

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DIEGO SILVA DA ROCHA

**UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE GPR (*GROUND PENETRATING
RADAR*) PARA A CARACTERIZAÇÃO DE UNIDADES GEOLÓGICAS
NA CIDADE DE VITÓRIA (ESPÍRITO SANTO, SUDESTE DO BRASIL)**

VITÓRIA
2019

DIEGO SILVA DA ROCHA

UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE GPR (*GROUND PENETRATING RADAR*) PARA A CARACTERIZAÇÃO DE UNIDADES GEOLÓGICAS NA CIDADE DE VITÓRIA (ESPÍRITO SANTO, SUDESTE DO BRASIL)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geografia, na área de concentração Dinâmica dos Territórios e da Natureza.

Orientadora: Prof^a Dr^a Luiza Leonardi Bricalli

Coorientador: Prof^o Dr^o Patricio José Moreira Pires

VITÓRIA

2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

R672u Rocha, Diego Silva da, 1984-
Utilização da técnica de GPR (Ground Penetrating Radar) para a caracterização de unidades geológicas na cidade de Vitória (Espírito Santo, Sudeste do Brasil) / Diego Silva da Rocha. - 2019.

107 f. : il.

Orientadora: Luiza Leonardi Bricalli.

Coorientador: Patricio José Moreira Pires.

Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais.

1. Ground Penetrating Radar. 2. Neotectônica. 3. Padrões estruturais. 4. Método Eletromagnético. I. Bricalli, Luiza Leonardi. II. Pires, Patricio José Moreira. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Humanas e Naturais. IV. Título.

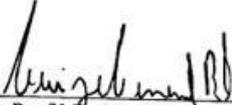
CDU: 91

**“UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE GPR
(GROUND PENETRATING RADAR) PARA A
CARACTERIZAÇÃO DE UNIDADES
GEOLÓGICAS NA CIDADE DE VITÓRIA
(ESPÍRITO SANTO, SUDESTE DO BRASIL)”**

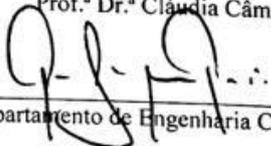
DIEGO SILVA DA ROCHA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Aprovada em 22 de fevereiro de 2019.


Prof.^a Dr.^a Luiza Leonradi Bricalli (Orientadora)


Prof.^a Dr.^a Cláudia Câmara do Vale)


Prof. Dr. Patricio José Moreira Pires (Departamento de Engenharia Civil - UFES)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e aos demais seres que me transmitem amor e paz do plano espiritual, aos meus avós que sempre me encontram em oração e que acredito que me acompanham sempre que sou digno.

O caminho da ciência tem sido de insegurança e dificuldade, no entanto vim ao mundo com a sorte de quem pode contar com seres femininos iluminados que sempre me guiam, deixo aqui a minha saudação as mulheres que prevalecem com graça e inteligência nesse mundo tão agressivo a sua existência, dentre as mesmas agradeço a três mulheres que foram mais do que especiais nesses últimos dois anos:

A minha orientadora Prof^a Dr^a Luiza Leonardi Bricalli pela orientação científica e pessoal, sou grato por todos os momentos de conversas, ensinamentos e ideias, serei eternamente grato por toda a sua atenção e jamais esquecerei da sua perseverança de seguir firme mesmo em dois anos tão difíceis, tens aqui um amigo grato e solícito para qualquer momento. Que assim como tu sigamos todos em frente, sempre!

Agradeço a minha mãe que desde muito cedo me ergue das quedas e vibra com as minhas pequenas vitórias nas batalhas da vida. Tu é meu porto seguro, saiba que faço minha missão de vida aproveitar todas as oportunidades que a senhora insiste em dizer que eu sou capaz. Se luto tanto para ser algo na vida é porque sonho em um dia estar à altura de todos os sacrifícios que fez por mim.

A minha Nany que partilhou desse sonho como se fosse seu, agradeço por todos os finais de semana de amor e cuidado enquanto eu não podia ser o mais presente na sua vida, espero partilhar de uma vida toda contigo para estar à altura de todo o seu carinho por mim, saiba que a amo imensamente e que agradeço a nosso Deus todos os dias por ter você no meu coração. Tenho muito orgulho de ti, sem você eu estaria sem lugar nesse mundo. Se eu pudesse escolher novamente os meus caminhos saiba que eu escolheria sempre o que me leva para tu, você é a minha única certeza.

Aos meus amigos e companheiros de laboratório, em especial a Wemerson, Jane, Gustavo, Thalles, Renato, Cirla, Ricardo, Wesley e James. Nossas conversas alegraram imensamente o meu dia-a-dia e contribuíram em muito para o meu aprendizado. Sou grato por ter o prazer de conviver com vocês.

Por fim agradeço a todos os senhores e senhoras que contribuíram de alguma forma para o meu trabalho nesses últimos dois anos, seja por uma conversa amistosa dentro de um ônibus, seja por dizer que vou conseguir enquanto eu lutava para sobreviver atrás de um volante ou seja por simplesmente dar um bom dia. Espero que Deus transmita o meu agradecimento a todos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*“Out of the night that covers me,
Black as the pit from pole to pole,
I thank whatever gods may be
For my unconquerable soul.*

*In the fell clutch of circumstance
I have not winced nor cried aloud.
Under the bludgeonings of chance
My head is bloody, but unbowed.*

*Beyond this place of wrath and tears
Looms but the Horror of the shade,
And yet the menace of the years
Finds, and shall find me, unafraid.*

*It matters not how strait the gate,
How charged with punishments the scroll,
I am the master of my fate:
I am the captain of my soul."*

Invictus - William Ernest Henley (1888)

RESUMO

Este estudo tem como objetivo caracterizar, através de método eletromagnético, 2 (duas) unidades geológicas na região metropolitana de Vitória-ES, utilizando a técnica de GPR- *Ground Penetrating Radar*. Objetivos secundários visam investigar litotipos e estruturas geológicas, delimitar contatos entre aterros e embasamento Pré-Cambriano, investigar e descrever arranjos de estruturas geológicas e demonstrar a assinatura geofísica das unidades estudadas. A área de estudo corresponde a 2 (dois) ambientes geológicos-geomorfológicos na cidade de Vitória (Espírito Santo, Sudeste do Brasil): i) área do campus da UFES (Goiabeiras), correspondente a Depósitos fluvio-argilosos arenosos e arenosos recentes; ii) área da Pedra da Cebola, correspondente ao Maciço Vitória. Foram realizados 5 (cinco) perfis geofísicos, em diferentes orientações, de forma que as diferentes características de subsuperfície fossem abordadas e representadas no radargrama. Os perfis possuíam comprimento de até 52m (cinquenta e dois metros) e foram analisados até a profundidade de aproximadamente 6m (seis metros). A aquisição de GPR foi realizada com antena de 270 MHz (duzentos e setenta megahertz), o caminhamento foi realizado utilizando o método do afastamento constante aonde as antenas permanecem a uma distância constante uma da outra. Os perfis de GPR foram processados através do programa RADAN7®, utilizando processamento avançado de dados até que a imagem obtida apresentasse refletores e anomalias bem demarcados. Os dados dos radargramas mostraram dois aspectos geológicos importantes: limite de unidades geológicas bem marcantes e presença de estruturas geológicas. Tanto os lineamentos sobre a imagem como as medidas em campo mostraram que as estruturas NE-SW são muito bem marcadas, secundariamente estruturas NNW-SSE e E-W. Essas estruturas podem estar associadas a controles litoestruturais e tensões neotectônicas. O método demonstrou uma fácil e rápida

aplicação, destacando-se aqui uma otimização de tempo e custo para análise de material em subsuperfície.

PALAVRAS-CHAVE: *Ground Penetrating Radar*, Método Eletromagnético, Geofísica, Padrões Estruturais.

ABSTRACT

This study aims to characterize, by electromagnetic method, two (2) geological units in the metropolitan region of Vitória-ES, using the GPR- Ground Penetrating Radar technique. Secondary objectives are to investigate lithotypes and geological structures, to delineate contacts between landfills and Precambrian basement, to investigate and describe geological structure arrangements and to demonstrate the geophysical signature of the studied units. The study area corresponds to two (2) geological-geomorphological environments in the city of Vitória (Espírito Santo, Southeastern Brazil): i) campus area of the UFES (Goiabeiras), corresponding to recent sandy and muddy fluvial deposits; ii) Pedra da Cebola area, corresponding to the Vitória Massif. Five (5) geophysical profiles were realized, in different orientations, so that the different subsurface characteristics were approached and represented in the radargram. The profiles had a length of up to 52m (fifty two meters) and were analyzed to the depth of approximately 6m (six meters). The acquisition of GPR was performed with a 270 MHz (two hundred and seventy megahertz) antenna, the walking was performed using the constant distance method where the antennas remain at a constant distance from each other. The GPR profiles were processed through the RADAN7® program, using advanced data processing until the image obtained showed well-defined reflectors and anomalies. The data of the radargrams showed two important geological aspects: limit of very marked geological units and presence of geological structures. Both image line and field measurements showed that NE-SW structures are very well marked, secondarily NNW-SSE and E-W structures. These structures may be associated with lithostructural controls and neotectonic tensions. The method demonstrated an easy

and fast application, highlighting here an optimization of time and cost for analysis of material in subsurface.

KEYWORDS: Ground Penetrating Radar, Electromagnetic Method, Geophysical, Structural Patterns.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo com suas principais vias de acesso e cursos d'água.....	20
Figura 2 - Mapa geológico do estado do Espírito Santo.....	21
Figura 3 - Mapa evidenciando a Província Mantiqueira, na região sudeste do Brasil, sobre modelo digital de elevação. Dentro do retângulo vermelho estão as áreas da Faixa Ribeira e a Faixa Araçuaí.	22
Figura 4 - Localização geográfica da bacia sedimentar do Espírito Santo.	26
Figura 5 - Carta estratigráfica simplificada da Bacia do Espírito Santo.....	27
Figura 6 - Porção terrestre da bacia do Espírito Santo com a suas quatro regiões morfoestruturais e importantes formações.	28
Figura 7 - Mapa Geológico correspondente a Folha Vitória (1:100.000) da área de estudo.	36
Figura 8 - Mapa de geomorfologia englobando os principais Domínios Morfoestruturais, regiões e unidades geomorfológicas do estado do Espírito Santo.	38
Figura 9 - Mapa demonstrando as principais unidades geomorfológicas da área de estudo.	43
Figura 10 - Mapa Pedológico da área de estudo.....	44
Figura 11 - Composição básica de um sistema GPR.....	48
Figura 12 - Técnica de aquisição de perfil de reflexão com afastamento constante.	48
Figura 13 - Técnica de aquisição de perfil de sondagem de velocidade.	49
Figura 14 - Técnica de trans-iluminação ou Tomografia.	50
Figura 15 - Radargrama de um perfil utilizando a antena de 100 MHz: (WV-A,B) Limite de fácies de radar; (WV-1,2) Radar fácies; (WT) Lençol freático; e (WVSL-B) Interseção com linha de aquisição B.....	54
Figura 16 - Radargrama obtido utilizando a antena de 100 MHz. Observar a presença de hipérbolas entre dez e vinte metros, as mesmas foram interpretadas como geradas por cavidades no arenito.	55
Figura 17 - Radargrama adquirido utilizando antenas de 50 MHz.	56

Figura 18 - Seção de direção NW – SE aonde se observa: A) Dado processado. B) Interpretação do dado aonde são demonstrados alguns elementos que corroboram a paleomorfologia formado do Spit na região de Galinhos – RN.	58
Figura 19 - Radargrama correlacionando a seções geológicas e interpretações obtidos na localidade de Araçatiba (ES).	59
Figura 20 - Bloco diagrama gerado a partir da aquisição de campo com antenas de 250 MHz.	60
Figura 21 - Perfil adquirido na área de estudo demonstrando as zonas de sombra associadas a liquido lixiviado e dois refletores definidos como veios de quartzo.....	61
Figura 22 - Radargrama de antena não-blindada com frequência de 250 MHz.	62
Figura 23 - Radargrama interpretado em: f7) Leques de transposição; f7a) Foresets de transposição; f8) Esporão lagunar; f9) Depósito lagunar.	63
Figura 24 - Fluxograma detalhado demonstrando as etapas realizadas na elaboração da pesquisa.	65
Figura 25 - Etapas de processamento dos métodos Common-offset utilizado na presente pesquisa.	69
Figura 26 - Tipos de reflexões encontradas em litologias diversas.	72
Figura 27 - GPR GSSI3000 com a antena de 270MHZ, 1) Equipamento completo, vista do operador; 2) Equipamento em perfil; 3) Unidade de controle; 4) Antena de 270 MHz.	74
Figura 28 - Técnica de aquisição de perfil de reflexão com afastamento constante.	77
Figura 29 - Mapa de lineamentos da área que abrange os pontos estudados sobre MDE na iluminação de 315°. Diagrama de rosetas demonstrando a maior densidade de orientações dos lineamentos (verde) assim como a mediana das orientações (vermelho) e as demais orientações (azul).....	79
Figura 31 - Mapa de localização do transecto 1, mostrando a direção do Radargrama elaborado na orientação 020 (NE-SW), localizado na UFES (<i>Campus</i> de Goiabeiras) – Afloramento da antiga PETROBRAS.	81
Figura 32 – Rocha plutônica (porção superior da foto) e aterro da área da UFES (<i>Campus</i> Goiabeiras) antiga Petrobrás (porção inferior da foto), com destaque para o transecto, mostrando a orientação de elaboração do radargrama.	82
Figura 33 – Detalhe do transecto, mostrando a orientação de elaboração do radargrama no aterro da área da UFES (<i>Campus</i> Goiabeiras) antiga Petrobrás.	82
Figura 34 - Granito porfirítico do afloramento da UFES (<i>Campus</i> Goiabeiras) antiga Petrobrás, também observado em todo o Maciço Vitória.	83
Figura 35 - Figura representando os autólitos encontrados na rocha plutônica do afloramento da UFES (<i>Campus</i> Goiabeiras) antiga Petrobrás, demarcado em vermelho na foto.....	84
Figura 36 - Fratura presente no afloramento, observa-se o espaçamento da mesma que pode variar entre milimétrico a decimétrico.	85
Figura 37 - Radargrama da área da UFES (<i>Campus</i> Goiabeiras) antiga Petrobrás demonstrando as três unidades descritas (unidade de aterro, unidade de embasamento e unidade de paleossolo) demarcadas.	86
Figura 38 - Perfil de eletrorresistividade realizado na mesma direção do radargrama 01.	87
Figura 39 - Principais assinaturas geofísicas da área estudada.	88
Figura 40 - Mapa de localização dos transectos da área da Pedra da Cebola.	89

Figura 41 - Representação do ponto estudado.	90
Figura 42 - Granitóide encontrado no ponto de estudo.	91
Figura 43 - Granito com fraturas preenchidas por solo no ponto de estudo.....	91
Figura 44 - Radargrama 02, área localizada no Parque Pedra da Cebola.	93
Figura 45 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado.....	94
Figura 46 - Radargrama 03, área localizada no Parque Pedra da Cebola.	95
Figura 47 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado.....	96
Figura 48 - Radargrama 04, área localizada no Parque Pedra da Cebola.	97
Figura 49 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado.....	99
Figura 50 - Radargrama 05, área localizada no Parque Pedra da Cebola.	100
Figura 51 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado.....	101

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Constante dielétrica (ϵ) e condutividade elétrica (σ), em materiais comuns.	52
Tabela 2 - Antenas configuradas para utilização em material geológico.....	74
Tabela 3 - Composição mineralógica das amostras coletadas.	83
Tabela 4 - Composição mineralógica das amostras coletadas.	90

LISTA DE SIGLAS

CMP – *Common Midpoint*

GPR – *Ground Penetrating Radar*

MDE – *Modelo Digital de Elevação*

MHz - *Megahertz*

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

SPT - *Standard Penetration Test*

TWT – *Two Way Travel*

WARR – *Wide angle reflection and refraction*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	17
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	17
2.1.1.	Objetivos específicos	18
3.	ÁREA DE ESTUDO	18
3.1.	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA.....	19
3.2.	GEOLOGIA.....	21
3.2.1.	Geologia Regional	21
3.2.1.1.	Embasamento Pré-Cambriano	21
3.2.1.2.	Bacia do Espírito Santo	25
3.2.1.3.	Cobertura Detrítico-lateríticas.....	30
3.2.1.4.	Depósitos Quaternários	31
3.2.1.5.	Geologia Estrutural, Neotectônica e lineamentos.....	32
3.2.2.	Geologia das áreas selecionadas	34
3.3.	GEOMORFOLOGIA	37
3.3.1.	Geomorfologia Regional	37
3.3.1.1.	Domínios Morfoestruturais, Regiões e Unidades Geomorfológicas	38
3.3.2.	Geomorfologia da área	41
3.3.2.1.	Domínios Morfoestruturais, Regiões e Unidades Geomorfológicas	41
3.4.	SOLOS	42
4.	REFERENCIAL TEÓRICO	45

4.1.	HISTÓRICO DE UTILIZAÇÃO DO GPR.....	45
4.2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-CONCEITUAL	46
4.1.1.	Princípios físicos da reflexão de ondas eletromagnéticas do GPR	50
4.3.	ESTUDOS DE CASO	53
5.	METODOLOGIA.....	64
5.1.	ANÁLISES DE GABINETE	65
5.1.1.	Revisão bibliográfica e de dados cartográficos	65
5.1.2.	Elaboração de mapa de localização, edição de mapa geológico e interpretação de fotografias aéreas.....	66
5.1.3.	Lineamentos	67
5.1.4.	Processamento de dados de campo.....	67
5.1.5.	Interpretação de radargramas	71
5.2.	ANÁLISES DE CAMPO	72
5.2.1.	Coleta de dados	76
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
6.1.	ANÁLISE DE LINEAMENTOS.....	78
6.2.	ANÁLISE GEOFÍSICA	80
6.2.1.	UFES (<i>Campus</i> de Goiabeiras) – Afloramento da antiga PETROBRAS	80
6.2.1.1.	Radargrama 01 (NE-SW)	85
6.2.2.	Parque Pedra Da Cebola	88
6.2.2.1.	Radargrama 02 (NE-SW)	92
6.2.2.2.	Radargrama 03 (E-W)	94
6.2.2.3.	Radargrama 04 (NW-SE)	96
6.2.2.4.	Radargrama 05 (E-W)	99
7.	CONCLUSÕES	102
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1. INTRODUÇÃO

O Espírito Santo é uma das unidades mais antigas da federação, no entanto, carece de informações geológicas e geofísicas em uma escala que represente suas unidades litológicas e características estruturais em detalhe. Nas últimas décadas foram realizados trabalhos em escalas regionais (SILVA *et al.*, 1987; CPRM, 2015) objetivando o desenvolvimento do conhecimento geológico e científico capixaba. Por ser um estado produtor de rochas ornamentais nas porções norte e sul, existe uma maior concentração do desenvolvimento geológico nessas regiões, inclusive contando com duas escolas de Geologia nessas localidades geográficas.

