21
Figura 6 - Imagem Ilustrativa do sistema CDP com CMP. Adaptado de Buursink & Lane (1999).....	25
Figura 7 - Ilustração do <i>Common Offset</i> . Adaptado de Buursink & Lane (1999).....	26
Figura 8 - Aquisição dos dados GPR com equipamento RAMAC em cima do afloramento.	33
Figura 9 - Etapa inicial do processamento com a visualização dos dados no programa Reflex.....	34
Figura 10 - a) Processamento do dado com ajuste do time zero. b) Processamento dos dados com Dewow e Remove Background.	35

Figura 11 - a) Processamento do dado com aplicação de filtro passa-banda. Sendo destacadas algumas hipérbolas. b) Seção velocidade do radargrama.....36

Figura 12 - a) Processamento do dado com aplicação de ganho e migração 2d. b) Modelo Geológico obtido a partir da figura 11a).....37

Sumário

Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	vi
<i>Abstract</i>	vii
Lista de figuras	ix
1 INTRODUÇÃO	12
2 GEOLOGIA	12
2.1 Geologia Regional.....	12
2.2 Geologia Local.....	19
3.METODOLOGIA	21
4 AQUISIÇÃO DE DADOS.....	24
5 PROCESSAMENTO DE DADOS.....	26
6 INTERPRETAÇÃO	31
7 AQUISIÇÃO DOS DADOS DE CAMPO.....	33
8 PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DADOS DE CAMPO.....	34
9 CONCLUSÃO.....	37
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1 INTRODUÇÃO

Este estudo foi realizado na Bacia do Araripe na Formação Santana do Membro Crato - Brasil. O estudo do local visa verificar as estruturas em afloramento, o qual é constituído por calcários laminados, marga e solo.

Estudos recentes com Radar de Penetração no Solo (GPR) comprovam a capacidade da ferramenta em produzir seções radargramas que reproduzem estruturas de subsuperfície, o GPR tem sido usado em sedimentos clásticos e se usados em ambientes carbonáticos é verificado a eficiência comparável em ambientes turbitídicos (Franco, 2004)

Segundo Dias (2007) o GPR é um equipamento de fácil utilização e as aquisições de dados no campo podem ser realizadas com duas ou três pessoas, requerendo um baixo investimento. Além disto, não oferece qualquer impacto ambiental ao meio. O método GPR consiste na geração de um pulso de energia eletromagnética de alta frequência, geralmente da ordem de 10 MHz a 2000 MHz, que é transmitido para o meio a ser investigado. Ao incidir em uma interface que separa meios com contraste significativo de propriedades magnéticas e principalmente elétricas (determinam a velocidade e a atenuação do sinal), o pulso é parcialmente refletido e retorna para a superfície onde é detectado e registrado.

O estudo abordou sucintamente a geologia regional, bem como a estruturação da bacia e a geologia do afloramento (Membro Crato), para dar um panorama da área trabalhada. Na parte do uso da metodologia geofísica GPR, citamos a etapas de processamentos consecutivas até concluirmos por fim a seção radargrama do local com correlacionada interpretação do afloramento.

2 GEOLOGIA

2.1 Geologia Regional

As bacias Nordesteiras, mesmo apresentando contextos paleoambientais e geotectônicos distintos, têm grande correspondência histórica, como discordâncias regionais, uma vez que todas foram submetidas pelos mesmos esforços tectônicos aplicados na Província Borborema. A Província é subdividida em cinco domínios tectônicos, diferenciados por base de litoestruturas e geocronologia, Figura 01.

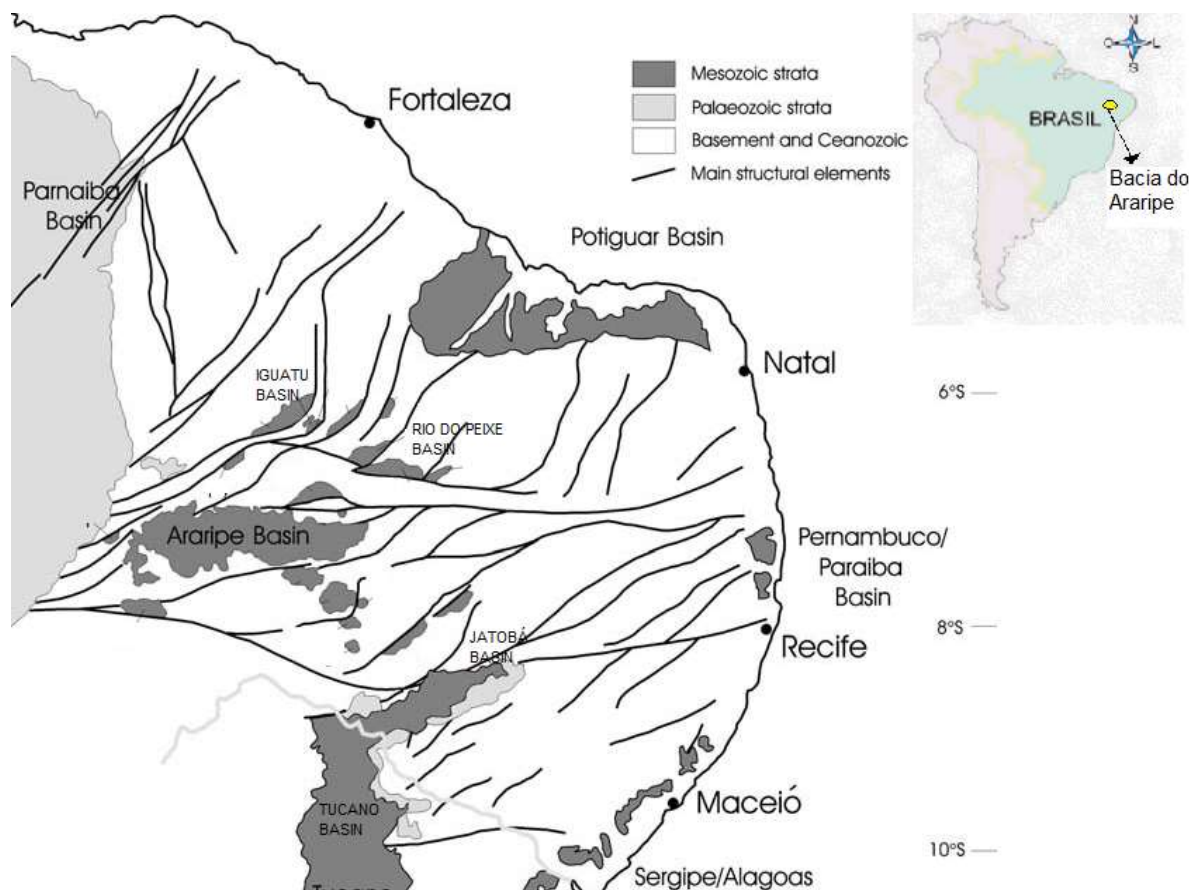


Figura 01 - Localização das diferentes bacias nordestinas e suas respectivas abrangências. Adaptado de Franco (2004) e de Martill (2007).

Tendo em mente que as bacias do nordeste brasileiro dividem em grande parte a mesma história, essas desenvolveram seqüências tectono-sedimentares comuns as mesmas, que vinham das fases pré rifte a pós rifte, sendo subdivididas em 5 seqüências. Quase que concomitante, Matos (1992) desenvolveu a idéia que as bacias Neocomianas do Nordeste eram bacias de riftes abortados, por base no trabalho de Chang *et al.* (1988) sobre as bacias marginais brasileiras.

As bacias *strike-slip* que estão situadas no Nordeste do Brasil são intracratônicas, distribuídas ao longo de uma faixa de direção SW–NE tal como dito por Assine (2007), isso se dá pelo fato de ter ocorrido a reativação das falhas do pré-cambriano durante a separação da América do Sul e da África e na orogenia Ciclo Brasileiro/ Pan-Africano (0,45 – 0,7 Ga.). Entretanto, assim como a bacia do Araripe, as bacias nordestinas teriam seu estágio rifte apenas no Neocomiano, quando as falhas passam a ser normais.

ESTRUTURAÇÃO

A bacia está localizada no Sul do Ceará, extrapolando divisas para oeste de Pernambuco e sudoeste do Piauí ao sul do Lineamento Patos e na *Zona Transversal* da Província Borborema (Freitas *et. al.* 2011). Enquadrada no contexto das bacias transcorrentes do nordeste, bacia mesozóica de *pull apart*, a Bacia do Araripe se diferencia como outras devido ao fato dos eventos dos esforços distensivos da separação do supercontinente Gondwana. No caso da Araripe, a bacia conta também com um processo de rifteamento que reativou as antigas falhas do embasamento pré-cambriano (Assine, 2007).

Já as feições geomorfológicas da bacia mostram que boa parte de sua extensão já foi modificada pelo fato desta se encontrar em uma fase de denudação, ou seja, com isostasia de seu pacote sedimentar, responsável também pela Chapada do Araripe, que só poderia ser fruto do estágio denudativo da bacia tendo como consequência seu soerguimento (Martill, 2007).

Seu arcabouço estratigráfico é registro de que este evento de hiatos e discordâncias erosivas não são novidades. Contando com uma série de discordâncias erosivas regionais, a bacia se mostra um conjunto de embaciamentos que se sucedem entre os eventos tectônicos distintos.

As formações do aptiano/cenomaniano, da Bacia do Araripe, apresentam-se dispostas alongadas E-W e com discordância angular com as formações em que se sobrepõem, dada por serem pós rifte. Seu mergulho é muito suave e tende para oeste, ora ele termina na bacia, ora pode ser encontrado direto sobre o escudo cristalino, normalmente a oeste da escarpa (Assine, 2007).