A cidade de Vitória, capital do estado, possui um contexto geológico pouco estudado, com estudos de subsuperfície através de sondagens SPT (*Standard Penetration Test*) em sua maioria direcionados para a indústria da construção civil, já que o município possui diversos tipos de empreendimentos imobiliários. Existe uma carência de estudos geológicos e geofísicos em escalas de detalhe que delimitem unidades geológicas e suas respectivas estruturas, especialmente nas rochas do embasamento pré-Cambriano e nas rochas dos depósitos sedimentares. Devido a existência de pavimentação, aterros e impermeabilização do solo é importante a utilização de técnicas indiretas de investigação em subsuperfície através da geofísica, o mais utilizado em áreas urbanas é o GPR (*Ground Penetrating Radar*).

O GPR é um equipamento científico utilizado em pesquisas das área de ciências da Terra que utiliza o método eletromagnético baseado na propagação de ondas eletromagnéticas em subsuperfície. Utiliza ondas de rádio para sondar a subsuperfície, o que significa detectar qualquer perda em material dielétrico. O GPR vem sendo aplicado na ciência já a algumas décadas, mas apenas nos últimos anos existiu um desenvolvimento substancial para diversos campos de aplicações da técnica. Alguns desses campos são: i) Geotecnia; ii) Meio Ambiente; iii) Hidrogeologia; iv) Investigações Forenses; v) Estudos Costeiros; vi) Geomorfologia; e vii) Geologia (NEAL *et al.*, 2000).

Importantes trabalhos foram responsáveis pelo desenvolvimento da técnica GPR, podemos citar alguns como Reynolds (2011), Neal *et al.*, (2000), Borges (2002) e Borges (2007), no entanto existe ainda a necessidade de desenvolver estudos geofísicos nas unidades geológicas capixabas.

Segundo Overmeeren *et al.*, (1997) a técnica GPR possui algumas particularidades técnicas, que se destacam positivamente e negativamente. As que se destacam positivamente são a características não destrutivas e as altas resoluções laterais e verticais, e as que se destacam negativamente, são a baixa profundidade de penetração e a dificuldade em determinar a profundidade real dos alvos.

Desta forma, essa pesquisa aborda a utilização da técnica de GPR em diferentes ambientes geológico-geomorfológicos do estado do Espírito Santo, tais como embasamento cristalino e zonas de aterro, procurando-se delimitar unidades geológicas e apontar estruturas geológicas em subsuperfície.

A utilização desta técnica procura suprir especialmente 2 (duas) grandes dificuldades na pesquisa científica, especialmente na análise de subsuperfície: tempo e recurso financeiro. O GPR (*Ground Penetrating Radar*) pode substituir, por exemplo, a utilização de sondagens SPT e/ou rotativas na análise de subsuperfície. Consubstancialmente pode ser considerado um diferencial técnico para pesquisas de geomorfologia e geologia no Brasil e no mundo, contribuindo para o aprimoramento técnico dessas ciências, com resultados precisos, de boa resolução e qualitativos da subsuperfície. Por fim, o estudo proposto pretende ser difundido na comunidade científica e social, a fim de que seja aprofundado a utilização da geofísica rasa para o estudo e a solução de problemas geomorfológicos, geológicos-geotécnicos e assim podendo contribuir para a análise da dinâmica do espaço geográfico.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo dessa pesquisa é caracterizar a subsuperfície de 2 (dois) ambientes geológicos-geomorfológicos na cidade de Vitória (Espírito Santo, Sudeste do Brasil), a partir da utilização da técnica de GPR (*Ground Penetrating Radar*).

2.1.1. Objetivos específicos

A presente pesquisa apresenta como objetivos específicos:

- Reconhecer litotipos e estruturas geológicas em subsuperfície;
- Delimitar o contato entre rochas do embasamento pré-cambriano e o material de aterro;
- Identificar e descrever os arranjos das estruturas geológicas em subsuperfície;
- Descrever camadas e estruturas sedimentares em subsuperfície;
- Caracterizar a assinatura geofísica dos principais litotipos presentes na área de estudo;
- Demonstrar que a assinatura geofísica dos refletores referentes aos granitos porfiríticos do Maciço Vitória obedecem os padrões horizontais e sub-horizontais característicos desse tipo de rocha em outras formações;
- Apontar a eficácia da utilização de GPR (*Ground Penetrating Radar*) para otimização das pesquisas relacionadas à caracterização de rochas e solos em subsuperfície, especialmente.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa corresponde a 2 (dois) ambientes geológicos-geomorfológicos na grande Vitória (Espírito Santo, Sudeste do Brasil): i) área de rochas do embasamento pré-Cambriano (Parque Pedra da Cebola, município de Vitória); ii) área de aterro (UFES, campus de Goiabeiras, município de Vitória).

Os 2 (dois) ambientes geológicos-geomorfológicos escolhidos foram caracterizados segundo seus aspectos geológicos e geomorfológicos tanto

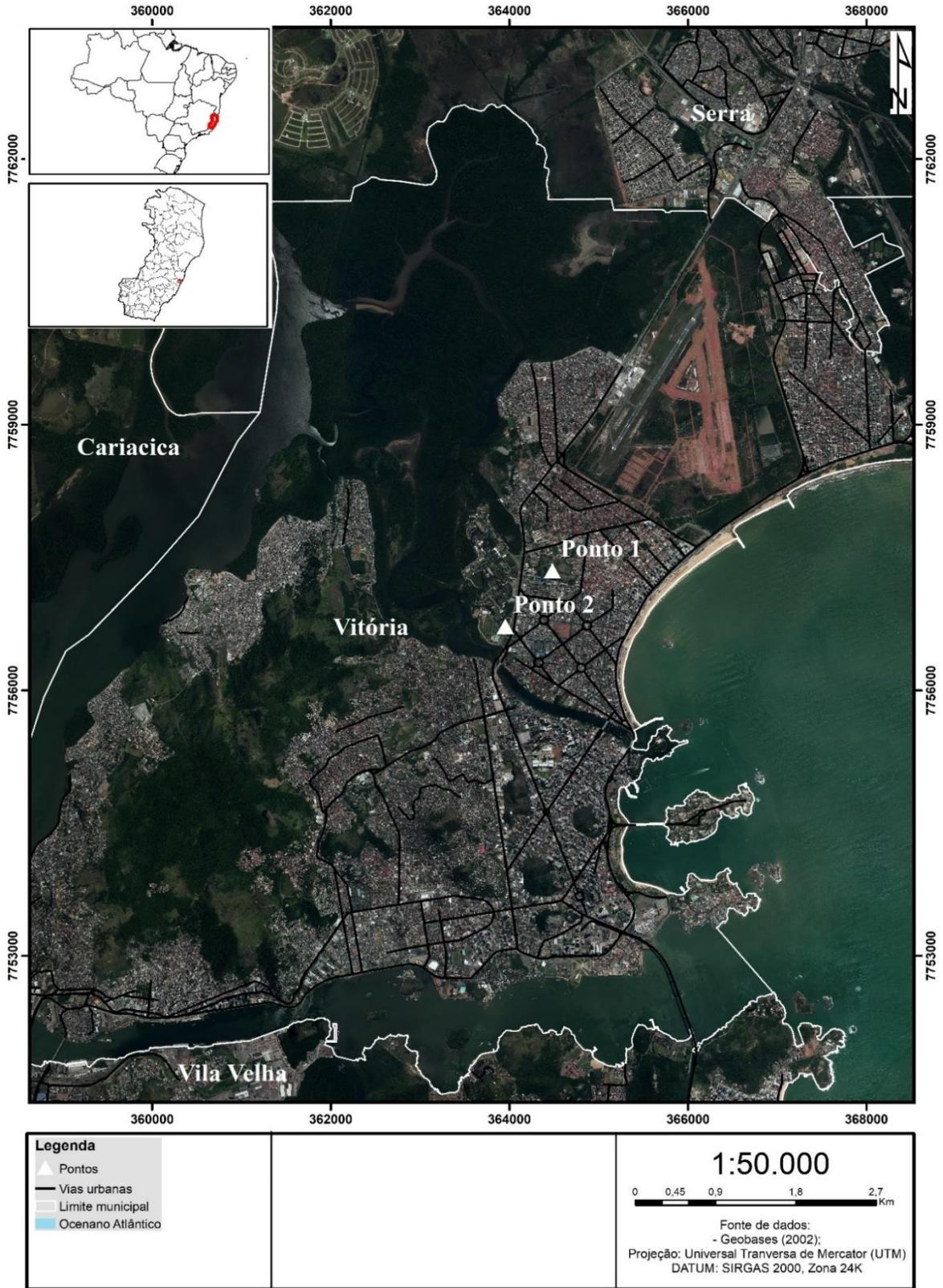
regionalmente quanto localmente para que se possa correlacionar essas características em escalas de observação diferentes.

3.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

Os pontos de estudo estão localizados no município de Vitória, estado do Espírito Santo, região Sudeste do Brasil (Figura 1). O estado do Espírito Santo faz fronteira com os estados da Bahia a norte, Minas Gerais a oeste e noroeste, Rio de Janeiro a sul e ao oceano Atlântico a leste. Apresenta uma área de 46.095.583 km² (IBGE, 2010).

As principais vias de acesso para a área de estudo são as rodovias federal BR-101, estadual ES-010 e a avenida Fernando Ferrari. A rodovia federal BR-101 atravessa o estado de norte a sul interligando o Espírito Santo aos estados da Bahia e do Rio de Janeiro. A Avenida Fernando Ferrari é uma importante via do município de Vitória, sendo responsável por interligar bairros como Goiabeiras, Jardim da Penha e Jabour, e a rodovia estadual ES-010 conecta o município de Vitória a fração litorânea do município da Serra.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo com suas principais vias de acesso e cursos d'água.



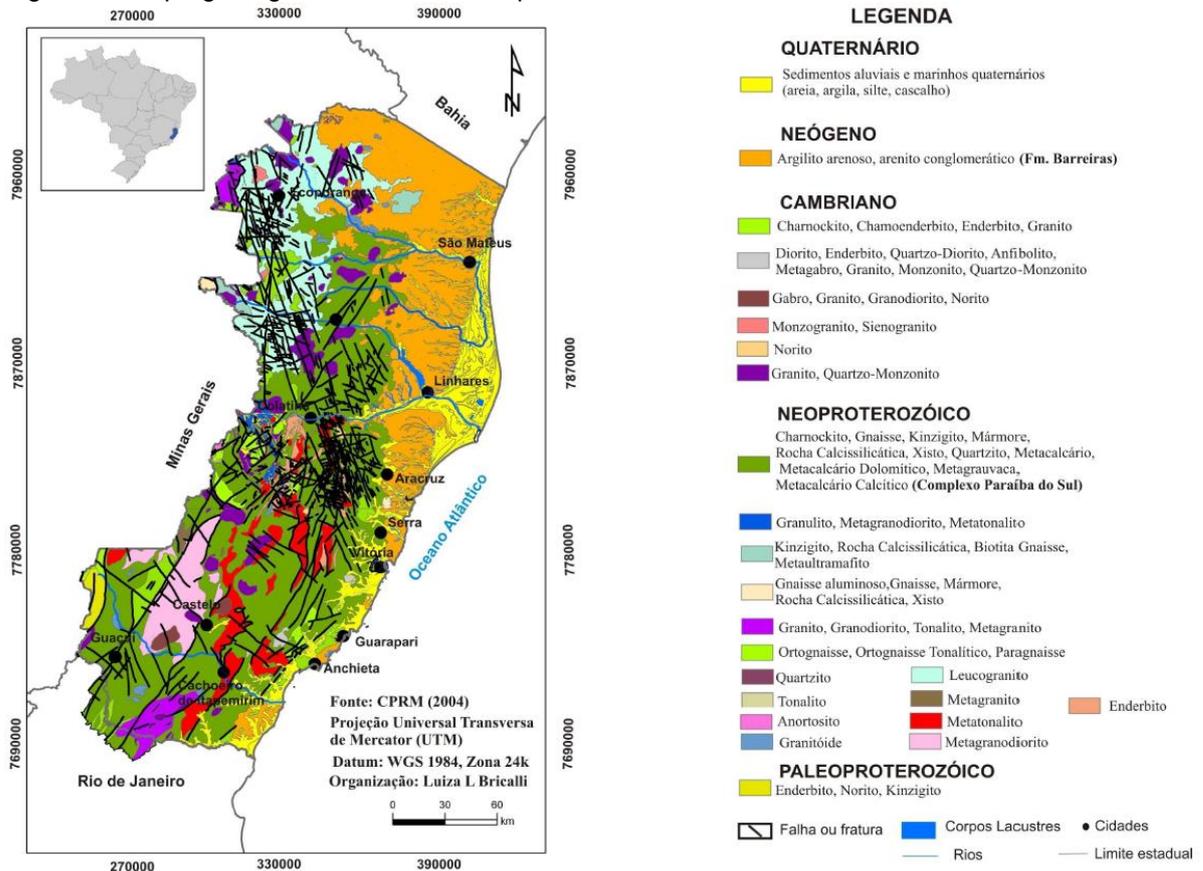
Organização: Diego Silva da Rocha.

3.2. GEOLOGIA

3.2.1. Geologia Regional

A geologia do estado do Espírito Santo (Figura 2) pode ser dividida em dois compartimentos principais: i) Embasamento pré-Cambriano constituído basicamente de rochas ígneas e metamórficas; e ii) Depósitos sedimentares cenozoicos, constituídos pela Formação Barreiras e por depósitos quaternários da bacia do Espírito Santo (BRICALLI, 2011).

Figura 2 - Mapa geológico do estado do Espírito Santo.