A Bacia do Araripe, conta com sub-bacias a oeste, que aumentam sua abrangência, estas seriam a sub-bacia do Cariri (no Vale do Cariri a Formação Cariri aflora na porção leste da bacia definindo os contornos do Vale do Cariri) e a sub-bacia de Feira Nova (também conhecida como Formação Arenito Superior ou Exu, subdividida posteriormente em Araripina e Exu) segundo Assine (2007). Como boa parte de seu espaço de acumulação na época foi gerado pelos processos de rifteamento, não é de se surpreender que as falhas que as controlam poderiam estar relacionadas aos mesmos esforços e seus alinhamentos que são E e WNW estarem associados as mesmas falhas de rifte e estarem interconectados junto ao sistemas de riftes globais, tendo seus eventos e esforços interligados com as forças aplicadas na margem atlântica.

As bases da litoestratigrafia foram feitas inicialmente por Beurlen (1962, 1963 apud Assine, 2007, p.372) que delimitava as Formações: Cariri, Missão Velha, Santana e Exu.

Muitos trabalhos foram feitos aperfeiçoando a litoestratigrafia das formações, mas sempre apenas com uso de estudos de superfície (Assine, 2007). Entretanto, o aumento de interesse sobre a bacia visando seu potencial petrolífero, levou em 1980 o uso de métodos potenciais como o gravimétrico por Rand & Manso (1984 apud Assine, 2007, p.372) que descobriram que os limites de profundidade da bacia seriam muito maiores. Desde então, diversos mapeamentos foram aplicados alavancando os conhecimentos sobre a bacia.

Uma vez que a bacia tem hiatos significativos, e seus dados de subsuperfície não são abundantes, temos que o uso de Paleocorrentes é fundamental para a reconstituição da história tectono-sedimentar e plano de sedimentação. Com isso, podemos definir o mergulho deposicional nos fluxos, o declive topográfico, as mudanças de áreas-fonte, interpretação movimentações tectônicas e esboço do paleoambiente deposicional interligando os dados com os de outras bacias da região (Assine, 2007).

SEQUÊNCIA PALEOZOICA (CARIRI)

A sequência é composta apenas pela unidade estratigráfica Formação Cariri, amplamente utilizada, valendo lembrar-se da diferenciação da formação em Mauriti também, sendo contrabatida pela SBG quanto à prioridade de nomenclatura estratigráfica (Assine 2007).

A unidade aflora no vale do Cariri, na porção leste da bacia. Na porção oeste apenas em subsuperfície. Tem sua espessura reduzida.

A única fração da bacia que corresponde ao Paleozóico, é a Formação Cariri, ou Mauriti, como designado por trabalhos mais recentes. A formação aflora a leste, junto com a maior parte das formações, no Vale do Cariri, podendo chegar a mais de 100 metros de espessura (Assine, 2007).

Braun (1966 apud Assine, 2007, p.374) atribuiu idade paleozóica para a Formação Cariri, devido a similaridade litológica com a Formação Tacaratu, Bacia de Tucano-Jatobá, é composta por arenitos imaturos e com níveis ortoconglomeráticos- sendo assim considerada afossilífera.

A bacia pode ser estruturalmente diferenciada em estágios pré, sin e pós-rifte, como também pode ser estruturalmente diferenciada em seus diferentes vales (por altos estruturais). Assim temos o pré rifte abordando as Formações Brejo Santo e Missão Velha promovidas pela depressão afro-brasileira gerada durante o início do estiramento.

Dados magnéticos e gravimétricos provaram a compartimentação da bacia por falhamentos, graças a Rand & Manso (1984 apud Silva, 2003, p.22-23) e a Castelo Branco

(1999 apud Silva, 2003, p.22-23), que separavam a bacia em leste e oeste a parte do Alto de Dom Leme. A própria bacia em si, foi estruturalmente limitada pelo Lineamento da Paraíba ao norte, pela falha de Farias Brito, a noroeste, ao sul pela falha de Sítio das Moreiras, e a leste pela falha de Conceição.

As sequências pré Rife (Brejo Santo e Missão Velha) ocorrem nos Vales do Cariri e Missão Velha. É visível seu estágio dada a não constatação de fácies marginais ou padrões de variação geográfica reforçado pelo estudo dos padrões de paleocorrentes (Assine 2007).

A sequência Rife inicia-se com a Formação Abaiara no Neocomiano, facilmente distinguível das anteriores pelos aspectos faciológicos. A formação apresenta discordância com missão velha pela falta dos ostracodes da zona *Theriosynoecum varietuberatum* (Assine, 2007).

Quanto as sub-bacias do Cariri e Feira Nova, estas são subdivididas em *horsts* e *grabens* de direção NE. Essas estruturas seriam derivadas de um segundo pulso tectônico da fase rife, de modo que na propiciou o espaço de acumulação, impedindo que sequências formadas pelos andares de Buracica e Jiquiá fossem depositadas, entretanto o basculamento dos estratos ficou registrado. Tais eventos tectônicos enquadram-se na teoria de distensão do nordeste brasileiro, e os processos erosivos seguintes promoveram a peneplanização para a deposição do pós rife (Assine 2007).

Então temos o pós rife, onde se depositaram as formações de idade aptianas e albianas como as ditas Formações: Rio da Batateira (Barbalha), Santana e Arajara (base do Exu) e logicamente Exu. A deposição se deu graças a subsidência flexural térmica, sobrepondo os estratos sobre a discordância angular regional de pré-Alagoas abrangendo os já citados andares buracica e jiquiá (Assine, 2007), Figura 02.

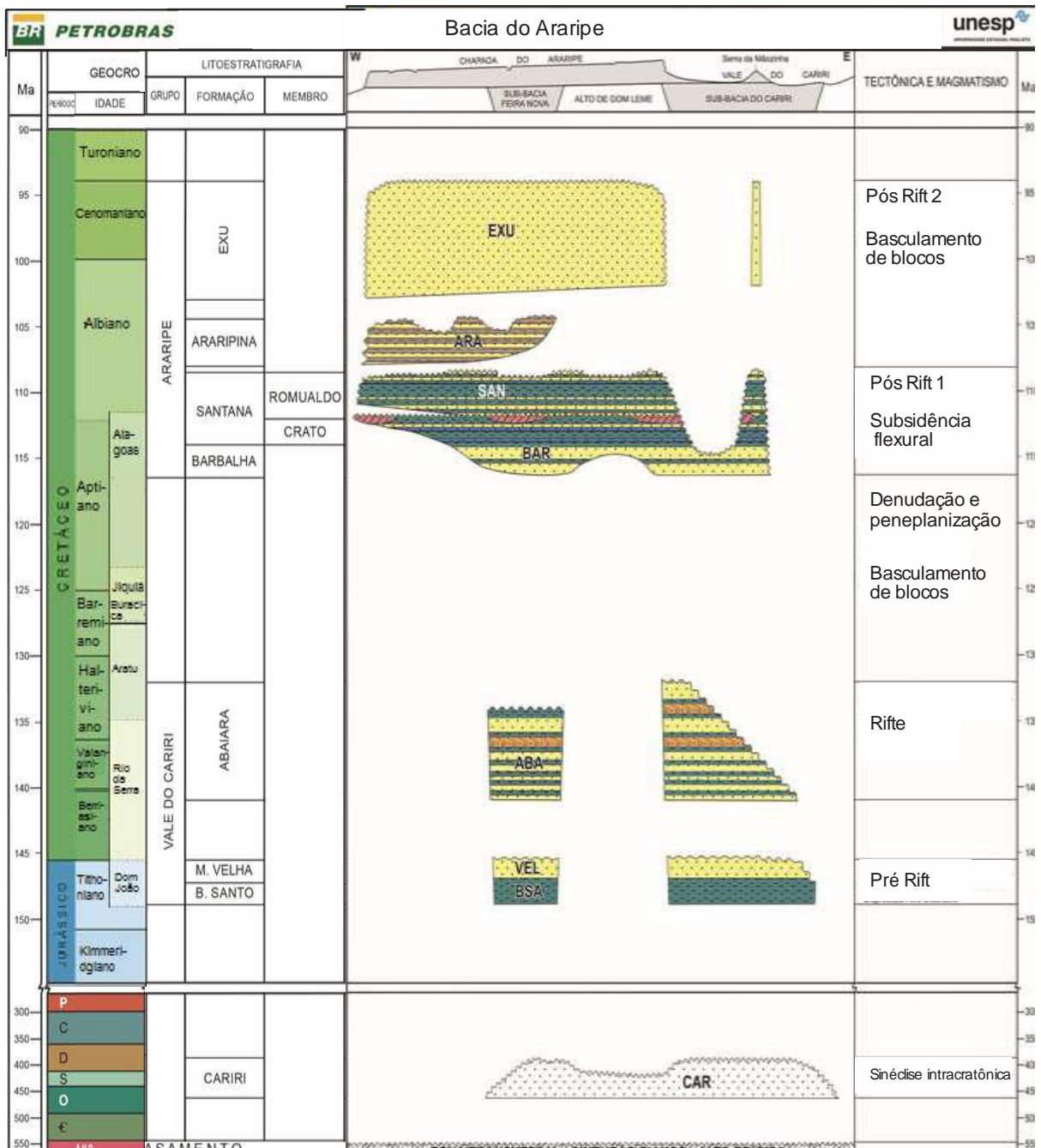


Figura 02 – Adaptação da estratigrafia do boletim de geociências da Petrobrás com as discordâncias a direita (Adaptado de Assine, 2007).

No pós rifte, temos as formações Barbalha e Santana que compreendem as formações da base da Chapada do Araripe (Figura 03). A Formação Barbalha compreende dois ciclos fluviais granodecrescentes abrangendo *sets* de folhelho, arenitos finos que compreendem espessuras de 20 cm à 2 metros. Apresenta também intervalos pelítico-carbonáticos lacustres, chegando a formação um total de 480 a 722 metros (Assine 2007).

Destaca-se as Camadas Batateira, que localizam-se no primeiro ciclo fluvial, caracterizada por seus folhelhos ricos em matéria orgânica e material fóssil sendo assim subdividida de acordo com sua biozona tal como confirmado por Hashimoto *et al.* (1987 apud

Assine, p. 377), que também contribuiu com um estudo correlato de outras camadas tal como Ponta do Tubarão (Potiguar) e Camadas Trairi (Ceará) reforçando a importância da camada.

Enfim, chegamos ao segundo ciclo da Formação, que finaliza em calcários micríticos laminados do Membro Crato da Formação Santana. O membro atribui espessuras decimétricas, que coexistem lateralmente com folhelhos verdes. É conhecido em diversos trabalhos pela sua abundante Fauna, da qual se identificam fósseis de ambiente lacustre (Assine, 2007).

Ao final do Membro Crato, encontramos o Membro Ipubi, que já foi classificado como camadas, e caracteriza-se por associar-se junto aos folhelhos e apresentar-se como lentes de gipsita. É um importante marco estratigráfico utilizado nas correlações das bacias adjacentes.

O topo do Membro Crato é caracterizado pela discordância com pequeno hiato, em que se segue o Membro Romualdo, cuja parte inferior é composta por arenitos com folhelhos, que são sucedidos por folhelhos verdes que escurecem mais acima, seus fósseis indicam presença marinha. O topo dos folhelhos escuros é caracterizado por uma grande mortandade, onde se encontram diversas concreções (Assine, 2007).

A Formação Santana é sotoposta sob a Formação Araripina, ao qual é a primeira unidade que compõe a Chapada do Araripe (Figura 03). A formação se dá por arenitos finos e lamitos compondo ritmitos. O ambiente deposicional seria os leques aluviais. Os depósitos também sofrem tectônica sindeposicional que se prolongaram até o início da deposição da Formação Exu (Assine, 2007).

A Formação Exu caracteriza-se pela pouca atividade tectônica, por seus arenitos fluviais e pela discordância angular com a Formação Araripina. A formação apresenta também sinais de planície de alagamento e canais abandonados, e sua idade seria albiana cenomaniana (Assine, 2007).

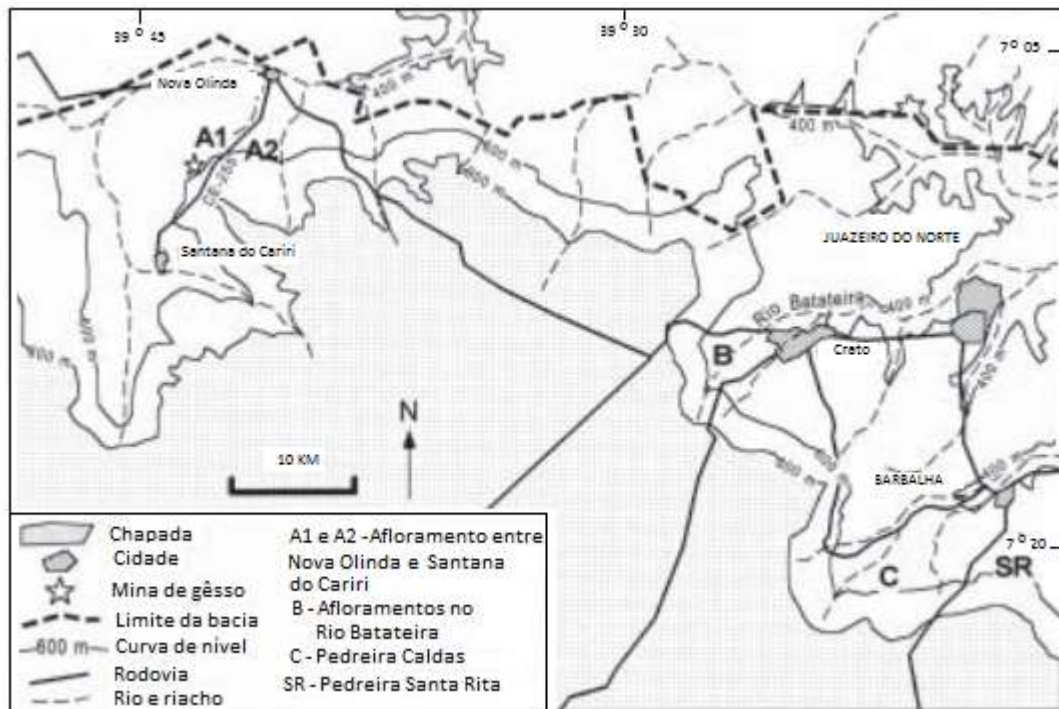


Figura 03 - Imagem do noroeste da Chapada do Araripe, com a indicação do afloramento (A1 e A2) (Adaptado de Viana & Neumann, 1999).

2.2 – Geologia Local

O afloramento em estudo se encontra no Membro Crato, o qual é formado por sedimentos carbonáticos, o qual pode ser correlacionado com Serra do Vermelha e a Bacia Cedro. É lembrado por sua farta assembleia fóssil e qualidade de preservação. Tem como uma de suas peculiaridades a continuidade lateral das camadas, especialmente as de micrita, bem como as variedades litológicas que se dão verticalmente (Marga, Folhelho e etc). O Membro Crato abordado tem rica paleontologia em suas camadas mais baixas, de micritas.

O afloramento está localizado na pedreira Pedra Branca (Figura 04) na estrada que une as cidades de Santana do Cariri e Nova Olinda a 3,4Km do município de Nova Olinda cuja as coordenada são aproximadamente $7^{\circ} 7'23.42''S$ e $39^{\circ}41'50''O$.



Figura 04 - a) Mapa de localização da Pedreira Pedra Branca com vias de acesso e a área a ser estudada. b) Imagem do afloramento com a linha de aquisição em vermelho com azimute de 247 graus e comprimento de 67 metros. Fonte Google Earth (2009).

O afloramento possui 14 m de altura e com mais de 67 m de largura, podem ser identificados 5 variações litológicas constituídas por: A – Calcário intemperizado, B – Marga com intercalação de calcário intemperizado, C – Calcário intemperizado e D – Calcário Laminado (Figura 05).

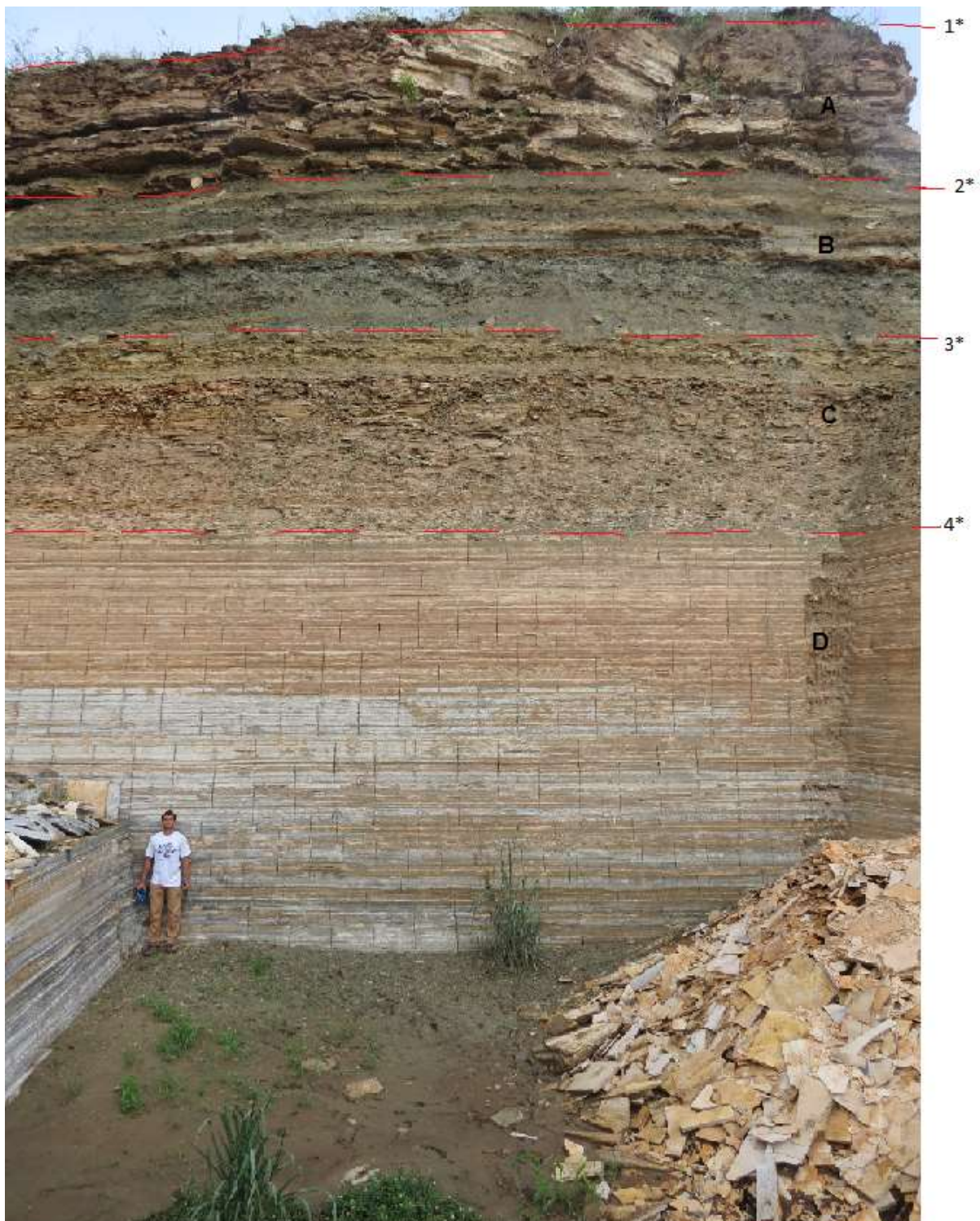


Figura 05 - Afloramento Pedreira Nova Olinda. Afloramento com total de 14 metros, sendo o calcário laminado superior com aproximadamente 2,2 metros, a margam posterior com aproximadamente 2 metros, o calcário intemperizado com 2,4 metros aproximadamente e por fim o calcário fresco da base do afloramento com aproximadamente 5 metros.