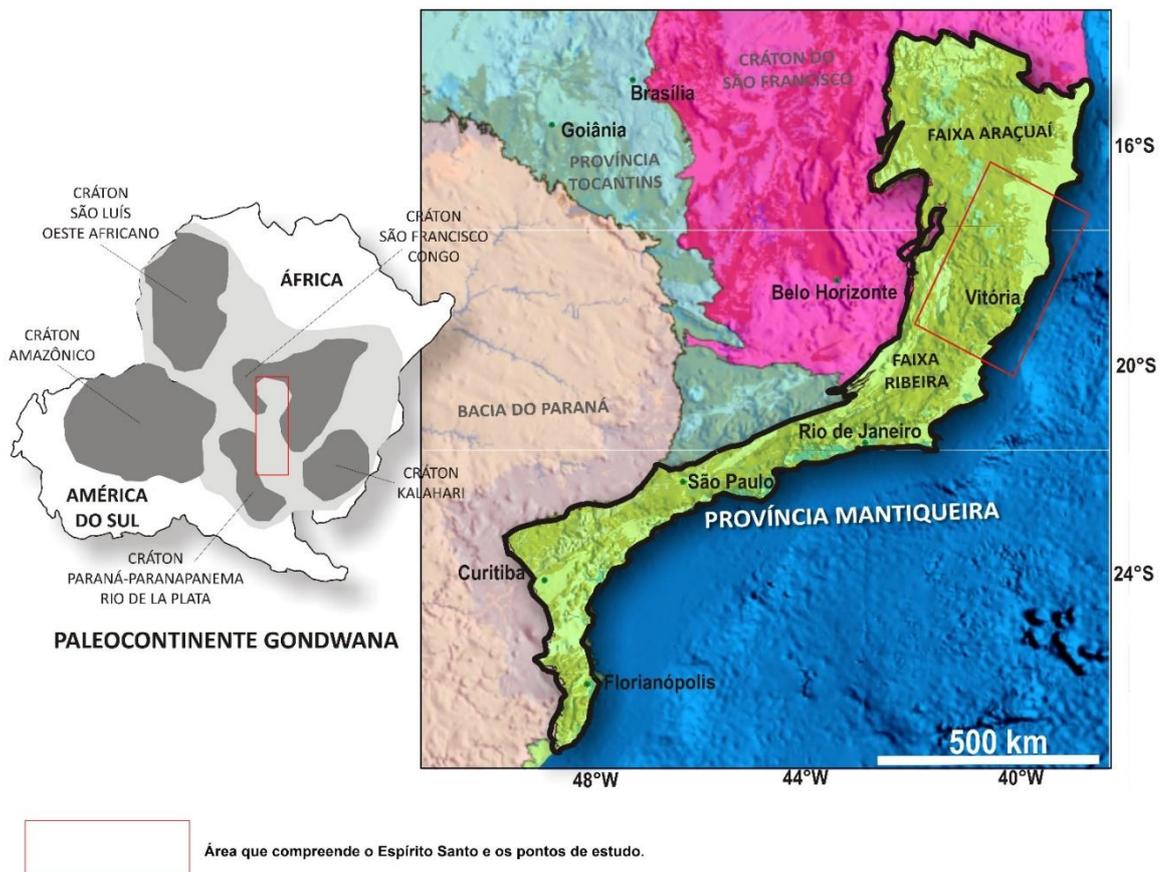
Fonte: Bricalli (2011)

3.2.1.1. Embasamento Pré-Cambriano

A rochas correspondentes ao embasamento pré-Cambriano da área de estudo foram geradas durante o Ciclo Brasileiro e estão ligadas a uma complexa

associação de rochas ígneas e metamórficas da Província Mantiqueira (Figura 3). O sistema Orogênico Mantiqueira se estende da Bahia ao Uruguai em uma área de aproximadamente 700000 km² e é constituído pelos orógenos Araçuaí, Ribeira, Dom Feliciano, São Gabriel e pelas zona de interferência entre os orógenos Brasília e Ribeira (HEILBRON, *et al.*, 2004).

Figura 3 - Mapa evidenciando a Província Mantiqueira, na região sudeste do Brasil, sobre modelo digital de elevação. Dentro do retângulo vermelho estão as áreas da Faixa Ribeira e a Faixa Araçuaí.



Fonte: Bricalli (2011).

No estado do Espírito Santo predominam os orógenos Araçuaí e Ribeira (TUPINAMBÁ *et al.*, 2013).

O Orógeno Araçuaí se estende do Crátón São Francisco até o litoral atlântico e está localizado entre os paralelos 15° e 21°, sendo que, no paralelo 21° se observa uma transição do Orógeno Araçuaí para o Orógeno Ribeira. Essa mesma transição tem como característica a mudança da estruturação de direção NNE, a norte, para NE, a sul (HEILBRON, *et al.*, 2004).

Segundo Pedrosa-Soares *et al.*, (2013) o Orógeno Araçuaí é caracterizado como um conjunto orogênico Neoproterozóico-cambriano, que é parte pertencente da reentrância originada pelos crátons do Congo e São Francisco, seus componentes geotectônicos evidenciam um sistema orogênico colisional que sucede um sistema orogênico acrescionário de margem ativa. Os componentes geotectônicos evidenciadores são: depósitos de margem passiva, lascas ofiolíticas, zona de sutura, arco magmático, granitos sin-colisionais e plutonismo pós-colisional. O Orógeno possui uma característica intrínseca que é o seu confinamento a reentrância, implica na ligação parcial dos crátons São Francisco e Congo durante a tectonogênese tafoniana (2 Ga) até a abertura do Atlântico Sul por meio da ponte Gabão.

A compartimentação tectônica do Orógeno é subdividida em três domínios principais (HEILBRON *et al.*, 2004), são eles:

i) Domínio externo: que faz fronteira com o Cráton do São Francisco e tem como principal característica uma faixa de dobramentos e empurrões. Possui transporte tectônico contra o Cráton do São Francisco e no limite oriental faz fronteira com o Grupo Macaúbas. A oeste se localizam os níveis crustais mais profundos originados na Orogênese Brasileira;

ii) Domínio interno: núcleo metamórfico-anatético do orógeno e com ocorrência de grande quantidade de rochas originadas em diferentes estágios da Orogênese brasileira. A sul do paralelo 19° existe uma região com rochas de alto grau metamórfico, a norte desse mesmo paralelo existe uma zona de anatexia sin e pós-colisional, rica em granitos do tipo S, na parte ocidental do domínio predomina o transporte tectônico para sudoeste;

iii) Inflexão setentrional: caracterizada por feições tectônicas com estruturas brasileiras para leste. Apresenta característica dos dois domínios quanto a seu metamorfismo, o mesmo cresce em grau de norte a sul, começando na fácies xisto verde dentro do limite cratônico, indo até a fácies anfíbolito no território do núcleo metamórfico-anatético.

São reconhecidos 4 (quatro) estágios orogênicos, que são: i) Pré-colisional (630-580 Ma); ii) Sin-colisional (580-560 Ma); iii) Tardi-colisional (560-530 Ma) e; iv) Pós-colisional (530-490 Ma). Os estágios são estabelecidos por assinaturas

geoquímicas e isotópicas, relações estruturais e idades U-Pb das rochas (PEDROSA-SOARES *et al.*, 2013).

O limite entre as faixas Ribeira e Araçuaí ainda é arbitrário, devido à ausência de estruturas marcantes que delimitem diferentes evoluções tectônicas (TUPINAMBA *et al.*, 2013).

Machado *et al.*, (1996) aborda que a parte central da Faixa Ribeira se estende do sudeste do estado de Minas Gerais, abrangendo boa parte do estado do Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná. Caracterizou a gênese da faixa como originada durante a orogenia brasiliana e identifica que as suas estruturas de larga escala resultam de uma compressão contra o cráton São Francisco no norte e na parte mais central. A área é composta por séries de pulsos empilhados, sob condições metamórficas de grau anfíbolito, em escala crustal.

Heilbron *et al.*, (2010) compartimenta tectonicamente a Faixa Ribeira em 4 (quatro) terrenos tectono-estratigráficos com direção NW/W, em direção ao Cráton São Francisco: i) Ocidental (margem franciscana retrabalhada); ii) Terreno Paraíba do Sul; iii) Terreno Oriental; e iv) Terreno Cabo Frio. Os três primeiros são definidos como amalgamentos entre 605 e 580 Ma enquanto o último é resultado da colação tardia ao orógeno.

Heilbron *et al.*, (2004) aborda que apesar das diversas propostas de nomenclatura estratigráfica, uma subdivisão lito-tectônica tem sido utilizada para a Faixa Ribeira: embasamento ortognaissico paleoproterozoico, coberturas sedimentares paleo-mesoproterozoicas, sequências sedimentares e granitoides neoproterozoicos. Nesse sentido os litotipos são dados por: i) Embasamento arqueano ou paleoproterozoico mais velho que 1,7 Ga; ii) Sequências metassedimentares paleoproterozoicas a mesoproterozoicas; iii) Sequências metassedimentares e metavulcanossedimentares neoproterozoicas; iv) Granitoides neoproterozoicos pré-colisionais; v) Granitoides neoproterozoicos sin- a tardi-colisionais; e vi) Granitoides pós-colisionais.

Tupinamba *et al.*, (2013) aborda que grande parte do Estado do Espírito Santo está contido dentro do Domínio Cambuci, ou seja, no Terreno Oriental. Segundo o autor esse terreno consiste em uma sucessão metavulcano-sedimentar

metamorfizada em fácies anfibolito alto e granulito, invadida por diversas gerações de rochas granitoides.

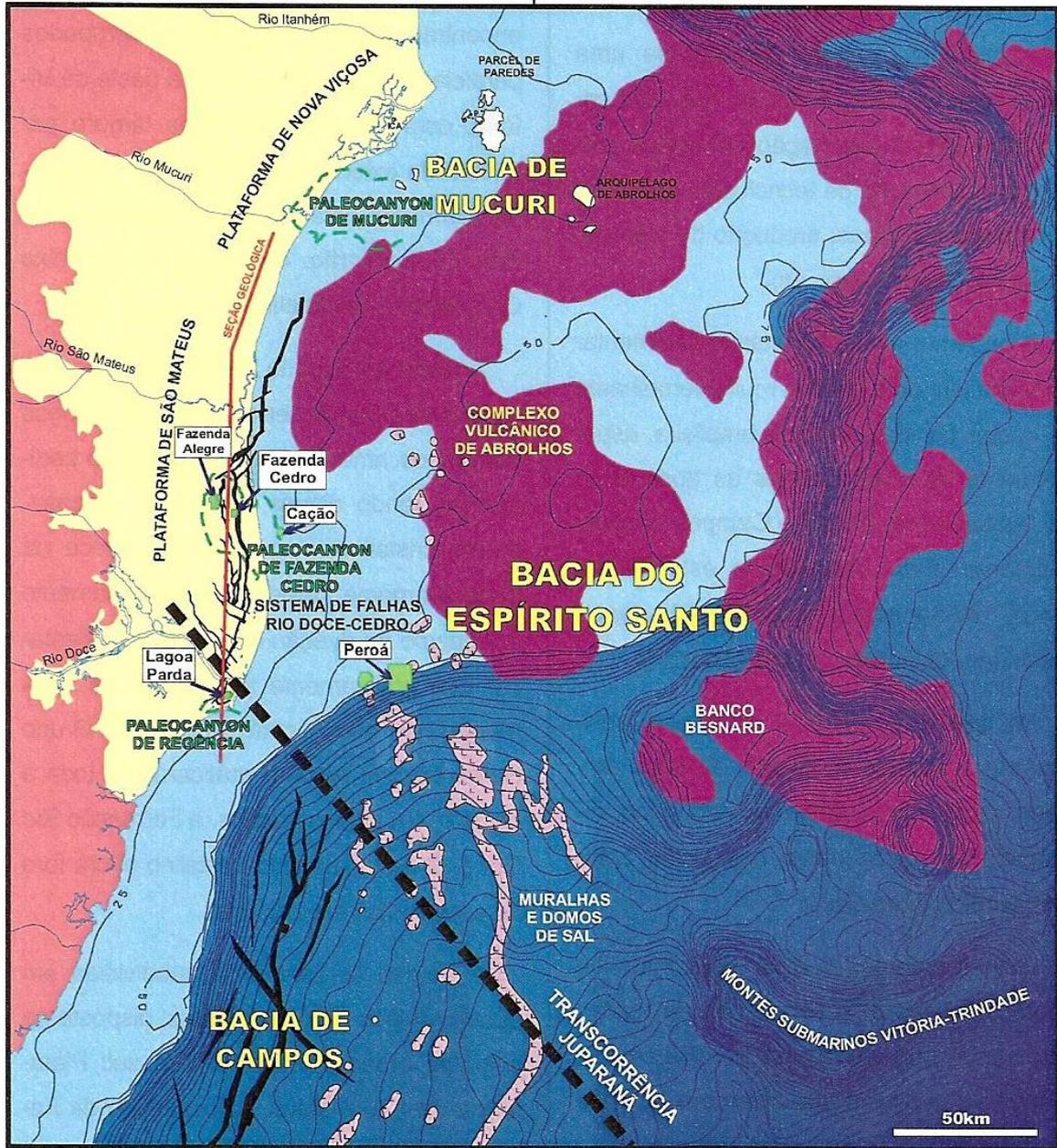
Machado *et al.*, (1996) aborda que a parte central do Orógeno Ribeira, que constitui uma parte significativa do Espírito Santo, é dividido em domínios litotectônicos: i) Domínio costeiro, domínio responsável pelas feições litotectônicas na parte costeira do Espírito Santo; ii) Domínio Paraíba do Sul; iii) Domínio Juiz de Fora; e iv) Domínio Andrelândia. O domínio costeiro tem como principais litotipos uma variedade de rochas ígneas e metamórficas com uma predominância de ortognaisses com lentes máficas e monzogranitos. O Domínio Costeiro é caracterizado como em grande parte resultado da remobilização crustal que ocorreu durante a orogenia Brasileira.

3.2.1.2. Bacia do Espírito Santo

Segundo Moraes (2007) a Bacia do Espírito Santo possui uma faixa alongada a sul, delimitada pelo Alto Estrutural de Vitória: i) a oeste, delimitada pelo embasamento cristalino pré-Cambriano da Faixa Ribeira; e ii) a norte apresentando um limite arbitrário (Figura 4).

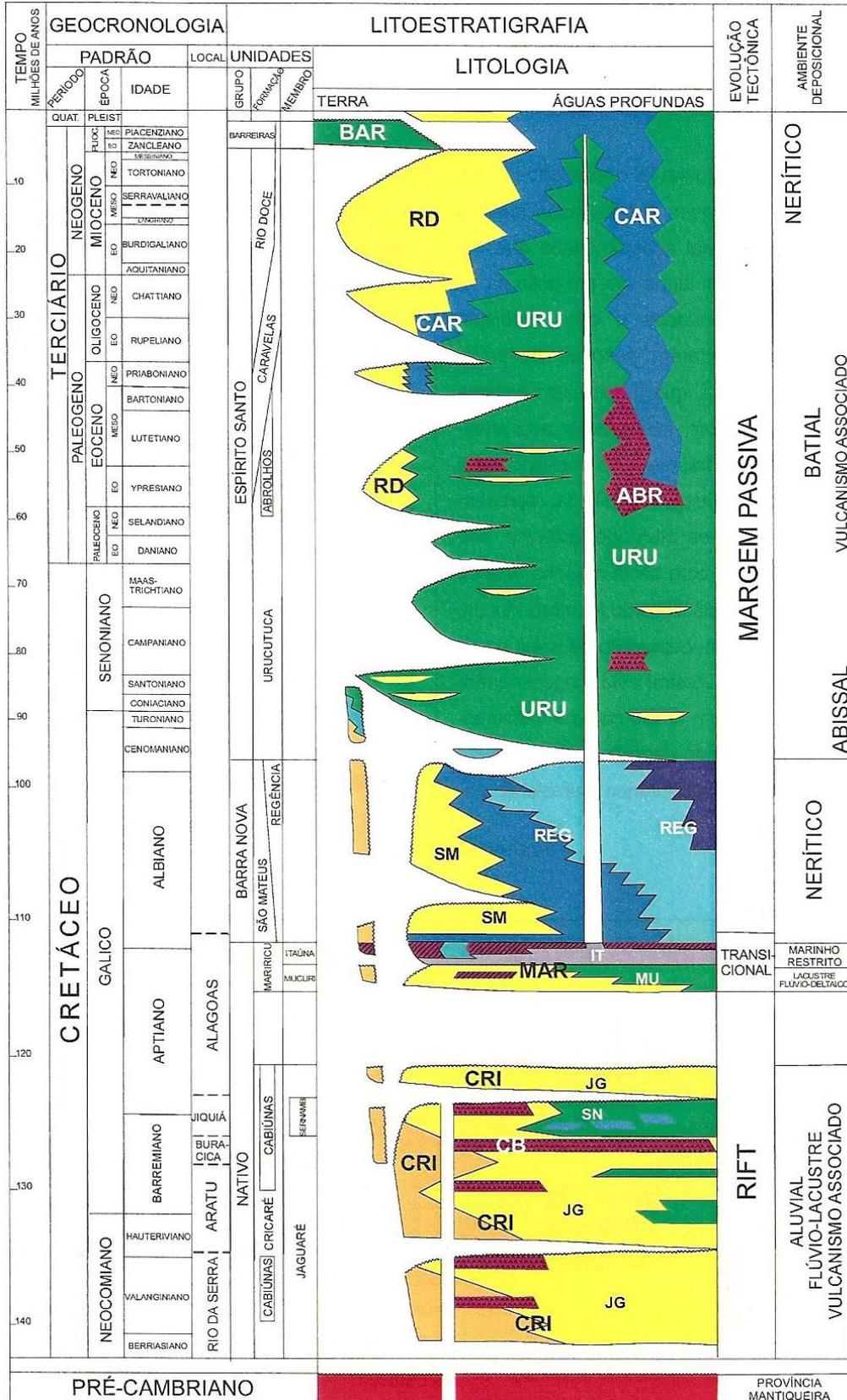
Durante muito tempo a Bacia do Espírito Santo era descrita juntamente com a bacia de Mucuri, atualmente existe uma individualização relacionada à características geográficas e não geológicas. O preenchimento (Figura 5) da bacia corresponde a três fases evolutivas: rifte, transição e marinha. (TUPINAMBA *et al.*, 2013).