3 METODOLOGIA

O GPR usa como princípio físico a propagação de ondas eletromagnéticas no subsolo para adquirir informações sobre a arquitetura estratigráfica em subsuperfície tal como

especificado por Dias (2007). O equipamento possui uma unidade transmissora para emissão de pulso que é captado por outra unidade receptora após um trânsito pela subsuperfície, com reflexões e refrações nas interfaces que separam materiais com diferentes propriedades elétricas.

Já é de consenso geral que quando uma partícula eletricamente carregada for perturbada, ela irá se propagar tanto na presença de um meio material quanto no vácuo, originando a onda eletromagnética.

As equações de *Maxwell* descrevem esse transporte, dissipação, armazenamento e geração da energia eletromagnética nos meios materiais ou no espaço livre. Estas equações relacionam o campo elétrico E e o campo magnético B , juntamente com suas variações no espaço, representadas pelo operador diferencial ∇ , e no tempo representadas pelo operador diferencial (Dias (2007)).

Segundo Izargain (2004) existem os parâmetros constitutivos que se evidenciam nas equações de *Maxwell*, como densidade de corrente J , densidade de cargas elétricas, ρ assim como duas grandezas inerentes ao meio em que os campos elétricos e magnético se propagam: a permissividade dielétrica, ϵ , e a permeabilidade magnética, μ .

As quatro leis a seguir, descrevem a teoria do campo eletromagnético e constituem a estrutura básica da teoria das interações eletromagnéticas:

As equações de *Maxwell* representam expressões matemáticas de resultados experimentais com aplicações em situações macroscópicas. Cada uma delas representa uma generalização de observações experimentais;

- i) Lei de Gauss para o campo elétrico;
- ii) Lei de Faraday-Henry (um campo magnético variável no tempo produz um campo elétrico);
- iii) Lei de Gauss para o campo magnético;
- iv) Lei de Ampère-*Maxwell* (um campo elétrico variável no tempo produz um campo magnético), onde E = campo elétrico (V/m); B = campo magnético (T);
= permissividade dielétrica (F/m); = permeabilidade magnética (H/m); = densidade de corrente (A/m^2) e = densidade de cargas elétricas (C/m^2).

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

O conjunto de equações que compõe as equações de *Maxwell* com aplicações em meios lineares apresenta as seguintes relações: $D = \epsilon E$ (C/m²), densidade de corrente de deslocamento; $J = \sigma E$ (A/m²), densidade de corrente de condução; $H = \mu/B$ (A/m), intensidade do campo magnético.

Considerando as equações de *Maxwell* no vácuo, todas as componentes dos campos eletromagnéticos satisfazem a equação de ondas unidimensional (Dias, 2007) com velocidade de propagação representada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (5)$$

No caso da propagação de ondas eletromagnéticas em um meio material, e se esse é considerado homogêneo, isotrópico, horizontalmente estratificado e com estratificação (como a Terra), o efeito da polarização e magnetização do meio pela onda eletromagnética implica na substituição das constantes e nas equações de *Maxwell* por ϵ e μ características do material. Dessa maneira, o processo de indução na Terra é descrito por um processo de difusão de campos quase estáticos, cuja única diferença seria a velocidade da onda, dada por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (6)$$

O GPR utiliza ondas de rádio num espectro de frequência entre 10 MHz e 1000 MHz, conferindo-lhe a característica de método investigativo de resolução muito alta (Dias, 2007).

No modo biestático, mais usual, a antena transmissora radia um pulso eletromagnético de alta frequência que se propaga através da subsuperfície. A antena receptora capta o sinal emitido pela transmissora e vindo de diferentes percursos.

Esse processo de radiação das ondas esféricas dá origem às ondas que se propagam diretamente da antena transmissora para a receptora através do solo, do ar, e das ondas que chegam à antena receptora após se refratarem e refletirem nas interfaces dos meios com

diferentes propriedades elétricas. O método se baseia na reflexão de ondas eletromagnéticas nessas interfaces (Dias, 2007).

4 AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados GPR varia de equipamento para equipamento. Todos os equipamentos possuem uma estrutura básica comum, como a unidade de controle central (UCC – por exemplo um computador), para visualização, armazenamento de dados e *quality control*. A UCC permite um pré-processamento com filtros de frequência e equalização de ganhos (Rodrigues, 2004).

O equipamento detêm uma antena transmissora e uma receptora; quando ambas se encontram na mesma antena, o sistema é monoestático, quando em antenas separadas, o sistema é biestático, exigindo frequências, tamanhos e distancias das antenas pré definidos para cada objetivo de trabalho.

No estudo usou-se o equipamento RAMAC, com antena biestática de 50 MHz, não blindada, cujo modo de aquisição dos dados foram common-offset. O espaçamento inicial das antenas foi de 2 metros e o espaçamento contínuo de 1 m.

A aquisição se dá principalmente pelos seguintes arranjos:

- Ponto médio comum (*common midpoint* – CMP), angulo aberto de reflexão ou refração (*Wide Angle Reflection and Refraction* - WARR).
- Arranjo de transluminação
- Distancia constante entre as antenas *Common Off-set* – *COS* ou Reflexão Simples.

CMP e WARR

Segundo Dias (2007) e Medeiros (2005) no modo CMP, as antenas transmissora e receptora são deslocadas simetricamente para a esquerda e para a direita a partir de um ponto central. O *offset* inicial é usualmente S1, dependendo da antena a ser utilizada (por exemplo, com a antena de 100 MHz é utilizada para S1 igual a 1 metro). De acordo com Gomes (2006) o espaçamento entre as antenas não pode exceder o máximo da frequência de *Nyquist*. Os dados são adquiridos com as antenas espaçadas e aumentando para fora dos centros em passos S1/2. A frequência de Nyquist em 1D é dada por:

$$f_n = \frac{1}{2\Delta t} \quad (7)$$

Onde f_n é a frequência de Nyquist, e Δt a variação de tempo de amostragem.

Em Dias (2007) o método WARR baseia-se em manter a transmissora fixa enquanto a receptora se desloca em relação a transmissora. O CMP é uma variante do WARR que é mais trabalhoso quando se trata de sondagens em perfis. Também é sensível as inclinações e refletores internos, pois a reflexão ocorre aproximadamente no mesmo ponto.

Tal como especificado por Dias (2007) e Izargain (2004) ambos os arranjos estimam velocidades da propagação de ondas eletromagnéticas do meio, que vinculam-se ao tempo de propagação da onda de cada aquisição da antena. Estimamos a velocidade no ar e solo e também da onda refletida nas interfaces de diferença eletromagnéticas, que é importante na migração e determinação na interface de refletores.

Na aquisição deve-se tomar cuidado com a transmissão de ondas diretas pelo ar ou superfície. A visualização dos dados difratados se mostra tal como o sísmico.

O método CMP (Figura 06) é de grande importância devido a qualidade da informação que ele gera. O fato de conseguir informações de um mesmo ponto (CDP- common deep point) pode auxiliar no processamento do dado, uma vez que ele é adquirido com diferentes distâncias pode-se diferenciar o ruído pela sua diferença de velocidade em relação a onda do GPR.

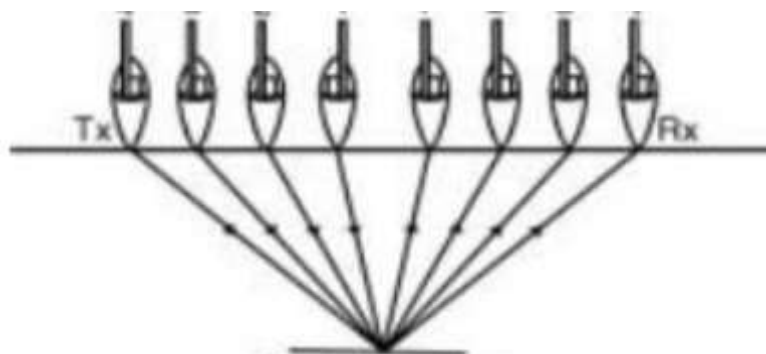


Figura 06 - Imagem Ilustrativa do sistema CDP com CMP. Adaptado de Buursink & Lane (1999).