Figura 4 - Localização geográfica da bacia sedimentar do Espírito Santo.



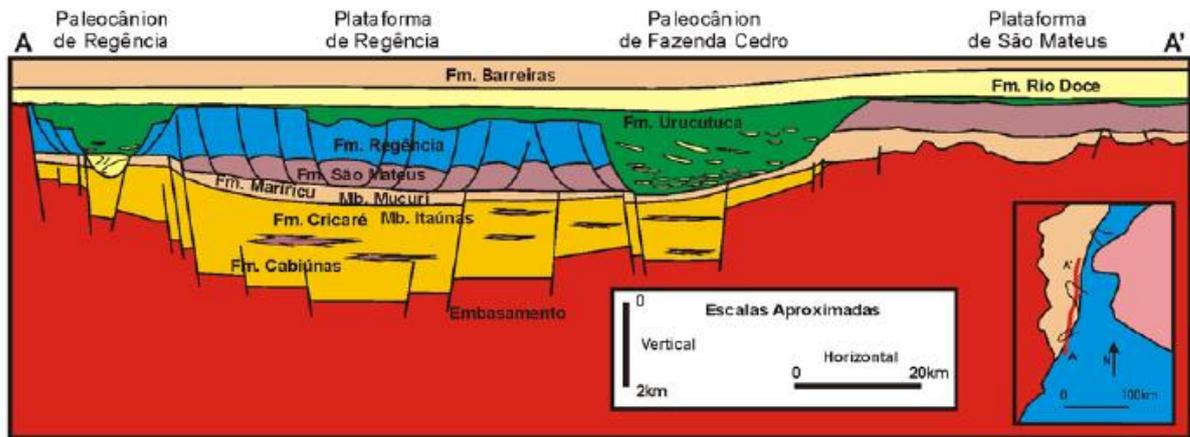
Fonte: França e Tokutake (2004).

Figura 5 - Carta estratigráfica simplificada da Bacia do Espírito Santo.



A fase rifte (Valangiano ao Aptiano Inferior) possui, na borda dos falhamentos (Figura 6), características de ambiente lacustre com contribuição fluvial e aluvial. Nos altos estruturais internos existem depósitos de coquinas e outros carbonatos. Os pulsos tectônicos, característicos dessa fase, são registrados por conglomerados sintectônicos de bordas de falhas e rochas vulcânicas da Formação Cabiúnas (FRANÇA e TOKUTAKE, 2004).

Figura 6 - Porção terrestre da bacia do Espírito Santo com a suas quatro regiões morfoestruturais e importantes formações.



Fonte: França e Tokutake (2004)

A fase de transição (Aptiano ao Albiano) possui importantes registros de rochas carbonáticas e evaporíticas correlacionadas (Formação Lagoa Feia, na bacia de Campos e Formação Mariricu, na bacia do Espírito Santo), formada por depósitos lacustrinos e lagunares. Apesar de importante, a fase de transição é menos expressiva na bacia do Espírito Santo (FRANÇA e TOKUTAKE, 2004).

A fase marinha (Albiano ao Recente) possui os registros mais expressivos, onde nelas se incluem carbonatos e siliciclastos, destaque a sedimentação pelítica. Os registros na Bacia do Espírito Santo se subdividem nos arenitos da Formação São Mateus e os carbonatos da Formação Regência, as duas pertencentes ao Grupo Barra Nova. As formações Rio Doce de arenitos e folhelhos, Caravelas de calcarenitos e calcilutitos e Urucutuca de folhelhos também são pertencentes a fase marinha, essas formações pertencem ao Grupo Espírito Santo (FRANÇA e TOKUTAKE, 2004).

A partir do Mesoeoceno ocorre a fase de progradação da bacia aonde acontece a fase de maior atividade vulcânica nas regiões norte e leste da bacia, nesse período se observa uma importante mudança na relação suprimento-subsidência/nível do mar. A intensa atividade vulcânica da origem a Formação Abrolhos que é caracterizada como a sequência vulcanoclástica aflorante no Arquipélago de Abrolhos, essa formação ocupa preferencialmente a porção submersa da bacia e é datada entre 37 a 59 Ma (MANTESSO-NETO *et al.*, 2004).

Rangel *et al.* (1994) evidencia a existência de uma importante falha, de direção E-W, localizada no cânion da Fazenda Cedro, a mesma está orientada transversalmente ao *trend* de direção N-S. O autor considera que o falhamento controla a localização do cânion e a espessura das sequências sedimentares anteriores ao mesmo.

A Formação Rio Doce é formada por arenitos médios a muito grossos, quartzosos, feldspáticos, de cor cinza-esverdeada, maciços ou com estratificações cruzadas, mal selecionados, pouco lamosos e silicificados. A Formação Rio Doce se encontra sotoposta a Formação Barreiras, podendo ser interpretada como depósitos de rios entrelaçados arenosos, perenes e profundos com variação para um modelo de rios entrelaçados cascalhosos e profundos, esses mesmos depósitos sofreram influência dos lineamentos da Faixa Colatina (MORAIS, 2007).

A litologia da Formação Barreiras é caracterizada como predominantemente de arenitos quartzosos, caulíníticos, podendo variar de maciços a estratificados com intervalos lamíticos. Depósitos podem ocorrer ferruginizados nessa formação apresentando cores variadas que vão desde o vermelho até o alaranjado, quanto mais ferruginizado depósito maior a tendência a formação de crostas ferruginosas. A formação é associada a tabuleiros costeiros ao longo do litoral e podem ocorrer em forma de falésias. Estabelece, através de correlações com a Formação Rio Doce, um caráter deposicional de ambiente fluvial entrelaçado para a Formação Barreiras e identifica a presença de paleofluxos apontando para a região do Paleocânion de Regência. Caracteriza a área fonte dos sedimentos áreas continentais soerguidas (MORAIS, 2007).

CPRM, (2015) aborda que a Formação Barreiras é distribuída em uma faixa alongada no sentido N-S basicamente localizada entre o embasamento cristalino e

os depósitos quaternários costeiros, aflora menos expressivo na região sul do estado do Espírito Santo sendo registrado no município de Presidente Kennedy e depois volta a ser observado apenas na região de Vitória, conforme se direciona a região norte a mesma fica mais expressiva. Caracteriza que a Formação Barreiras é constituída como arenitos esbranquiçados, amarelados e avermelhados, argilosos, finos e grosseiros, mal selecionados, com intercalações de argilitos vermelhos e variegados. Identifica depósitos bastante ferruginizado e apresentando cores variadas que se associam a feições de tabuleiro e ocorrem em formas de falésias ativas.

Ribeiro (2010), Bricalli (2011) demonstram que há um controle neotectônico nos depósitos da Formação Barreiras no estado do Espírito Santo.

Ribeiro (2010) divide a área em seis *trends* principais, desses são destacados a predominância dos lineamentos NW-SE e NE-SW tanto em densidade quanto em comprimento. Em relação a frequência destacam-se as orientações N40-60E e N40-60W. Os maiores lineamentos se encontram nas partes sudoeste e norte da Formação Barreiras: i) Lineamentos da região sudoeste tem orientação NE-SW e possuem o controle estrutural herdado da Faixa Ribeira; e ii) Lineamentos da região norte possuem orientação NW-SE e refletem o controle estrutural da Faixa Colatina.

Bricalli (2011) estabelece dois conjuntos predominantes de falhas na Formação Barreiras: i) falhas normais, dextrais e sinistrais de orientação NW-SE geradas por esforços compressivos NW-SE e distensivos NE-SW; e ii) falhas normais NE-SW geradas por esforços distensivos NW-SE.

3.2.1.3. Cobertura Detrítico-lateríticas

CPRM (2015) aborda que as coberturas detrítico-lateríticas estão localizadas na porção oeste da margem sul do Rio Doce e são datadas do Cenozoico. A constituição litológica da mesma é caracterizada por sedimentos detríticos areno-argilosos friáveis, de cor avermelhada a marrom-avermelhada escura, com cascalhos rolados de espessura variando de centimétrica a métrica e solos lateríticos ferruginosos. Os depósitos se encontram subnivelados entre as cotas

900 a 700 metros e nivelados entre as cotas 400 a 250 metros, as cotas mais baixas possuem relevo escarpado nas bordas, drenagem dentrítica e vegetação arbustiva. Nas cotas mais elevadas existe escassez de drenagens e vegetação de mata densa.

Machado Filho *et al.*, (1983) caracteriza a composição das coberturas detrítico-lateríticas como sedimentos areno-argilosos e conglomeráticos, mal selecionados, de cor branca a branco-amarelada, percolados por ferro, e sendo datados do Terciário tardio ao Quaternário. Correlaciona a unidade a deposição de sedimentos em áreas peneplanizadas, datadas do Terciário ao Quaternário, e em cotas que variam entre 200 e 800 metros de altitude.

3.2.1.4. Depósitos Quaternários

A sedimentação quaternária é aqui representada, especialmente, nas desembocaduras dos rios Doce e São Mateus, onde a sedimentação é mais expressiva. Essa sedimentação é constituída por: i) Terrenos arenosos pleistocênicos; ii) Terraços arenosos holocênicos; iii) Pântanos e Mangues holocênicos; iv) Depósitos fluvio-lagunares holocênicos; e v) Depósitos aluvionares holocênicos (MARTIN *et al.*, 1997).

i) Terrenos arenosos pleistocênicos – composto por areias bem selecionadas e de coloração escura devida a presença de matéria orgânica, são relacionados a parte final da transgressão marinha e regressão que a sucede (MARTIN *et al.*, 1997).

ii) Terraços arenosos holocênicos – sedimentos arenosos e bem selecionados, podem formar alinhamentos de cordões litorâneos. Localizam-se na parte mais externa da planície costeira em cotas menos elevadas do que os terraços pleistocênicos (MARTIN *et al.*, 1997).

iii) Pântanos e mangues holocênicos – sedimentos de lagos e pântanos, quase que com frequência de argilas com matéria orgânica. Também se encontram areias quartzosas finas e grossas, mal e moderadamente selecionadas, assim como, siltes argilosos, areias silticas e arenosas e turfas. Localizados quase que em sua totalidade na região de Linhares (MARTIN *et al.*, 1997).

iv) Depósitos fluvio-lagunares holocênicos – caracterizados como areias e siltes argilosos com matéria orgânica. Se localizam principalmente nas calhas dos rios Itaúnas, São Mateus e Doce em depósitos fluvio-lagunares (MARTIN *et al.*, 1997).

v) Depósitos aluvionares holocênicos - caracterizados como arenosos, uma pequena parcela se apresenta com presença de silte, argila e cascalho. Foram mapeados principalmente nos rios Doce e São Mateus (MARTIN *et al.*, 1997).

Machado Filho *et al.*, (1983) estabelece que o Quaternário aluvionar caracteriza-se como sendo todos os depósitos fluviais, fluviomarinhos, fluviolacustres e de estuários. A composição desses depósitos é dada por cascalhos, areias e siltes inconsolidados, com estratificações cruzadas e gradativas sendo finalizadas em sedimentos pelíticos.

3.2.1.5. Geologia Estrutural, Neotectônica e lineamentos

A feição estrutural mais importante do estado do Espírito Santo é representada em sua porção centro-noroeste, correspondendo a um *trend* estrutural de direção NNW-SSE sobre rochas do embasamento pré-cambriano, e apresentando diferentes denominações (BRICALLI, 2011).

Silva *et al.* (1987) denomina Alinhamento Vitória-Ecoporanga uma faixa com orientação NW-SE, associando-o a processo de deformação dúctil nas rochas do embasamento proterozoico, com origem no Neoproterozoico e reativado durante o Eopaleozoico e caracterizando-a como uma zona de cisalhamento. O autor ainda correlaciona a intrusão dos plútons das suítes Aimorés e Guaratinga, e afirma que os mesmos teriam sido controlados pelos lineamentos no Eopaleozoico. No Jurássico teria havido uma nova reativação com a intrusão de diques básicos da Suíte Intrusiva Fundão, obedecendo a direção NNW-SSE.

Novais *et al.* (2004) aborda a presença de importantes estruturas regionais e, dentre as mesmas, destaca o Alinhamento Vitória-Ecoporanga, denominando-o de Faixa Colatina. Segundo o autor, a feição estrutural possui orientação NNW-SSE e é composta por feixes subparalelos de estruturas tectônicas e está geomorfológicamente relacionada a sulcos e escarpas orientadas.

Pedrosa-Soares e Wiedemann-Leonardos (2000) associam o alinhamento a um processo de deformação dúctil nas rochas do embasamento proterozoico junto a borda do Cráton São Francisco, esse processo é estabelecido durante o Neoproterozoico sofrendo uma reativação no Eopaleozoico, essa reativação é responsável pela intrusão de diques máficos na direção NNW-SSE sendo responsável por atividades tectônicas. Essa faixa sofre também uma reativação durante o Neogeno.

Bricalli (2011) determina que a domínio Faixa Colatina é de grande importância nos depósitos cenozoicos, o qual se destaca pela forte presença de orientações de direção NNW-SSE, sendo responsável pelas maiores densidades de lineamentos observadas no estado do Espírito Santo.

A porção norte do estado é marcada pela maior presença de lineamentos NW-SE, os mesmos são alternados com setores de predomínio de lineamentos NE-SW. Essa porção concentra a maior densidade de lineamentos, associados a Faixa Colatina, com *trend* estrutural NNW-SSE. Dividindo-se o terreno em Depósitos Cenozoicos e em Compartimento Pré-Cambriano observa-se 2 (dois) compartimentos distintos: i) o primeiro apresenta direções N70-90E e N40-60W, com distribuições também significativas nas direções N0-20W e N70-80W e; ii) o segundo compartimento apresenta direções N50-70E, N0-20W e N20-40E, com uma pequena parcela de lineamentos na direção N60-80W (BRICALLI, 2011).

Na porção sul do estado há um predomínio de lineamentos na direção NE-SW, com a presença de feixes de lineamentos na direção NW-SE, tendo relação com a estruturação da Faixa Ribeira esse domínio apresenta falhas, fraturas e foliações de direção NE-SW cortadas por estruturas de orientação NE-SW quase que perpendicularmente (BRICALLI, 2011).

Silva *et al.* (1987) afirma que a porção sul do estado é controlada por estruturas de direção NW-SE e também correspondem a falhas, fraturas e foliações do embasamento pré cambriano, essas estruturas são cortadas perpendicularmente por estruturas de orientação NW-SW.

Pedrosa-Soares e Wiedemann-Leonardos (2000) descrevem estruturas como falhas de empurrão e zonas de cisalhamento de direção NNE-SSW que delimitam corpos graníticos maciços na porção extremo oeste-sul do estado,

abordam também maciços graníticos limitados por estruturas de direção NNE-SSW na porção centro-sul do estado.

A estrutura mais importante na porção sul do estado do Espírito Santo é a Zona de Cisalhamento Guaçuí, que possui extensão total de 320 km e orientação NE-SW, possui sentido de cisalhamento dextral e um rejeito horizontal na ordem dos 35 km. Corresponde a uma estrutura dúctil, com 1 km de largura, arrasto da foliação, tramas sigmoidais, porfiroblástico assimétricos e as tramas dos eixos e de quartzo indicariam deslocamentos direcionais dextrais. É expressa por uma sequência de vales alongados na mesma direção, essa característica dita uma facilidade de reconhecimento através de imagens de satélite e fotografias aéreas, no decorrer do lineamento são observados produtos de milonitização em uma variação de rochas de diferentes composições (SILVA *et al.*, 1987).

O estado do Espírito Santo apresenta forte controle neotectônico (BRICALLI, 2011). Foram identificados 3 (três) eventos neotectônicos no estado do Espírito Santo (BRICALLI, 2011; MIRANDA, 2007; MIRANDA, 2009; RIBEIRO, 2010): i) Transcorrência sinistral E-W, de idade neogênica e associada a geração de falhas normais NE-SW, falhas dextrais NNE-SSW e falhas sinistrais E-W a ENE-WSW afetando o embasamento cristalino; ii) Transcorrência dextral E-W, de idade pleistocênica – holocênica, associada a geração de falhas normais NW-SE, falhas dextrais NW-SE a E-W e falhas sinistrais NNE-SSW a NNW-SSE ; e iii) Distensão NW-SE, holocênica, associado a falhas normais NE-SW a ENE-WNW.

Esses eventos afetam especialmente a rede de drenagem e o relevo na área (MIRANDA, 2007; RIBEIRO, 2010; BRICALLI, 2011).

3.2.2. Geologia das áreas selecionadas

A área apresenta dois tipos de rochas (Figura 7): os granitos porfiríticos da unidade Maciço Vitória e os Depósitos fluviais argilo-arenosos e arenosos recentes. O granito porfirítico predominante no Maciço Vitória, corresponde as rochas do embasamento pré-cambriano. Mineralogicamente esse granito é composto por matriz de granulação média e cor cinza, envoltos por megacristais de feldspato. Localmente pode exibir foliação de fluxo magmático sendo cortados por diques de

basalto. Podem ser observados autólitos de rocha máfica, provavelmente microdiorito (CPRM, 2015).

O Maciço Vitória é gerado durante a granitogênese do Orógeno Araçuaí, essa granitogênese é associada a edificação do arco magmático do Orógeno e representado pelas suítes magmáticas e seus correspondentes magmatismos. A suíte G5 (Estágio Pós-colisional) são correspondentes a edificação do Maciço Vitória e possuem correlação ao magmatismo $\lambda 5$ (Estágio Pós-orogênico). A suíte G5 (520-490 Ma) representa o colapso extensional do Orógeno Araçuaí sendo constituída por intrusões graníticas do tipo I e limitada ao núcleo interno do orógeno, já o magmatismo $\lambda 5$ é caracterizado por granitoides metaluminosos e calcialcalinos (CPRM, 2015).

Os Depósitos fluviais argilo-arenosos e arenosos recentes (Q2a) ocupam boa parte da área Norte de estudo e são datados do Neógeno-Holoceno, sua formação se dá após a relativa estabilização do nível do mar ao fim da Transgressão Flandriana (CPRM, 2015).

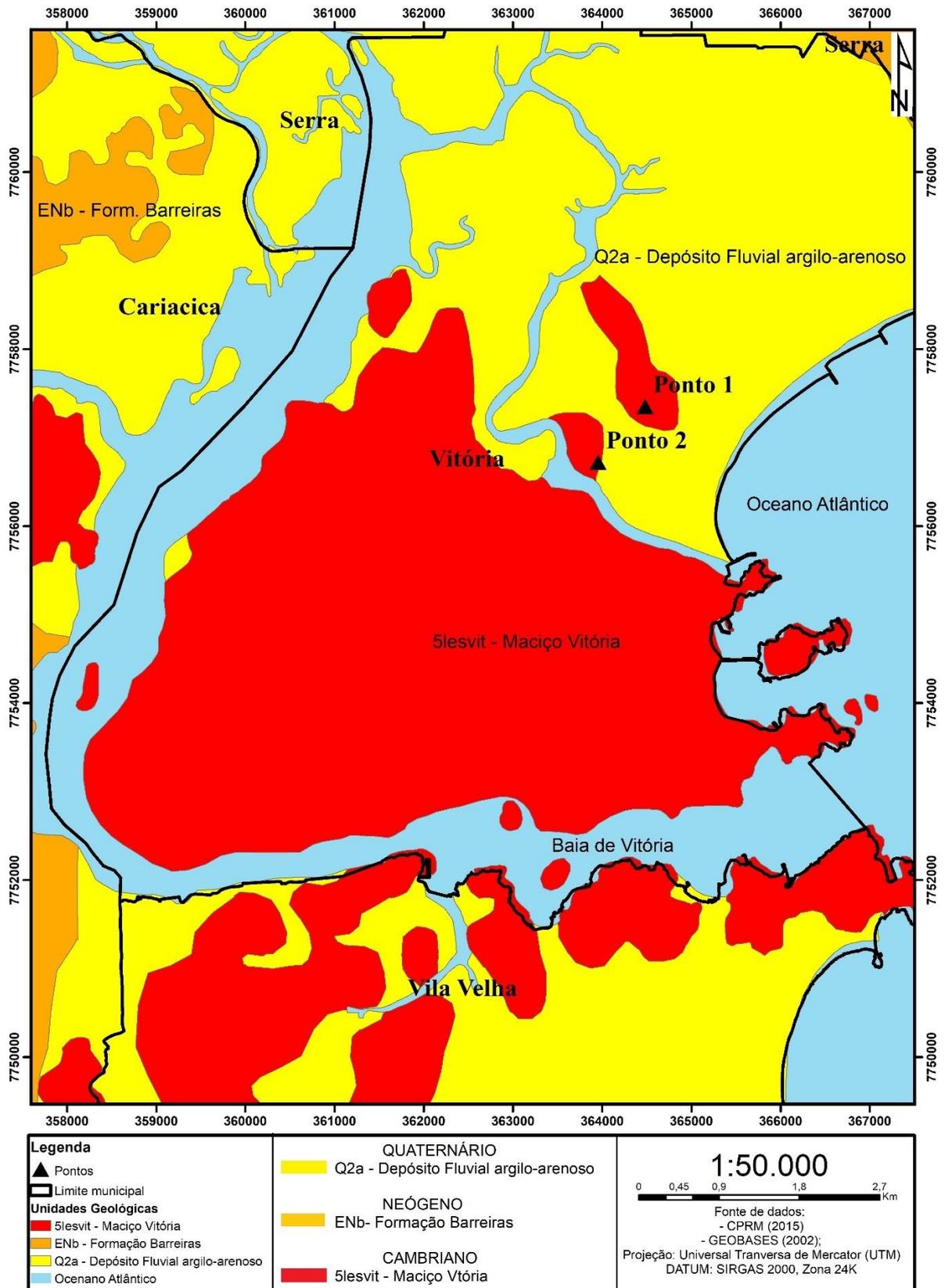
Depósitos fluviais argilo-arenosos e arenosos recentes (Q2a)

Esses depósitos são descritos em duas fases: i) a fase aluvionar, que é constituída por areias quartzosas grossas, com grãos mal selecionados, conglomeráticos, micáceos e com intercalações argilo-silticas e argilosas; e ii) a sua fase de areia branca, descrita como quartzosas, de granulação média a grossa, mal selecionadas e em depósitos que podem se estender como centenas de metros (CPRM, 2015).

Maciço Vitória (5lesvit)

A litologia predominante encontrada é representada por um granito porfirítico. A rocha é descrita como de granulação média e cor cinza, apresenta megacristais e localmente exibe foliação de fluxo magmático cortada por diques de basalto. A mineralogia básica do granito é representada por quartzo, biotita e megacristais de plagioclásio, localmente pode se encontrar hiperstênio, formando assim um biotita-hiperstênio granito. Em escala de afloramento se observa autólitos de rocha máfica (microdiorito), além de migmatitos e leucogranitos do tipo S encontrados em ilhas e costões rochosos (CPRM, 2015).

Figura 7 - Mapa Geológico correspondente a Folha Vitória (1:100.000) da área de estudo.



Fonte: Modificado de CPRM (2015).

3.3. GEOMORFOLOGIA

3.3.1. Geomorfologia Regional

O estado do Espírito Santo está dividido em quatro compartimentos geomorfológicos principais: i) Serras e Morros; ii) Colinas e Maciços Costeiros; iii) Tabuleiros Costeiros; e iv) Planície Costeira (BRICALLI, 2011; MENDES *et al.*, 1987).

Mendes *et al.* (1987) associa as Serras e Morros à unidade geomorfológica dos Patamares Escalonados do Sul Capixaba, aborda ainda que a mesma foi desenvolvida sobre as rochas do embasamento pré-cambriano e que se difere das demais áreas devido aos patamares escalonados. A unidade é delimitada por frentes escarpadas adaptadas a falhas de direção NW-SE. Altitudes variam entre 300 e 1500 metros.

O compartimento de Colinas e Maciços Costeiros estão localizados entre altitudes que variam de 20 a 300 metros, os mesmos ocupam o limite entre os domínios do embasamento pré-cambriano e dos sedimentos cenozóicos. Concentrados na região sul do estado, Colinas e Maciços Costeiros tem composição litológica predominante de rochas gnáissicas sobre maciços graníticos e colinas baixas (BRICALLI, 2011).

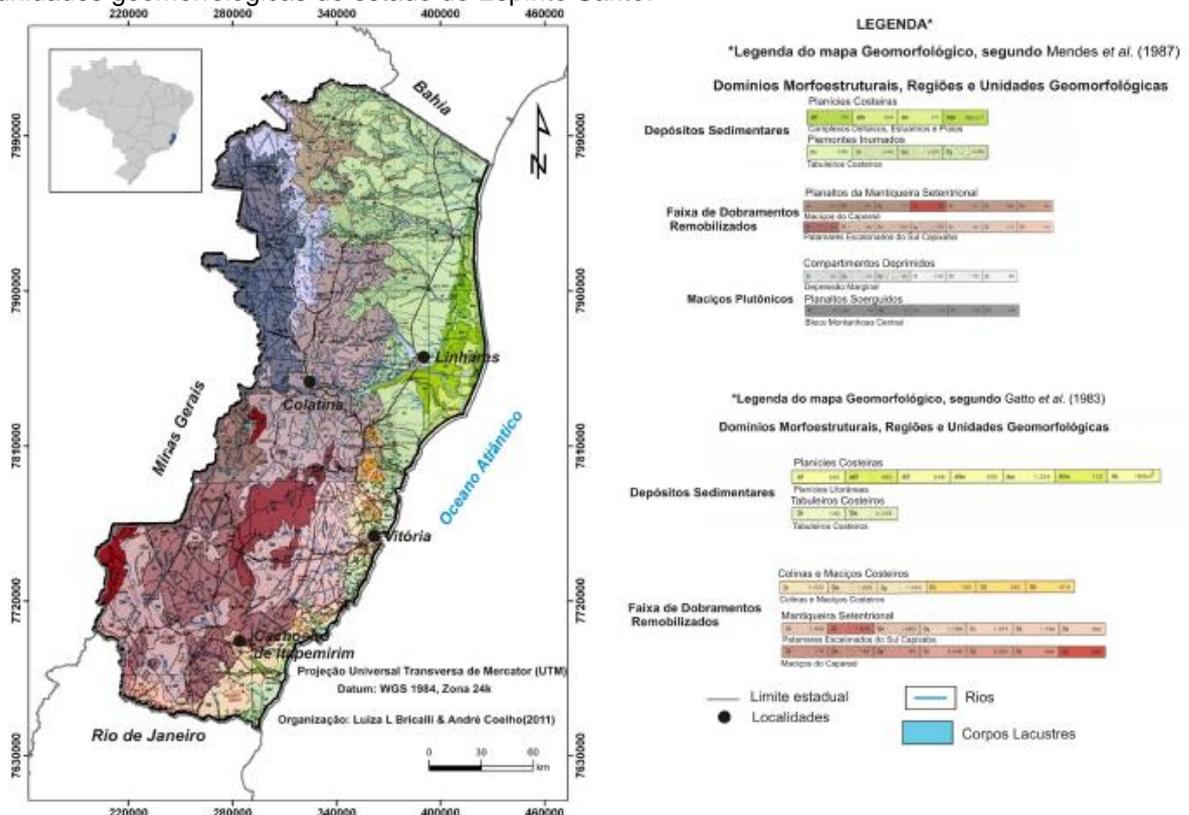
Os Tabuleiros Costeiros estão relacionados diretamente aos sedimentos da Formação Barreiras, apresentam relevo plano e suave mergulhando em direção ao oceano. Ocupa altitudes em torno de 50 a 100 metros, sendo que de oeste para leste se concentra entre o sopé das elevações de rochas cristalinas e as planícies quaternárias. O contato com as planícies quaternárias se dá por paleofalésias (MENDES *et al.*, 1987).

A Planície Costeira ocupa a faixa de altitude entre 0 (zero) e 20 (vinte) metros e é caracterizada como depósitos sedimentares quaternários com morfologia plana e extensa. Estão concentrados na porção norte do estado, principalmente na foz do Rio Doce (MENDES *et al.*, 1987).

3.3.1.1. Domínios Morfoestruturais, Regiões e Unidades Geomorfológicas

Segundo Mendes *et al.* (1987) a área de estudo está inserida geomorfológicamente nos seguintes domínios morfoestruturais (Figura 8): i) Maciços Plutônicos; ii) Faixas de Dobramentos Remobilizados; e iii) Depósitos Sedimentares.

Figura 8 - Mapa de geomorfologia englobando os principais Domínios Morfoestruturais, regiões e unidades geomorfológicas do estado do Espírito Santo.



Fonte: Bricali (2011).

- Domínio Morfoestrutural Maciços Plutônicos

Estruturas marcadas pela intrusão de grandes quantidades de magma ácido, corresponde a suítes magmáticas que intrudiram rochas proterozóicas e outras litoestruturas. Esse domínio se localiza na porção noroeste do estado e é subdividido nas seguintes regiões e unidades geomorfológicas: Região Compartimentos Deprimidos que possui a unidade geomorfológica Depressão Marginal e Região dos Planaltos Soerguidos que possui a unidade geomorfológica Bloco Montanhoso Central (MENDES *et al.*, 1987).

A Região Geomorfológica Compartimentos Deprimidos caracteriza-se pelas feições convexas e aguçadas que refletem estágios de evolução comandadas pela dinâmica fluvial adaptadas a características litológicas e estruturais. A Unidade Geomorfológica Depressão marginal, que faz parte da região geomorfológica supracitada, possui como características uma configuração irregular e marcada por reentrâncias devido a evolução geomorfológica de dissecação fluvial (MENDES *et al.*, 1987).

A Região Geomorfológica Planaltos Soerguidos possui áreas afetadas por agentes erosivos devido a oscilação do nível de base dos rios localizados na área, são maciços elevados caracterizados como pontões rochosos e restos de topos parcialmente conservados. A unidade Geomorfológica Bloco Montanhoso Central possui características montanhosas com núcleos plutônicos com áreas erodidas devido a oscilação do nível de base, tem ainda como característica a configuração alongada e irregular de direção N-S. Nessa unidade o padrão de drenagem é subdendrítico, evidenciando o controle estrutural, descrito como apresentando padrão radial em áreas específicas e com segmentos de canais retilíneos marcados por angulosidades em sulcos profundos, escarpas, cristas e pontões de orientação NW-SE e NE-SW (MENDES *et al.*, 1987).

- Domínio Morfoestrutural Faixa de Dobramentos Remobilizados

Caracterizados pelo controle estrutural sobre a morfologia, nessa área se observa forte evidência de movimentos crustais marcados por deslocamentos de blocos, marcas de falhas e falhamentos transversos. A região apresenta vales muito profundos e com escarpas controladas por falhas de direção NNE e ESSE, engloba as seguintes unidades e regiões geomorfológicas: Região da Mantiqueira Setentrional, que engloba as unidades Maciços do Caparaó e Patamares Escalonados do Sul Capixaba; e Região Colinas e Maciços Costeiros, que engloba a unidade Colinas e Maciços Costeiros (MENDES *et al.*, 1987; GATTO *et al.*, 1983).

A Região Geomorfológica Mantiqueira Setentrional possui altitudes variadas dispostas em níveis altimétricos, apresenta a característica de correlacionar a fase de dissecação a um sistema fluvial encaixado que obedece a um controle estrutural. As drenagens possuem padrão subdendrítico marcado por

angulosidades, encachoeiramentos e inflexões (MENDES *et al.*, 1987; GATTO *et al.*, 1983). Unidade Geomorfológica Maciços do Caparaó é caracterizada pelo relevo fortemente dissecado em altitudes médias e grandes elevações maciças podendo chegar a 2000 metros de altura, a influência do clima em rochas marcados por eventos tectônicos resulta em falhas intercruzadas, escarpas adaptadas e falhas com elevações residuais. A Unidade Geomorfológica Patamares Escalonados do Sul Capixaba apresenta blocos basculados para leste com morfologia de aspecto homogêneo, é caracterizada pelos níveis dissecados escalonados formando patamares, esses níveis são delimitados por frentes escarpadas e falhas direcionadas para noroeste com caimento para sudeste (GATTO *et al.*, 1983).

A Região Geomorfológica Colinas e Maciços Costeiros é caracterizada por uma topografia deprimida, com baixos valores altimétricos, fraturada e dobrada. Apresenta ainda colinas côncavo-convexas e um conjunto morfológico mais elevado. A Unidade Geomorfológica Colinas e Maciços Costeiros é caracterizada pelas colinas côncavo-convexas, com diferentes níveis de dissecção e integrada por serras e maciços litorâneos (GATTO *et al.*, 1983).

- Domínio Morfoestrutural Depósitos Sedimentares

Caracterizados pela ocorrência de sedimentos arenosos e argilo-arenosos com níveis cascalhosos, argilas inconsolidadas e sedimentos marinhos e fluviomarinhos, constituem dunas, restingas, planícies e terraços marinhos, cordões litorâneos, que atestam as ações de processos morfogenéticos e variações do nível do mar. Se subdivide nas seguintes regiões e unidades geomorfológicas: Região Planícies Costeiras, que engloba a unidade Complexos Deltaicos, Estuarinos e Praias; e Região dos Piemontes Inumados, que engloba a unidade Tabuleiros Costeiros (MENDES *et al.*, 1987; GATTO *et al.*, 1983).