Arranjo de transluminação

É utilizado principalmente para a detecção interna de objetos em locais bastante pequenos. Consiste na modificação do local da receptora enquanto a transmissora permanece parada. É utilizado com as antenas em locais opostos, como no uso para rachaduras em pilastras assim especificado por Cesar (2001 apud Dias, 2007, p.122).

Common off-set

A antena transmissora assume uma posição S_1 em relação a antena receptora, a cada ponto de aquisição, um novo ponto deve ser tomado, cuja distância do ponto anterior é $S_1/2$ (Dias, 2007), Figura 07. Esta aquisição é semelhante ao sonar, permitindo a avaliação de diversos parâmetros elétricos dos refletores em subsuperfície, e vem sendo o arranjo mais utilizado para o GPR (Izargain,2004).

Este foi o arranjo escolhido para efetuar a aquisição devido a praticidade e agilidade na aquisição dos dados, além das qualidades físicas do método.

Existe também um outro arranjo, que é herdado da sísmica de reflexão, chamado split-spread, que é análogo ao sísmico (antenas transmissoras e receptoras). Este é composto por um grupo de receptores, arranjados espacialmente em cabos, obtendo uma distância regular (intervalar)(Dias, 2007).

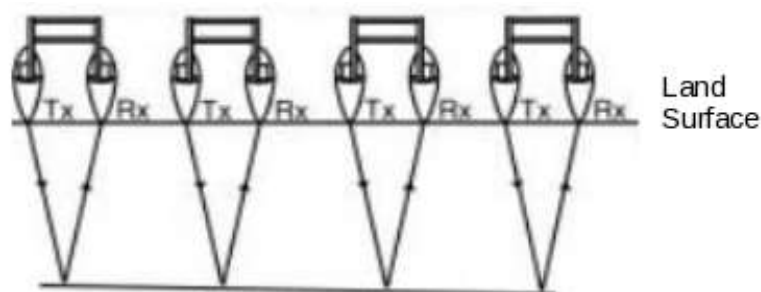


Figura 07 - Ilustração do *Common Offset*. Adaptado de Buursink and Lane (1999).

5 PROCESSAMENTO DE DADOS

O processamento básico é feito grande parte das vezes em tempo real. Nesta etapa, avalia-se a qualidade dos dados registrados no intuito de se verificar a presença de ruídos provenientes de qualquer meio durante a aquisição para expor no relatório (Dias, 2007 e Izargain,2004).

EDIÇÃO:

A princípio, ao recebermos os dados devemos converter o dado para um formato interno ao qual iremos trabalhar. Diferentes GPRs utilizam diferentes formatos como é o exemplo do *.rd3 utilizado pela RAMAC, podendo ser reformatados para os formatos internacionais como o SEG-Y.

Na edição nós deletamos os traços ruins, fazemos um merge nas linhas de aquisição que por ventura foram fracionadas, invertem o sentido do perfil e acrescentam informações sobre a topografia. Como o receptor se abre antes mesmo do transmissor enviar o sinal, existe um tempo de registro em que não há sinal e que deve ser corrigido por uma quebra da onda

conhecida como timezero através de uma correção estática de baixo para cima para o valor de $Ons(timezero)$ dando ao primeiro sinal no traço no Ons , ou seja, já a interface ar-terra.

A primeira quebra em relação ao Ons também pode acontecer pelo aumento de temperatura durante a aquisição ou por causa de cabos de fibras ópticas ruins ($timezero$ jitter).

GEOMETRIA:

A geometria baseia-se na organização dos dados adquiridos no espaço, onde as informações utilizadas encontram-se nos Headers, compostos pelas coordenadas de cada estação, ou melhor, de cada traço registrado e de informações de ganhos (Izargain, 2004).

DEWOW:

O dewow é um filtro muito utilizado para remover certa componente inicial do sinal e das mais baixas frequências dos dados (Izargain, 2004). De acordo com a distância entre as antenas do aparelho, a saturação do receptor (grandes amplitudes das ondas de ruído, bem como as propriedades elétricas da terra, fenômeno indutivo) pode induzir um decaimento de baixa frequência “wow” no traço, sofrendo sobreposição nas reflexões de alta frequência (Dias, 2007).

O Dewow é um filtro passa alta, agindo no pico espectral suspendendo as baixas frequências dos dados (Dias, 2007).

GANHO:

A perda do sinal ao ser absorvido pelo meio em que se propaga, fazendo com que seja necessário reverter este processo assim como possível. Para isso, deve-se maximizar o sinal de acordo com a profundidade, pois o sinal se perde cada vez mais que se desloca no meio.

Desse modo, a fim de se preservar os pequenos sinais captados e que poderiam acabar por passarem despercebidos usa-se o ganho, ou melhor, o *time gain*, que corrige a excessiva perda de sinal por parte dos registros mais profundos.

FILTROS ESPACIAIS E TEMPORAIS:

As filtragens espaciais(horizontais) e temporais(verticals) podem ser utilizadas antes ou depois do ganho, e seu uso é uma das técnicas mais relevantes para o processamento do GPR.

Deve-se aplicar filtragem também nos ruídos de alta frequência. Quanto ao seu espectro de amplitude em função da frequência, esse auxilia na identificação destes ruídos. Utilizam-se filtros passa-banda, passa-baixa, passa-alta, ou outros filtros medianos.

Os parâmetros a serem analisados são: frequência inferior de corte, platô inferior (valor inicial da banda de frequência desejada), platô superior (valor final da banda de frequência desejada) e frequência superior de corte.

A filtragem espacial remove diferentes aspectos ou realça, por exemplo: o filtro passa-baixa realça a continuidade lateral (horizontais) da estratigrafia ao mesmo tempo em que minimiza refletores inclinados, os pontos de difração e ruídos aleatórios. A média móvel (*Move Average*) é a mais comum e também a mais utilizada, segundo Porsani (2002 apud Dias, 2007, p 138.).

Já o passa-alta realça refletores localizados e pontuais, bem como os refletores inclinados e horizontais dominantes. O mais comum é a remoção do *background* (*del mean*), Porsani (2002 apud Dias, 2007, p 138).

A filtragem temporal é a filtragem ao longo do tempo do grupo de dados. Diferentes filtros podem ser utilizados tal como os filtros passa-banda, usando a Transformada *de Fourier* Rápida (FFT). Outros filtros também, como os de convolução, aplicados no tempo linear e não linear.

DECONVOLUÇÃO:

Filtro fundamental na sísmica, cujo objetivo é eliminar ou atenuar efeitos de natureza convolucional. É utilizada tanto para eliminar os efeitos de reverberação da lamina d'água como para aprimorar a resolução temporal (vertical) do sinal através da compressão da onda básica *wavelet* (assinatura da fonte) (Izargain, 2004 e Brunetta 2005).

A deconvolução objetiva retirar os dados da *wavelet* que não compõem o sinal reflectivo. Para tanto, comprime-se a *wavelet* a fim de retirar o ruído, melhorando a resolução temporal dos dados.(Brunetta, 2005)

A equação abaixo ilustra a interação da *wavelet* com o filtro:

$$S(t) = Y(t) * w^{-1}(t) * c^{-1}(t) \quad (8)$$

SUBTRAÇÃO DE BACKGROUND:

Utilizado por meio de um filtro passa-alta ou de media móvel, em situações de objetos enterrados em níveis significativos em estratigrafia, ou na exibição de reverberações dos artefatos, permitindo sublocar os sinais mais fracos que são perdidos, tornando-os visíveis (Harry, 2009).

FILTRO FK:

Permite a aplicação de grande variedade de filtros na aplicação dos dados, tanto no espaço quanto no tempo, ou no domínio da frequência temporal ou espacial.

Possibilita retirar energias indesejadas dos dados como ruídos lineares (tipo *ground-roll*).

A remoção das ondas aéreas e diretas também pode ser feita pelo FK. Corre-se o risco de filtrar, também, sinais que estejam com direção coincidentes com o ruído (Izargain, 2004).

ANALISE DE VELOCIDADES:

Segundo Dias (2007) uma das fases mais importantes dos processamentos, importante para converter tempo em profundidade. Este perfil de velocidades pode possuir variações vertical e até lateral de acordo com a anisotropia da litologia.

Existem várias metodologias para estimar este parâmetro, tais como:

- I. através de dados tabelados : a utilização de valores tabelados não é a mais adequada devido ao desconhecimento, a priori do sítio investigado, as variações para uma mesma litologia e heterogeneidades sempre existem (Gandolfo, 2003).
- II. entrada de registros de velocidade de fontes externas: através de dados de poços ou de fácies de afloramentos.
- III. conhecimento da profundidade do refletor ou alvo: normalmente não se tem informação disponível com relação à profundidade de determinado alvo e correlação direta deste com um refletor ou feição observável no registro.
- IV. ajuste de funções de hipérbole em eventos de uma seção: Uma forma de determinar a velocidade é através da forma das hipérbolas de difração. Entretanto tem-se um fator crucial, a não existência de hipérbolas nas seções radargramas. O ajuste de hipérbole é feito a partir da geometria de hipérbolas de difração

presente na seção radargrama. Serão extraídos os parâmetros de velocidade, profundidade e diâmetro. Esta é a velocidade RMS ao ápice da hipérbole.

Verificado o valor da hipérbole em por exemplo de 0,079 m/ns esta velocidade é consistente com a difração de um arenito saturado. A migração então é feita nesta velocidade evidenciando uma imagem da fratura que dá a certa difração. Para eventos de ondas diretas a velocidade média de 0.26 m/ns é resultante de objetos espalhados em superfície.

V. ensaios CMP/WARR

Estes são os métodos mais utilizados e que proporciona uma medida confiável (uma vez que é determinada “*in situ*”). Para a execução destas aquisições é necessário a antena biestática.