A Região Geomorfológica Planícies Costeiras é caracterizada pelas feições planas e próximas a costa, apresentam diversidade de ambiente e processos formadores. A Unidade Geomorfológica Complexos Deltaicos, Estuarinos e Praias ou Planícies Litorâneas se apresenta distribuída descontinuamente, separada por maciços, colinas e tabuleiros, em diferentes tipos de ambientes. Constituída por

areias, siltes, cascalhos e argilas, situadas entre 7 e 8 metros acima do nível médio do mar, em terraços holocênicos (MENDES *et al.*, 1987; GATTO *et al.*, 1983).

A Região Geomorfológica Piemontes Inundados apresenta sedimentos cenozóicos do Grupo Barreiras, o embasamento é bastante alterado. Sedimentos constituintes apresentam espessura variada e disposição sub-horizontal mergulhando para leste, os tabuleiros refletem um forte controle neotectônico. A Unidade Geomorfológica Tabuleiros Costeiros possui constituição marcada por depósitos argilo-arenosos da Formação Barreiras, seu relevo é dissecado e de topos aplainados a convexizados com altimetrias variando entre 15 a 40 metros de altitude (MENDES *et al.*, 1987; GATTO *et al.*, 1983).

3.3.2. Geomorfologia da área

3.3.2.1. Domínios Morfoestruturais, Regiões e Unidades Geomorfológicas

A região de interesse está localizada no compartimento geomorfológico denominado de planície costeira, a mesma se correlaciona com depósitos sedimentares quaternários, de morfologia plana e altitudes que varia de 0 a 20 metros (MENDES *et al.*, 1987).

- Região Geomorfológica Planícies Costeiras

Essa região (Figura 9) é caracterizada pelas feições planares que se encontram situadas próximas a costa, é composta pela Unidade Geomorfológica Complexos Deltaicos, Estuarinos e Praias ou Planícies Litorâneas ou Planícies Litorâneas e Região dos Piemontes Inundados ou Tabuleiros Costeiros que faz parte da Unidade Geomorfológica Tabuleiros Costeiros (GATTO *et al.*, 1983; MENDES *et al.*, 1987).

A unidade Planícies Litorâneas, em que a área de estudo se encontra, é caracterizada pela descontinuidade, a mesma é intercalada por maciços e colinas, também é característica intrínseca a proximidade da mesma do litoral e a influência marinha em sua formação. Os materiais encontrados na área tem predomínio de

areias, siltes, argilas e cascalhos sendo que as feições mais representativas são os terraços holocênicos, situados entre 7 e 8 metros do nível do mar, e representados por areias, cascalhos, dunas, restingas e outros materiais inconsolidados (GATTO *et al.*, 1983; MENDES *et al.*, 1987).

A unidade Tabuleiros Costeiros, apresenta faixas com larguras entre 20 e 120 km e altitudes que variam entre 50 e 120 metros, se localiza nas faixas que vão desde o sopé das elevações cristalinas até as planícies quaternárias. Nessa unidade se encontram sedimentos cenozoicos do Grupo Barreiras, os mesmos são constituídos de areias e argilas variegadas dispostas em camadas e espessura variada (GATTO *et al.*, 1983; MENDES *et al.*, 1987).

Segundo Ribeiro (2010) predominam nessa unidade feições de interflúvios aplainados, que normalmente são entalhamentos em vales estruturais profundos e escarpados.

3.4. SOLOS

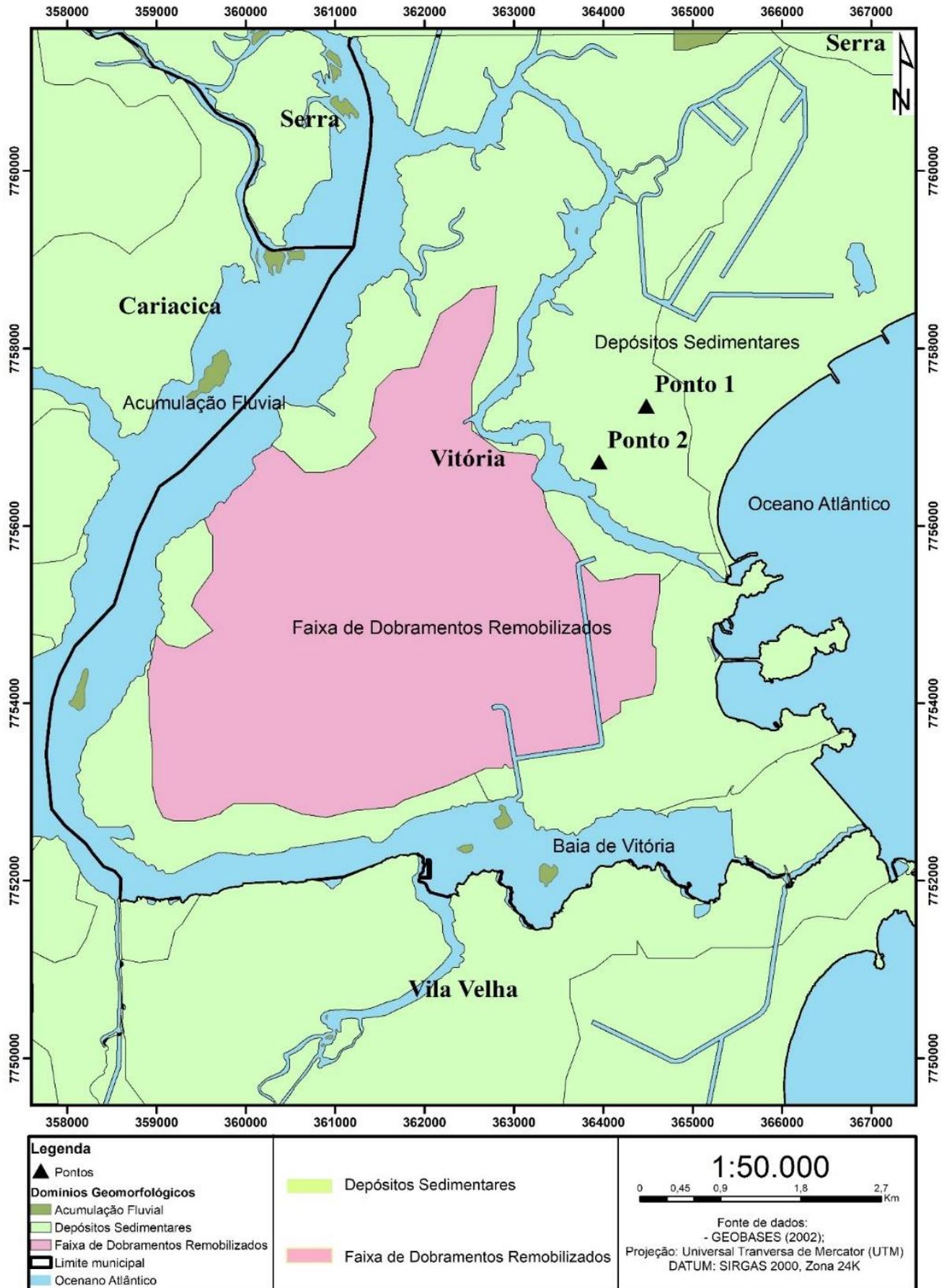
A área de estudo tem um predomínio de 3 (três) tipos de solos distintos (Figura 10): i) Gleissolo distrófico; ii) Podzólico hidromórfico álico; iii) Podzólico vermelho-amarelo distrófico; (CAMARGO E LARACH, 1983).

Gleissolo distrófico abrange a parte noroeste da área e é caracterizado por ser hidromórfico, pouco profundo, com horizonte A de alto teor de matéria orgânica, seguido de horizontes gleizados devido à forte influência do lençol freático (CAMARGO E LARACH, 1983).

Podzólico hidromórfico álico ocupa a porção centro-norte da área de trabalho, abrangendo o ponto 1 (um) de estudo, e tem por características um horizonte B espódico, com diferenciação de horizontes e fortemente ácidos, com pH geralmente inferior a 4,0 (quatro) e de muito baixa fertilidade natural (CAMARGO E LARACH, 1983).

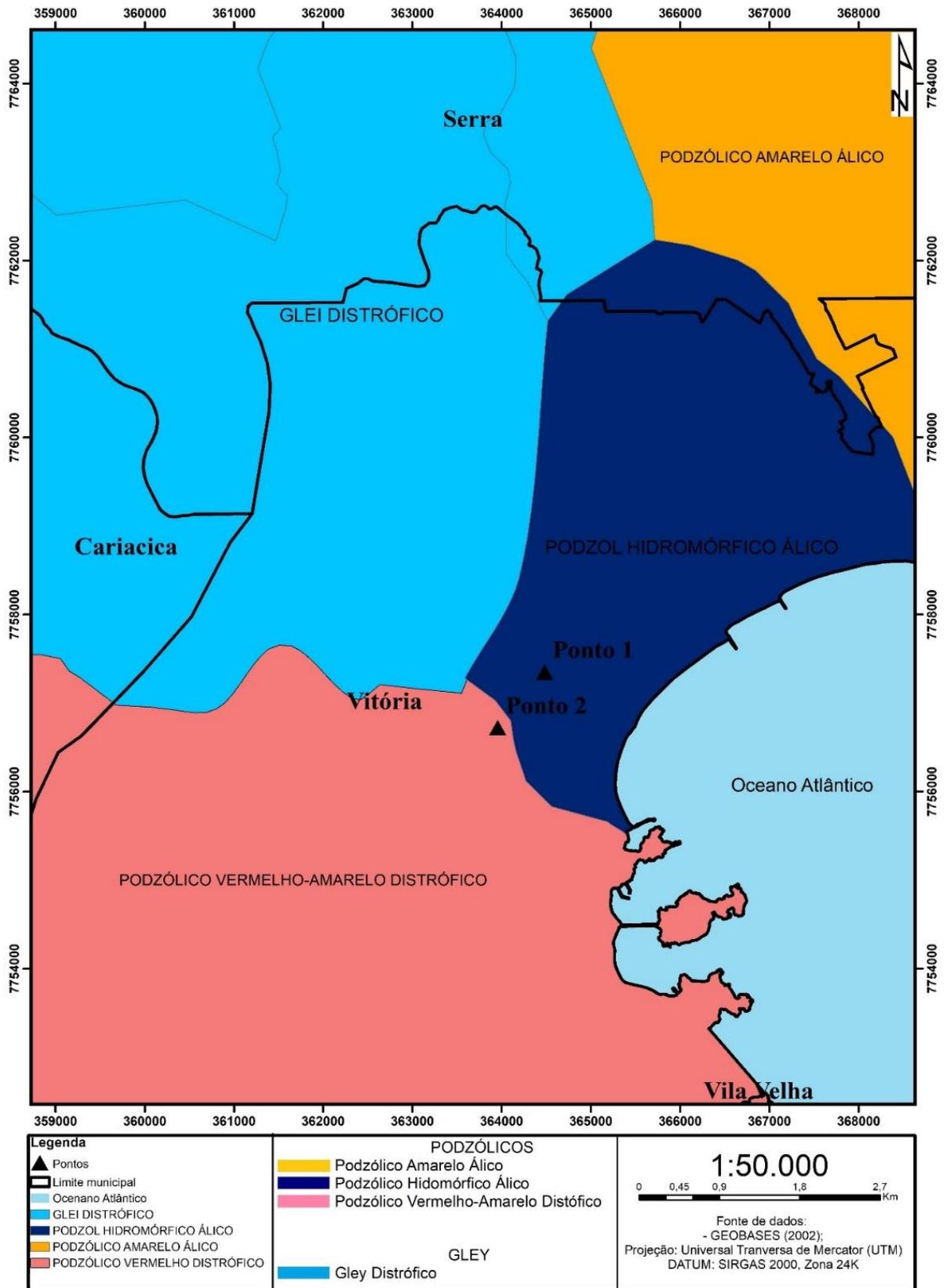
Podzólico vermelho-amarelo distrófico ocupa a porção sul da área e tem por características um horizonte B textural, não hidromórfico, normalmente com argila de atividade baixa, usualmente profundo, com sequências de horizontes A, B e C bem a moderadamente drenados (CAMARGO E LARACH, 1983).

Figura 9 - Mapa demonstrando as principais unidades geomorfológicas da área de estudo.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Figura 10 - Mapa Pedológico da área de estudo.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. HISTÓRICO DE UTILIZAÇÃO DO GPR

Borges (2002) aborda que as primeiras utilizações de sinais eletromagnéticos para identificação de alvos aconteceu em 1904 e é atribuída a Hülsmeier, a partir desse momento acontece um amplo desenvolvimento de diversos métodos de utilização do equipamento.

A primeira investigação utilizando o equipamento visava identificar a espessura de uma geleira e foi realizada na Áustria em 1929. Na década de 1950 aviões da Força Aérea Americana utilizaram radares de penetração com a mesma finalidade (BORGES, 2002).

As décadas de 1960 e 1970 foram marcadas pelo desenvolvimento do sistema glacial de sondagem por Stern e a sua adaptação ao programa da NASA Apollo 17. Em 1972 nós temos a criação da *Geophysical Survey System Inc.* e o começo da venda de um sistema comercial de radar de penetração no solo (BORGES, 2002).

Neal e Roberts (2000) abordam o grande desenvolvimento, nas décadas de 1980 e 1990, no campo da hidrogeologia, geologia ambiental, engenharia, geologia sedimentar e investigações forenses. Aborda a capacidade de determinação da extensão, espessura, estratigrafia e estruturação sedimentar interna em pacotes sedimentares inconsolidados.

Segundo Reynolds (1991) as principais formas de aplicações do GPR para a Geologia englobam: i) Identificação de cavidades e fissuras naturais; ii) Mapeamento da geometria do corpo arenoso; iii) Mapeamento de depósitos superficiais; iv) Mapeamento estratigráfico do solo; v) Investigação geológico glacial; vi) Exploração mineral e avaliação do recurso; vii) Mapeamento da espessura da turfa e avaliação do recurso; viii) Mapeamento de fraturas em rochas; ix) Localização de falhas, diques, leitos de carvão; x) Mapeamento de geologia estrutural; e xi) Mapeamento de sedimentos em lagos e rios.

No Brasil diversas universidades (UFRJ, UERJ, USP, UFPA, UFC, UnB, ON-RJ entre outras) desenvolvem trabalhos em geofísica rasa, utilizando o GPR, buscando caracterizar estruturas geológicas e litologias nos mais diversos ambientes geológicos (PORSANI, 1999). O Espírito Santo ainda carece de estudos

aplicando métodos não destrutivos em imageamento de subsuperfície, principalmente nas áreas de Geotecnia, Mapeamento Geológico, Geologia Sedimentar e Hidrogeologia, essa falta de estudos é resultado da quase que inexistência de equipamentos, como o GPR, e de mão-de-obra especializada na utilização desses métodos.

4.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-CONCEITUAL

Classificado como um método eletromagnético, o GPR é baseado na emissão de ondas de rádio em frequências muito altas (entre 10 – 1000 MHz) com o intuito de localizar alvos em subsuperfície. As principais propriedades controladoras da propagação da onda são: i) Permissividade elétrica; ii) Condutividade elétrica; e iii) Permeabilidade magnética (ROCHA, 2013).

Para a geração de corrente elétrica se faz necessário que um campo seja gerado através das cargas elétricas que se movimentam no meio, quando se existe tal condição pode se medir a condutividade elétrica, ela nada mais é que a medida de transporte de uma carga através de um meio com características conhecidas. Pensando na tendência de estabilidade do campo elétrico para o retorno ao equilíbrio original se assume o conceito de permissividade dielétrica, nada mais é do que a medida do material em estocar energia. A permeabilidade magnética é definida por uma mensuração da energia estocada e perdida através da magnetização, ou seja, em termos se equivale à permissividade dielétrica (Neal, 2004).

O GPR em vários aspectos é uma técnica similar à reflexão sísmica, aonde um pulso eletromagnético curto é transmitido para o solo e encontra substratos com diferentes tipos de propriedades elétricas, variações nessas propriedades impulsionam a mudanças na velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio estudado. Quando as mudanças de velocidade são abruptas, no que se refere ao comprimento da onda, parte dela será refletida e recebida pela antena receptora do equipamento (NEAL e ROBERTS, 2000).

Segundo Rocha (2013) conforme o conteúdo de água nas camadas atravessadas mais a velocidade de propagação e a reflexão do sinal são alterados, além da água outras propriedades físicas do meio podem influenciar as características do sinal como: i) granulometria; ii) orientação das camadas; iii)

estruturas geológicas; e iv) contatos litológicos. Devido a essas características a técnica de GPR demonstra ser uma poderosa ferramenta para auxílio de mapeamento em subsuperfície voltado a Geotecnia e a Estratigrafia já que ajuda a caracterizar litoestruturas e diferentes tipos de camadas litoestratigráficas.