Uma das formas para se obter os valores de velocidade é através dos radargramas com feições hiperbólicas que são associadas a pulsos refletidos em tempos progressivamente menores, ao longo do perfil, até uma posição onde obtêm valores crescentes. Analisando essas hipérboles de tempo por separação entre as antenas obtidas com arranjo do tipo CMP/WARR, é possível estimar a velocidade da onda de radar no subsolo.

CORREÇÃO DE NMO:

Nem sempre as hipérboles no radargrama se ajustam a ao refletores horizontais. As velocidades irregulares distorcem a imagem de forma estática ou dinâmica. Para se melhorar o QC do stack, as correções são feitas no CMP (Izargain, 2004).

EMPILHAMENTO (STACKING):

O stack permite a organização dos traços de uma seção, imageando a mesma. Necessita primeiramente a aplicação da Geometria para isso. Os traços são tirados a partir dos resultados dos filtros de NMO, para melhor qualidade. Os vários CMPs de um mesmo traço se unem afim de aumentar o sinal ruído e o “representante final” é incorporado pelo stack, junto a outros milhares de traços provindos do CMP e organizados com os dados da Geometria (Izargain, 2004).

INTERPOLAÇÃO:

A interpolação se faz como em outras áreas da ciência, trata-se de inserir um novo dado a partir de dois dados adjacentes (Miranda, 2007). O Objetivo é aumentar o tamanho do refletor e auxiliar a remover o “alias espacial” que pode prejudicar o filtro de migração.

MIGRAÇÃO:

O filtro migração baseia-se na realocação dos alvos aos quais tiveram suas posições distorcidas a partir de refletores inclinados, tornando os dados mais realistas a geometria original. Assim os sinais se mostram mais contínuos e as dobras (sinformais) bruscas são suavizadas (Javier Izargain, 2004). O efeito sorriso que muitas vezes ocorre após a migração ocorre devido as amplitudes trabalhadas são anômalas.

6 INTERPRETAÇÃO

A boa interpretação dos dados requer um bom conhecimento dos modelos geológicos, saber os objetivos do levantamento e a qualidade dos dados adquiridos, porem, é fundamental que haja baixa relação sinal/ruído.

No transmissor da antena é gerado os pulsos de voltagem, curtos e altos, dentro da antena, o qual irradia com uma frequência específica. Este mono pulso gera um comprimento de onda longo e com amplitude que é transmitido e, após um intervalo de tempo, recebido como sinal na unidade de controle. A antena receptora leva o sinal que é digitalmente representado e registrado como 16 bits, tal como especificado no manual do aparelho.

O radar de penetração do solo, GPR (Georadar), que se baseia em ondas eletromagnéticas de alta frequência, vem sendo utilizado para sondagem de alta definição em subsuperfície, graças a aquisição dos dados de forma rápida.

Em sua definição, as ondas do GPR, ao incidir na interface que separa os contrastes das propriedades eletromagnéticas, seja a permissividade dielétrica, a condutividade elétrica ou a permeabilidade magnética, é em parte refletida para o receptor do aparelho onde é registrado.

Atualmente o uso do radar nas Geociências, pode ser utilizado de diversas formas, seja em poços ou aéreos. No caso usaremos a aquisição tradicional em superfície. A difusão do método é dada pela investigação da espessura do solo, profundidade e heterogeneidade de embasamentos para identificação de corpos de minérios ou na sedimentologia para depósitos ou qualificação de reservatórios ou outros diversos fins.

Na estratigrafia criou-se o uso da expressão “fácies de radar”, onde as feições estruturais e texturais limitam as divisões de cada facie definida no radargrama. Parâmetros como amplitude, continuidade e configuração da reflexão, constituem elementos da facie. Outros parâmetros secundários também coexistem e o conceito “facie de radar” foi primeiramente empregado na analogia de fácies sísmicas (Andrade, 2003) .

A imagem do radar é influenciada pela saturação de água e pela arquitetura sedimentar, podendo, assim, definir a radar-estratigrafia, que é o estudo das características do registro geológico e seus ambientes deposicionais à partir de radargramas. Desta forma interpretamos a radarestatigrafia, reconhecendo padrões de reflexão e correlaciona-los com ambientes sedimentares (Andrade, 2003).

Há várias vantagens na utilização do método GPR, por exemplo, a revisão *on site* dos resultados de um levantamento (QC), o uso urbano (com antenas blindadas), não agride o seu meio de aplicação, dentre outros.

Segundo Izargain, os fenômenos eletromagnéticos do aparelho, são produzidos e detectados por cargas elétricas dividindo-se em: fonte de carga (gerador do campo eletromagnético) e detector de carga. A relação entre a carga elétrica e o campo magnético se dá pelo movimento de um deles, que provoca a existência do outro perpendicularmente ao movimento.

As equações de *Maxwell* são diferenciais parciais que regem efeitos eletromagnéticos, descrevendo o transporte, dissipação, armazenamento e geração da energia eletromagnética nos meios materiais ou no espaço livre. Estas equações relacionam o campo elétrico e o campo magnético, juntamente com suas variações no espaço livre, seja no domínio da frequência ou do tempo.

Quando um pulso é gerado, é verificado as duas reflexões fortes no início do perfil relacionadas às ondas diretas no ar e na terra, e também é necessário identificar as origens das reflexões que possam representar a geologia ou interferências (Porsani, 2002).

Existem 3 classes de feições identificáveis nos perfis:

- a) Refletores horizontais contínuos.
- b) Refletores de objetos 2D e 3D.
- c) Hipérboles de difrações de descontinuidades laterais.

Na leitura dos dados no radargrama, a presença de hipérboles são provenientes de objetos que, quando são de subsuperfície, produzem hipérboles fechadas, enquanto as hipérboles abertas são frutos de objetos em superfície. Assim, o interprete deve se atentar durante a aquisição quanto a fontes de interferências que afetariam a qualidade do mesmo.

Exemplos:

Objetos de superfície: casas, cercas elétricas, edifícios, etc.

Objetos aéreos: torres de alta tensão, postes de iluminação, etc.

Objetos transmissores de sinais eletromagnéticos: estações de rádio, aeroportos, etc.

A vantagem do método eletromagnético é ser livre de ruídos (poucos), aumentando-se nos centros urbanos.

No que diz a respeito da ressonância da antena, a primeira interface ar/meio para uma *wavelet* de fase zero, é marcada por polaridade reversa com a velocidade decrescendo de acordo com a profundidade, diferente do método sísmico.

7 AQUISIÇÃO DOS DADOS DE CAMPO

Uma linha de aquisição foi adquirida sobre o afloramento como mostrado na figura 05, sendo que esta foi obtida paralela seis metros do afloramento. O equipamento utilizado para a aquisição foi o RAMAC (Figura 08) com antena biestática de 50 MHz, não blindada cujo o modo de aquisição dos dados foram *common-offset*. O espaçamento inicial das antenas foi de 2 metros e o espaçamento contínuo de 1 m.



Figura 08 - Aquisição dos dados GPR com equipamento RAMAC em cima do afloramento.

8 PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DADOS

O processamento dos dados foram realizados no software de processamento REFLEX - Interpex. Antes de se começar o processamento dos dados este foi carregado no programa de processamento. A Figura 09 apresenta a seção radargrama sem processamento.

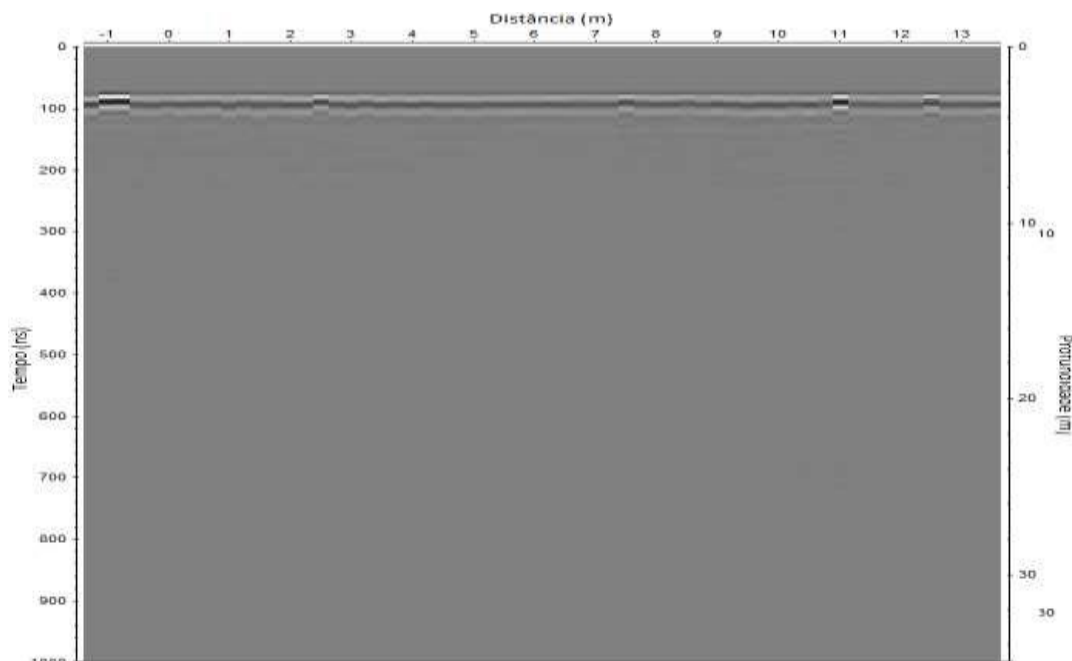


Figura 09 – Etapa inicial do processamento com a visualização dos dados no programa Reflex.

Após o dado ser visualizado começou-se o processamento composto das seguintes etapas: ajuste do tempo zero (Figura 10 (a)), *dewow* e *remove background* (Figura 10(b)), filtro passa-banda (Figura 11(a)), além de ganho e migração 2d (Figura 12 (a)).

Na Figura 11 foram observados 3 hipérboles, no lado esquerdo da seção radargrama foi observada uma hipérbole forte com 0,22 m/ns, no centro da seção foi observada uma hipérbole com 0,14 m/ns e do lado direito foi observado uma outra hipérbole com 0,13 m/ns. Em seções radargramas as altas velocidade das hipérboles são aferidas ruídos externos associados a propagação da onda em superfície, pois próximo a área de aquisição havia a presença de um cabo de alta tensão. As outras hipérboles podem ser associadas a artefatos do meio geológico.

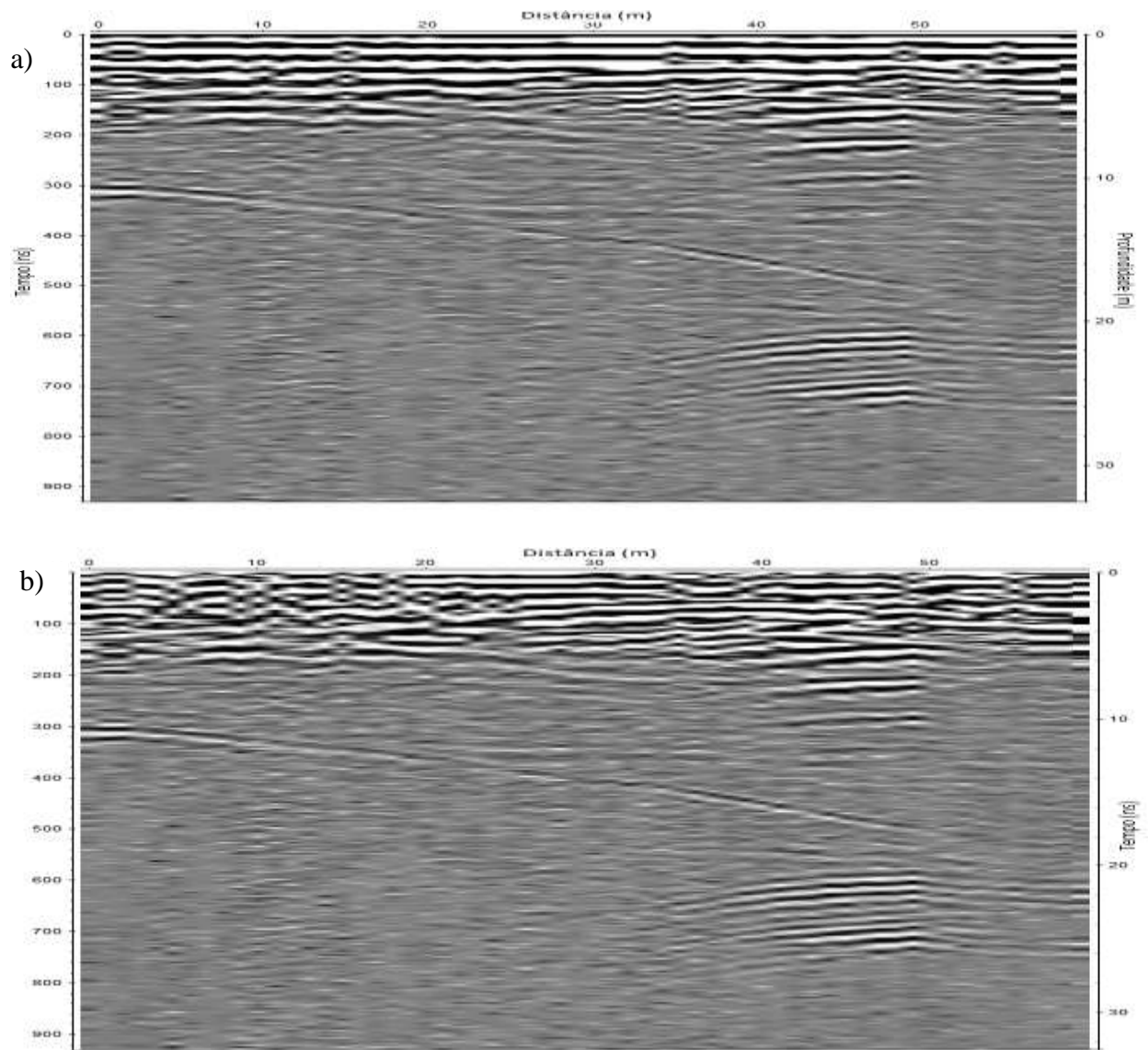


Figura 10 - a) Processamento do dado com ajuste do time zero. b) Processamento dos dados com Dewow e Remove Background.

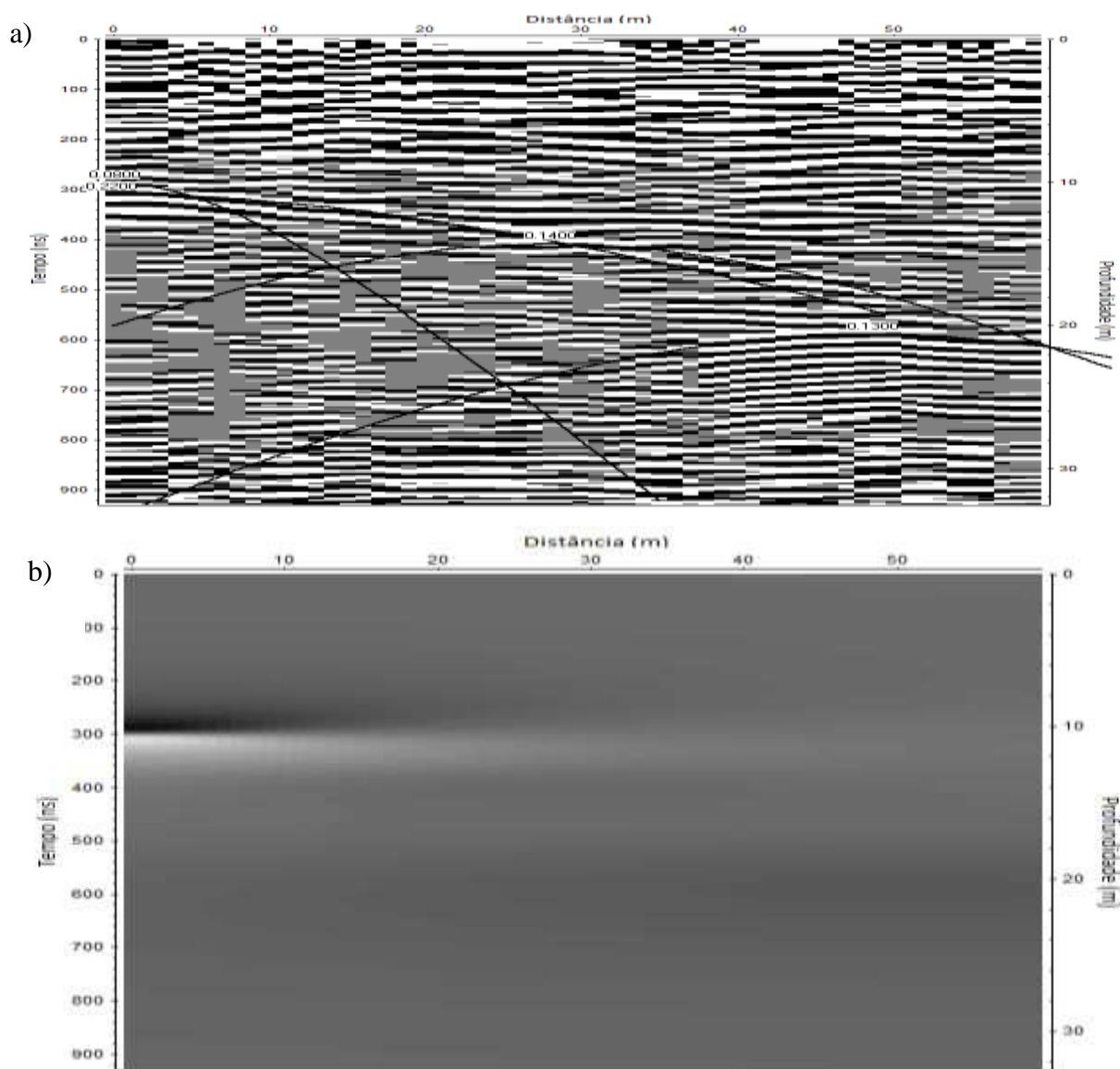


Figura 11 – a) Processamento do dado com aplicação de filtro passa-banda. Sendo destacadas algumas hipérboles. b) Seção velocidade do radargrama.

Nas seções radargramas da Figura 11, compara-se o comportamento das hipérboles (figura acima) e a seção de velocidade da onda (figura abaixo). O valor aproximado da velocidade da onda no carbonato foi de 0,08m/ns tal como especificado por Franco (2004). Para certificar-se do resultado compatível com o trabalho de Franco, outros valores foram experimentados, entretanto os demais valores distorciam a seção

A interpretação consistiu após o processamento dos dados com a utilização do software de REFLEX - Interpex. Na figura 12 (b) foram possíveis avaliar 3 refletores que correspondem: a interface 01 é solo-calcário (camada de solo em marrom e camada de calcário em verde), a interface 02 é o calcário-marga (camada de calcário em cor verde e de marga em laranja) e interface 4 é o calcário intemperizado-calcário laminado fresco (camada

de calcário intemperizado em cor laranja e calcário laminado fresco na cor amarelo), sendo que a interface 3 marga-calcário intemperizado não foi verificada na seção radargrama. Estas interfaces são associadas as interfaces destacadas na Figura 05 do afloramento.