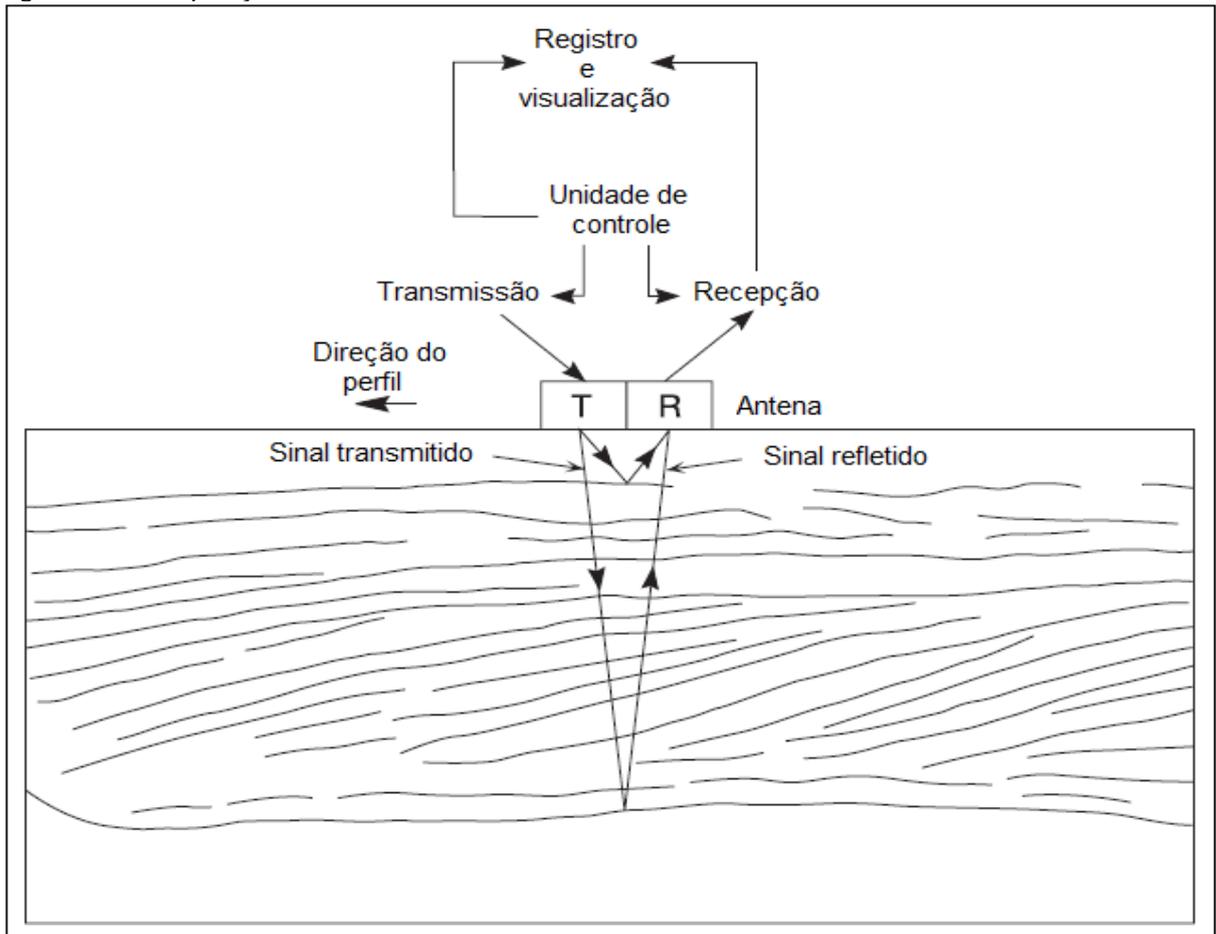
A composição básica de um sistema GPR (Figura 11) é caracterizada por uma unidade transmissora, uma unidade receptora, uma unidade de controle e uma unidade de transformação e visualização dos dados. Nessa configuração a unidade de controle estabelece um comando que orienta a unidade transmissora a produzir um pulso eletromagnético, por sua vez esse pulso é liberado pela antena transmissora e captado pela antena receptora após ser refletido pela superfície. Após a captura pela antena receptora o pulso é ampliado e enviado a unidade onde os sinais de radar são transformados em dados digitais. As medições são realizadas ao longo, ou em pontos predeterminados, em um perfil orientado na direção perpendicular aos alvos em subsuperfície (NEAL, 2004). As antenas possuem configurações diversas dentro de dois tipos possíveis de arranjos, o primeiro modo consiste no arranjo monoestático (*fixed mode*) que nada mais é do que uma única antena sendo responsável por transmissão e recepção do sinal, o segundo modo é denominado arranjo biestático (*moved mode*) e se caracteriza por um arranjo que consiste em um par de antenas (T e R) separados ou dentro de uma mesma unidade.

A forma como as aquisições são realizadas depende diretamente do arranjo da antena e da disposição dos alvos no meio, as técnicas mais comuns de aquisição são: i) Perfil de Reflexão com Afastamento Constante; ii) Sondagens de Velocidade; e iii) Técnica de Trans-iluminação ou Tomografia (BORGES, 2004).

Perfil de Reflexão com Afastamento Constante

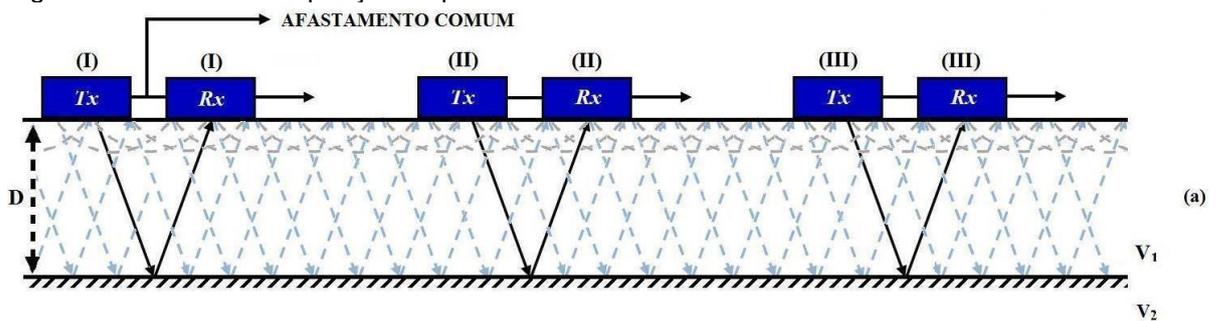
Essa técnica (Figura 12) consiste em uma geometria que mantém a distância sempre igual entre antena transmissora e a antena receptora ao longo de um perfil, dessa forma se obtém uma imagem aonde o eixo horizontal representa a posição das antenas e o eixo vertical as variações das propriedades dielétricas em subsuperfície (BORGES, 2004).

Figura 11 - Composição básica de um sistema GPR.



Fonte: Neal, 2004.

Figura 12 - Técnica de aquisição de perfil de reflexão com afastamento constante.



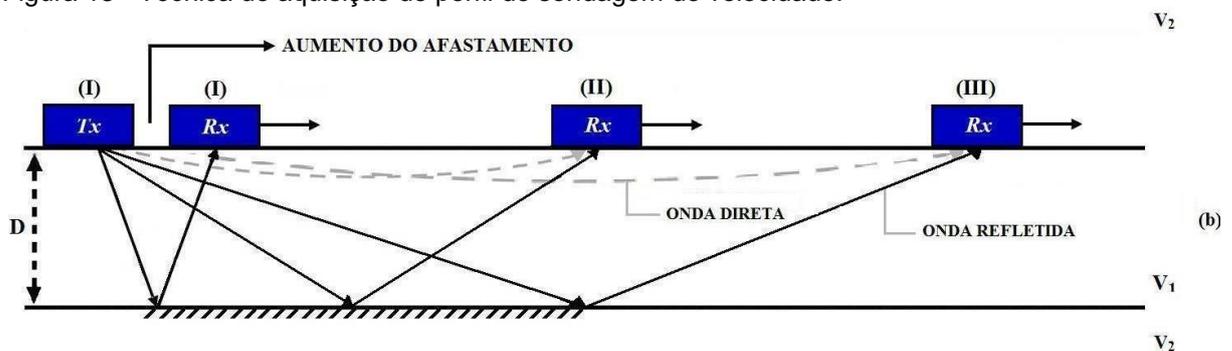
Fonte: Furtado *et al.*, 2010.

Sondagens de Velocidade

Essa forma de aquisição (Figura 13) tem como objetivo estimar a velocidade de onda do radar no meio, isso se dá principalmente pela conversão do tempo duplo dos perfis de reflexão em profundidade e da verificação se o refletor de

subsuperfície tem relação com um alvo proveniente da geologia ou de algum outro tipo de interferência da superfície (Borges, 2004), essa técnica pode ocorrer de duas formas distintas. A primeira é denominada de *Common Mid Point* (CMP) e consiste no espaçamento das antenas aumentando de acordo com que as mesmas se deslocam em sentidos opostos, obedecendo uma simetria, a partir de um ponto central. A segunda é denominada de *Wide Angle Reflection and Refraction* (WARR), nessa configuração uma antena permanece fixa enquanto a outra é afastada a cada intervalo de tempo determinado, ao final da aquisição é possível observar um gráfico da distância versus tempo no radargrama (FURTADO *et al.*, 2010).

Figura 13 - Técnica de aquisição de perfil de sondagem de velocidade.

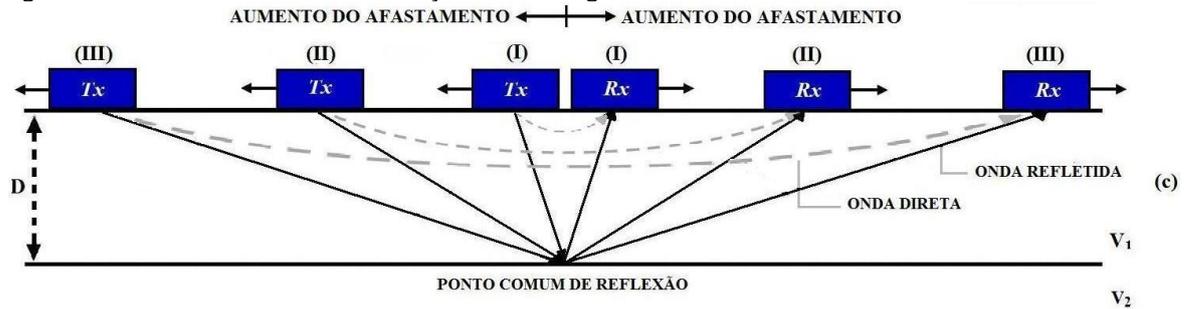


Fonte: Furtado *et al.*, 2010.

Técnica de Trans-iluminação ou Tomografia

Técnica (Figura 14) menos utilizada dentro as três citadas, geralmente se aplica a interior de poços e dividindo-se em quatro tipos de aquisições: i) common offset; ii) vertical radar profiling (VRP); iii) direta; e iv) variável. Nesse trabalho não será abordado a técnica de tomografia pois ela difere por completo do objetivo do mesmo e não será utilizada (FURTADO *et al.*, 2010).

Figura 14 - Técnica de trans-iluminação ou Tomografia.



Fonte: Furtado *et al.*, 2010.

4.1.1. Princípios físicos da reflexão de ondas eletromagnéticas do GPR

Segundo Neal *et al.*, (2000), as propriedades que controlam o comportamento da energia eletromagnética são a permissividade elétrica, condutividade elétrica e permeabilidade magnética. Essas propriedades determinam a capacidade da carga elétrica da matéria de se mover e estocar energia, esse movimento resulta na dissipação e na perda de energia.

De acordo com Furtado (2010) a Permissividade Elétrica (ϵ)(1) é a forma como as cargas se deslocam na presença do campo elétrico (em C/m^2), ou seja, está ligada diretamente ao campo (E) e ao deslocamento elétrico (D), e sendo χ_e a susceptibilidade elétrica do meio,

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} \quad [C/m^2] \quad (1)$$

Aborda o comportamento de elétrons, núcleos e moléculas polares ao ser influenciada por um campo elétrico externo. Sendo a Permissividade Elétrica relativa (2):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2)$$

Aonde ϵ é a permissividade no meio (F/m) e ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo (8854×10^{-12} F/m).

Segundo Furtado (2010) a Condutividade Elétrica (σ) é a capacidade de um material conduzir corrente elétrica (medida em S/m). Esta propriedade aborda o

comportamento de fluxo das cargas livres, correlacionadas a corrente, sendo submetidas a um campo elétrico. Regida pela Lei de Ohm, a condutividade elétrica (3) (Tabela 1) nada mais é do que a relação entre a densidade de corrente de condução (j) ao campo elétrico (E), ou seja, observa-se que a densidade de corrente é proporcional ao campo elétrico gerado,

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad [\text{S/m}] \quad (3)$$

A Permeabilidade Magnética (μ)(5) se relaciona a intensidade do campo magnético (H) e a indução magnética (B)(4) e é medida em Henry por metro (H/m),

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad [\text{H/m}] \quad (4)$$

Sendo μ dado por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (5)$$

Aonde μ é a permissividade magnética do meio e μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ F/m).

Neal (2004) aborda que ao aplicar um campo elétrico, as cargas do meio se movem gerando corrente elétrica, correlacionando com as propriedades supracitadas temos a condutividade que seria a mensuração da capacidade de transportar carga de acordo com o meio. O campo criado tende a migrar para uma configuração mais estável, no caso seria o seu estado original, a partir do armazenamento de energia. Sabendo disso temos que a permissividade elétrica seria a medida da capacidade do material de guardar carga elétrica e a permeabilidade magnética seria a capacidade de medir a energia elétrica estocada e perdida através da magnetização. Materiais de alta condutividade podem quebrar a relação acima, isso só é possível devido à presença em meios com água do mar ou materiais magnéticos.

Tabela 1 - Constante dielétrica (ϵ) e condutividade elétrica (σ), em materiais comuns.

Materiais Secos	ϵ	σ	Materiais Saturados	ϵ	σ
	Ar	1	0	Água Destilada	81
Areia Seca e cascalho	2-6	0,01	Água fresca	81	8,5
Argila seca	5	2	Água do mar	81	3000
Folhelho e siltito seco	5	1	Areia saturada	20 – 30	0,1 – 1
Calcário seco	4	0,5	Silte saturado	10	1 -10
Solo arenoso seco	2,6	0,14	Argila saturada	40	1000
Solo argiloso seco	2,4	0,27	Solo arenoso saturado	25	6,9
Sal seco	5 – 6	0,01 – 1	Solo argiloso saturado	15	50
Granito seco	5	0,01	Arenito saturado	20 – 30	40
Basalto seco	6	1	Siltito saturado	30	100
Diabásio seco	7	10	Folhelho saturado	7	100
Ferro	1	10^9	Calcário saturado	8	2
Aço	1	∞	Granito saturado	7	1
PVC	8	0	Basalto saturado	8	10

Fonte: PORSANI, 1999.

Considerando a velocidade de propagação no meio apenas a Condutividade elétrica e a Permissividade Elétrica exercem fator controlador, a Permeabilidade Magnética só exerceria algum tipo de influência em ambientes com presença de

minerais magnéticos. A velocidade de propagação (V)(6) da onda no meio pode ser representada por (Furtado, 2010):

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu}} \quad [\text{m/s}] \quad (6)$$

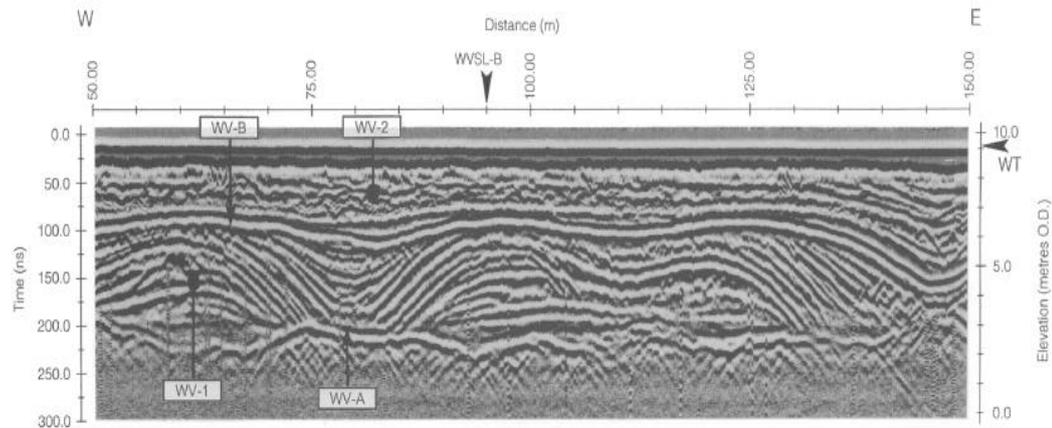
Sabendo que o meio é não magnético temos um valor unitário para μ sendo a equação anterior reduzida (7) para (c é a velocidade da onda EM no vácuo):

$$V = \frac{c}{\sqrt{\mu}} \quad [\text{m/s}] \quad (7)$$

4.3. ESTUDOS DE CASO

Neal e Roberts (2000) objetiva introduzir a técnica de GPR para aplicações em geomorfologia, sedimentologia, geoarqueologia em ambientes costeiros no norte de Liverpool (noroeste da Inglaterra). Neste trabalho, os autores realizaram um importante levantamento bibliográfico sobre a aplicação da técnica de GPR para diversas finalidades, descreve a configuração do equipamento em campo e as formas de processamento de dados. O estudo também aborda e estabelece as principais bases conceituais utilizadas na técnica nas áreas de sedimentologia, geomorfologia e geoarqueologia. Diferentes perfis de aquisição de dados foram realizados, para a obtenção das mesmas o autor menciona o uso de diferentes conjuntos de antenas em frequências diversas, a velocidade do meio foi definida através de um modelo tipo CMP (*Common Middle Point*). Foram realizadas linhas de sondagem em áreas de dunas barreiras e *spit's*. Nesses ambientes sedimentares, os autores caracterizaram faces delimitadas por contatos bem marcadas no radargrama, esses contatos foram denominadas de “limite de fácies de radar”. Identificaram também a presença do lençol freático, bem delimitado no radargrama (Figura 15). Tanto as fácies sedimentares, seus limites e o lençol freático, foram possíveis de serem identificados devido às diferenças de composição e de, por sua vez, propagação da onda no meio.