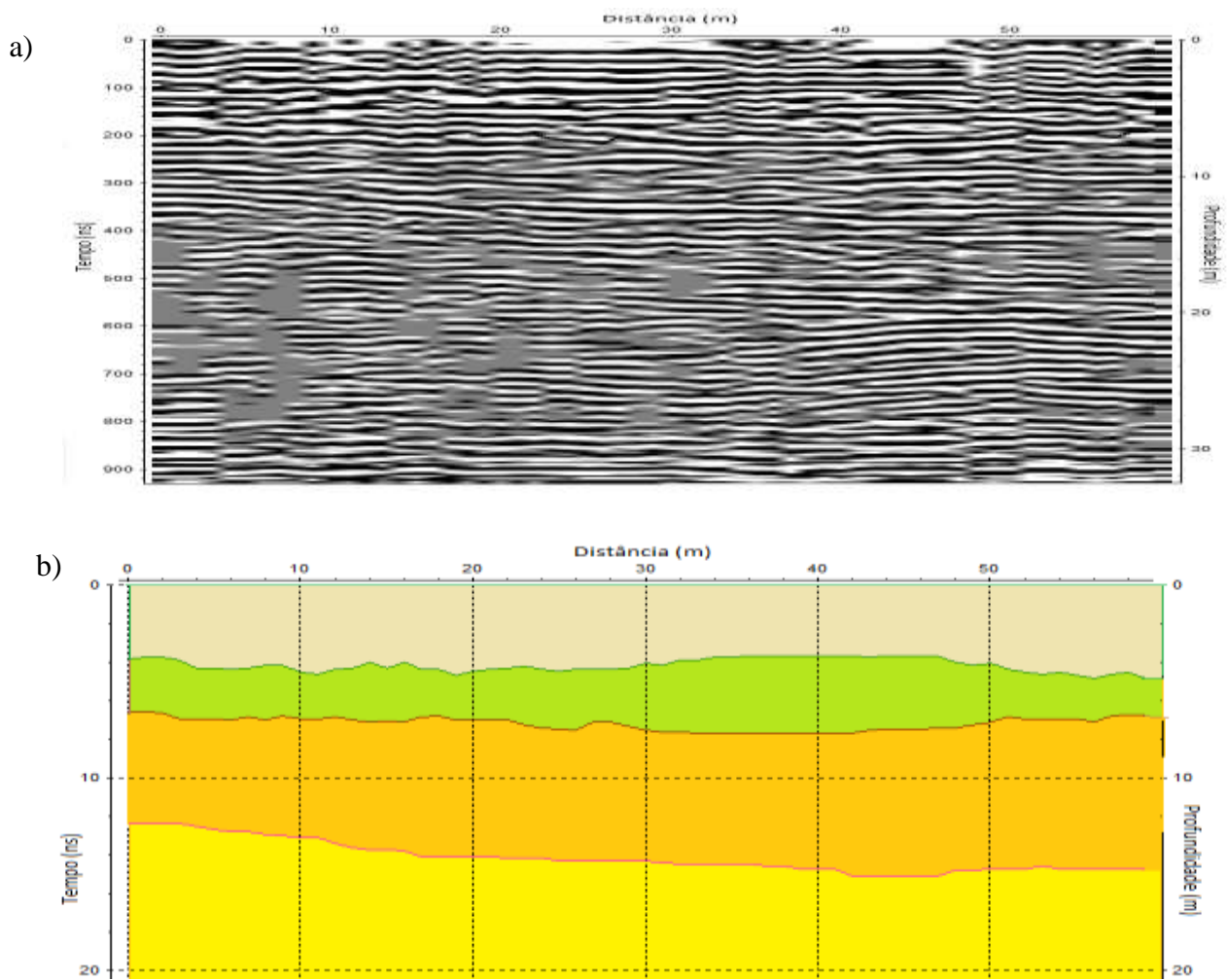


Figura 12 - a) Processamento do dado com aplicação de ganho e migração 2d. b) Modelo Geológico obtido a partir da figura 11(a).

9 CONCLUSÃO

Conclui-se que o GPR funciona muito bem para descrições litoestratigráficas, pois esta metodologia como apresentado nos resultados pode verificar a interface do calcário laminado para e calcário intemperizado, mas não pode ser verificado a interface e de calcário laminado para o calcário com marga, pois vale lembrar que a marga é composta de argila, matéria orgânica e calcário, onde a argila apresenta baixo valor de permissividade dielétrica o que não representa um forte refletor a ser interpretados nas seções radargramas.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, P. R. O. 2003. *Mapeamento de Detalhe em Sub-superfície com GPR: Associação de Fácies e Evolução Quaternária do Sistema Costeiro de Galinhos-RN*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Relatório nº 189, p 76.

ASSINE, M L. 2007. *Bacia do Araripe*. B. Geociências. Petrobrás, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p 371- 389.

BRUNETTA, R. 2005. *O Processamento da Sísmica de Reflexão Rasa- Desafios Encontrados no Estudo de Modelos Análogos a Reservatórios Fraturados*. Universidade Federal do Paraná. Dissertação de Mestrado, p 57.

Buursink, M. L. and Lane J. W., Jr., 1999, *Characterizing fractures in a bedrock outcrop using ground-penetrating radar at Mirror Lake, Grafton County, New Hampshire*, in *Morganwalp*, D.W. and Buxton, H.T., eds., U.S. Geological Survey Toxic Substances Hydrology Program -- Proceedings of the Technical Meeting, Charleston, South Carolina, March 8-12, 1999: USGS Water-Resources Investigations Report 99-4018C, v. 3, p. 769-776.

Chang, H.K.; Roswmann, R.O. & Figueiredo, A.M.F. 1988. *New concepts on the development of east brazilian basin*. Episodes. 11(3):194-202.

DIAS, G. A.N. 2007. *Modelagem e Imageamento dos dados de GPR adquiridos em afloramentos visando o estudo de reservatório petrolífero*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado da UFRJ. p. 38, 83, 93, 119, 122, 123, 135, 137.

FRANCO, L. S. 2004. *Levantamento GPR em rochas carbonáticas na bacia Sergipe-Alagoas*. Programa de Pós-graduação em Geofísica, Ministério da Ciência e Tecnologia, Observatório Nacional. Dissertação de Mestrado. p.1, 16, 44.

GOMES, A. B. 2006. *Processamento de Dados Sísmicos Reais da Região Amazônica*. Universidade Federal do Pará. Dissertação de Mestrado, p 31.

Google earth-Mapas. [Http://mapas;google.com](http://mapas;google.com). Consultada em 2009.

HARRY, M. J. 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Editora Elsevier Science. Amsterdam, p 154.

IZARGAIN, J. J. L. 2004. *Técnicas de procesado de datos de georradar y su aplicación al estudio del régimen termodinámico de los glaciares frios y politérmicos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, p 73,78, 80, 83, 99, 134.

L.A. BIZZI, C. Schobbenhaus, R. Vidotti & J.H.Gonçalves (eds) 2003. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil – cap iii, Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira*. Webster Ueipass Mohriak, p. 87-94. CPRM.

L.A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. Vidotti & J.H.Gonçalves (eds) 2003. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil – cap ii, Bacias Sedimentares Paleózoicas e Meso-cenozóicas Interiores*. Augusto J Pedreira da Silva, Ricardo da Cunha Lopes, Antonio Maurilio Vasconcelos, Rui B.C. Bahia, p. 55-81. CPRM

- MATOS, R. M. D. 1992. The northeast brazilian rift system tectonics, 11 (4): p.766-791
- MARTILL, D. M. 2007. *The Crato Fossil Beds of Brazil*, Cambridge University. p. 11.
- MEDEIROS, S. C. A. 2005. *Inversão de Parâmetros em Dados Sísmicos por Algoritmos Genéticos*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, p 27.
- MIRANDA, F. A. 2007. *Integração e Interpolação de Dados de Anomalias AR Livre Utilizando-se a Técnica de RNA e Krigagem*. In: Simpósio Brasileiro de Geomática. São Paulo. Presidente Prudente, UNESP. p.24-27.
- FREITAS P., Leal A. B. & BORGHI L. 2011. *Estratigrafia de Alta Resolução do Intervalo Siliciclástico Aptiano da Bacia do Araripe*. *Revista Geociências*, vol 30, nº 4,UNESP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. São Paulo.
- RODRIGUES, S., I. 2004. *Caracterização GPR de tambores metálicos e plásticos: estudo sobre o sitio controlado do IAG-USP*. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado, p. 50.
- SILVA, A. L. 2003. *Estratigrafia Física e Deformação do Sistema Lacustre Carbonático (aptiano-albiano) da Bacia do Araripe em Afloramentos Selecionados*. Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação de Mestrado, p. 23.
- VIANA, M. S. S. & Neumann V. H. L.. 1999. *Membro Crato da Formação Santana, Chapada do Araripe, CE*. Riquíssimo registro de fauna e flora do Cretáceo. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D.A. ; Queiroz, E.T.; Winge, M. ; Berbert-Born, M.; SIGEP. v 01.p.119.