Figura 15 - Radargrama de um perfil utilizando a antena de 100 MHz: (WV-A,B) Limite de fásies de radar; (WV-1,2) Radar fásies; WT) Lençol freático; e (WVSL-B) Interseção com linha de aquisição B.

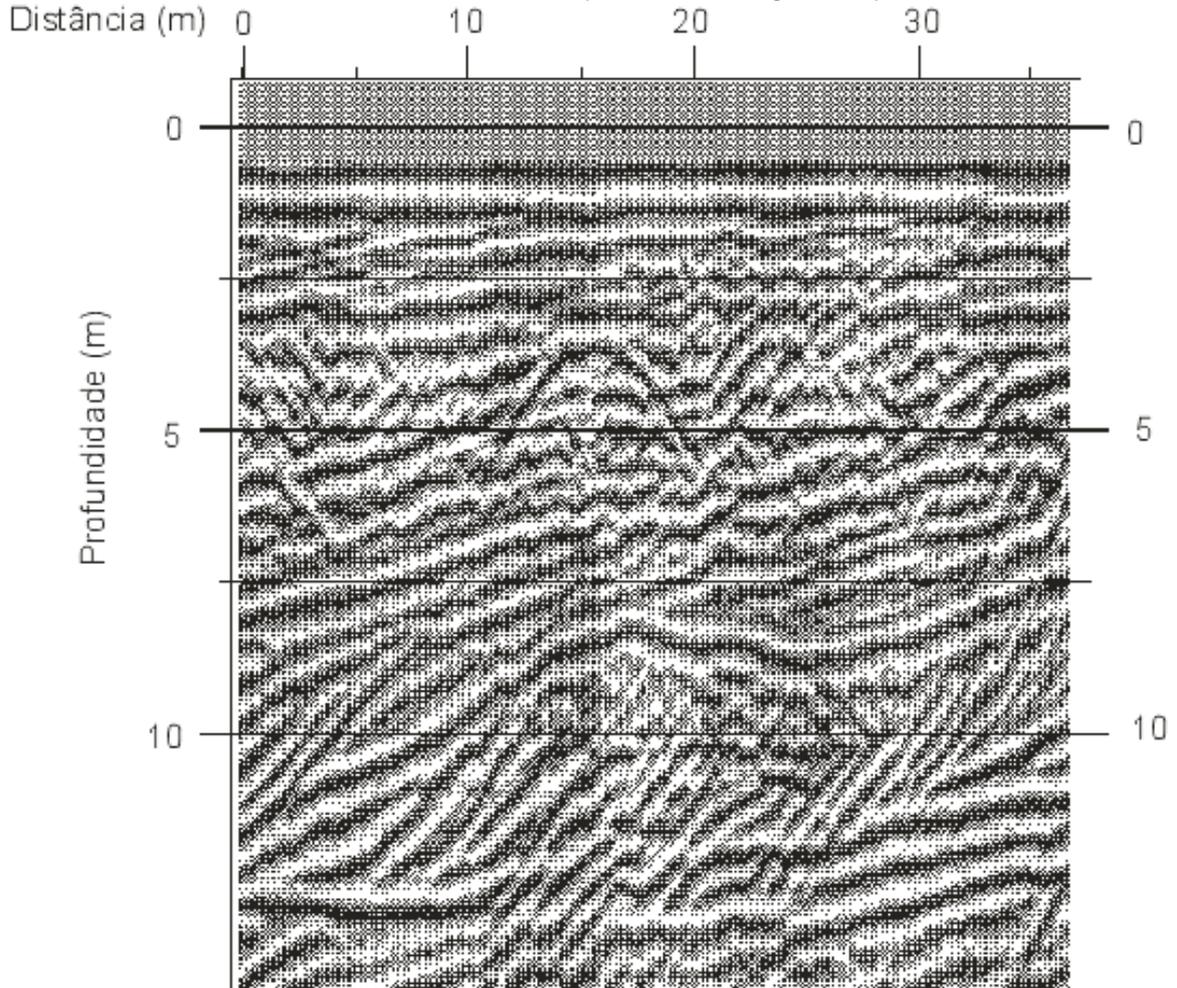


Fonte: Neal e Roberts (2000).

Dourado *et al.*, (2004) estudando áreas de lavra de areia no município de Descalvado (SP) detectou cavidades em arenitos utilizando gravimetria, eletrorresistividade e GPR. O estudo teve como objetivo detectar cavidades existentes no interior do arenito. Para isso, foram realizados levantamentos geofísicos (levantamentos gravimétricos, ensaios de resistividade e GPR. Todos esses levantamentos foram realizados em uma bancada onde, devido ao desmoronamento do teto, a cavidade ficou exposta. A cavidade é alongada e perpendicular à bancada, com 5 (cinco) metros de altura e 3 (três) metros de largura. Os ensaios com o GPR foram realizados com o sistema RAMAC de antenas bi-estáticas com frequência de 25, 50, 100, 200 e 400 MHz. Os arranjos utilizados foram do tipo *WARR* (*Wide Angle Reflection and Refraction*) e o *Common Offset*. O arranjo *WARR* tinha como principal objetivo determinar a velocidade de propagação da onda eletromagnética. Os dados foram processados utilizando o *software* GRADIX e consistiu nas seguintes etapas: i) edição dos radargramas; ii) determinação das velocidades de propagação das ondas eletromagnéticas em subsuperfície; e iii) transformação do perfil GPR em profundidade. Os radargramas foram obtidos a partir de caminhamentos perpendiculares ao maior eixo das cavidades, os mesmos demonstraram feições hiperbólicas (Figura 16), bem demarcadas, que indicam a posição da cavidade devido aos altos valores de resistividade. Os autores compararam os resultados de levantamentos gravimétricos, ensaios de resistividade e de radar de penetração de solo (GPR), baseados no contraste entre cavidades e o arenito presente na área, a fim de se corrigir dificuldades operacionais na extração de areia. As linhas foram levantadas em

várias sessões que cortavam a cavidade perpendicularmente ao eixo, os radargramas obtidos a partir das mesmas demonstraram hipérboles bem marcadas devida a diferença de condutividade elétrica e permissividade dielétrica entre a formação litológica e o vazio preenchido por ar referente a cavidade.

Figura 16 - Radargrama obtido utilizando a antena de 100 MHz. Observar a presença de hipérboles entre dez e vinte metros, as mesmas foram interpretadas como geradas por cavidades no arenito.

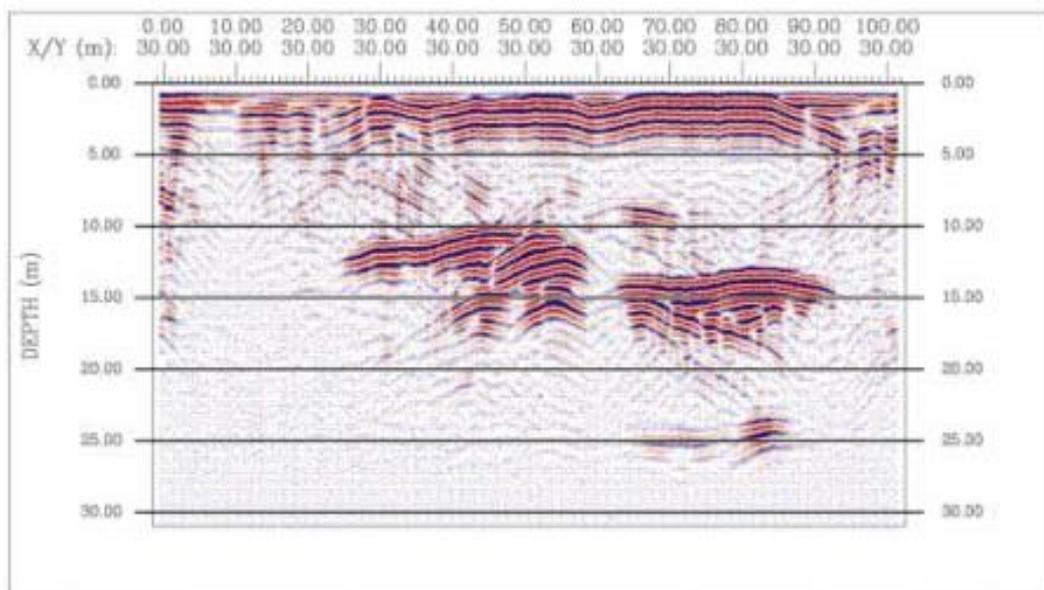


Fonte: Dourado et al., 2004.

Souza Junior *et al.*, (2002) procuram caracterizar e localizar fraturas em rochas graníticas no município de Capão Bonito-SP, para tanto os autores utilizam duas técnicas geofísicas distintas; i) a primeira é o uso do radar de penetração de solo; e ii) a segunda a resistividade elétrica. O principal objetivo do trabalho foi caracterizar o topo do embasamento rochoso, secundariamente o autor também buscou a localização das zonas de fraturas e possíveis juntas de alívio. Para a aquisição dos dados de GPR foi utilizado um equipamento RAMAC com as antenas

de 25, 50, 100 e 200 MHz e empregando a técnica do afastamento constante, as linhas de aquisição foram realizadas em três locais distintos, totalizando 693 metros de perfis de GPR. Dezenove sondagens foram realizadas pelo método WARR com o objetivo de se encontrar a velocidade de propagação da onda no meio, nesse caso foram utilizadas as antenas de 50, 100 e 200 MHz, a partir dessa aquisição foi determinada a velocidade de 0,1 m/ns que se demonstra compatível com o levantamento bibliográfico indicado no trabalho. Os radargramas demonstraram (Figura 17) refletores inclinados, sub-horizontais e hiperbólicos nítidos, observa-se aos 3 e 11 metros zonas de sombra interpretadas pelo autor como um dique de diabásio aflorante, observa-se também aos 5 metros um refletor inclinado interpretado como uma fratura, assim como, aos 10 metros existem refletores interpretados como fraturas e aos 13 metros dois refletores fortes foram interpretados como contato entre rocha granítica mais alterada com rocha granítica menos alterada. O autor conclui que o método demonstrou ser bastante efetivo para a localização de fraturas e diferentes tipos litológicos, resultado disso são refletores bem demarcados em profundidades que atingem até 30 metros.

Figura 17 - Radargrama adquirido utilizando antenas de 50 MHz.



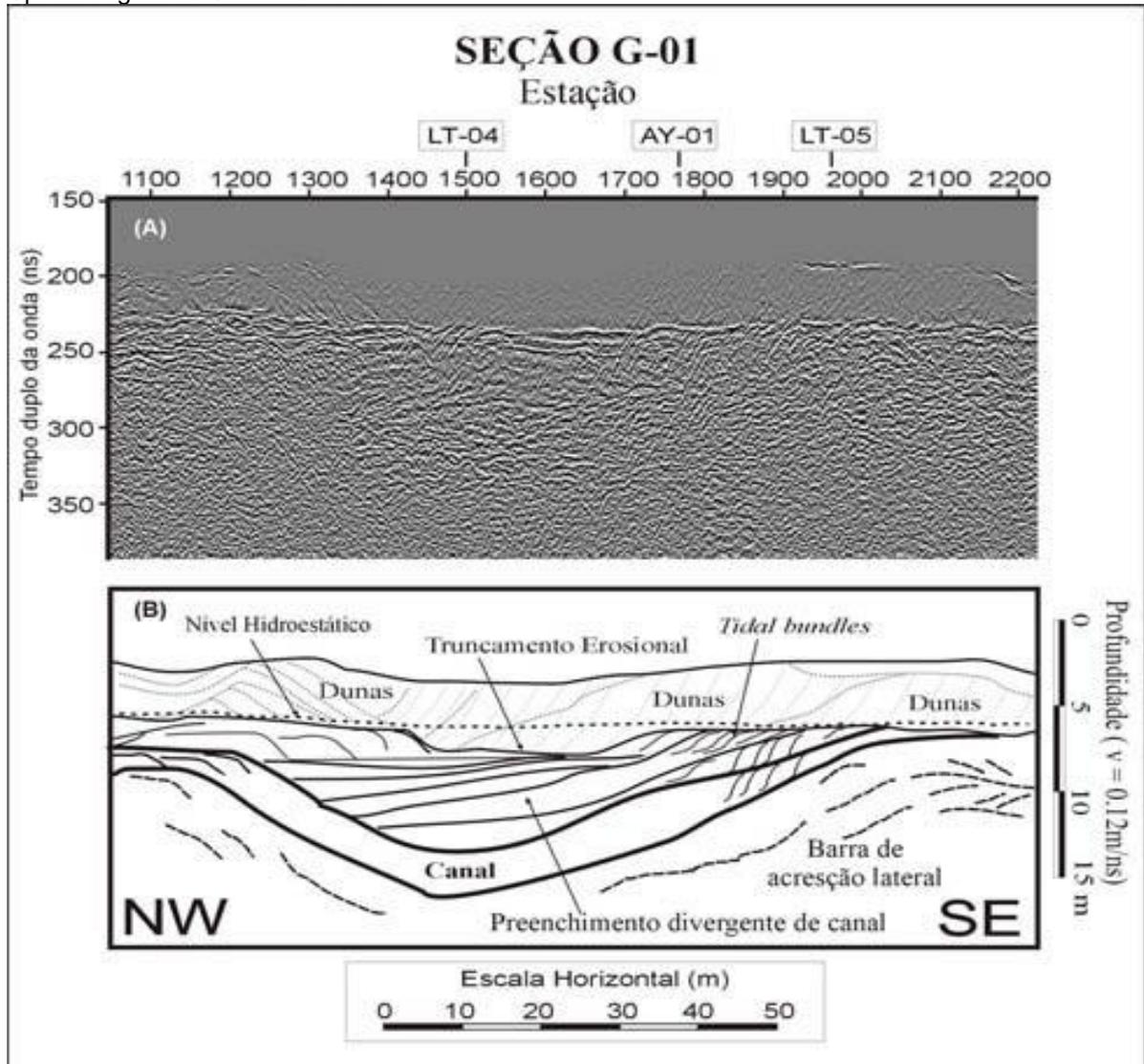
Fonte: Souza Junior *et al.*, 2002.

Lima (2004), em seu trabalho intitulado “Caracterização da dinâmica ambiental da região costeira do município de Galinhos, litoral setentrional do Rio Grande do Norte” buscou a caracterizar a dinâmica ambiental da região costeira de

Galinhos-RN. Dentre outros métodos utilizados pela autora, a mesma utilizou o GPR (*Ground Penetration Radar*) com o objetivo de confirmar a hipótese de que a região de Galinhos evoluiu a partir de um antigo sistema de ilhas barreiras. O estudo foi conduzido utilizando o GPR, modelo SIR system-2 da empresa GSSI com uma antena de 200 MHz e a aquisição dos dados foi dividida em 2 (duas) etapas: i) a primeira realizada com uma malha de onze seções; e ii) na segunda foram realizadas apenas 5 (cinco) seções em posições e direções distintas da primeira. Com o auxílio do GPR, buscou-se a localização e delimitação do canal e, a partir disso, encontrar a melhor forma de se imagear o mesmo. Concomitante ao levantamento com GPR, foi realizado o nivelamento topográfico para executar as correções topográficas na etapa de processamento. A utilização do GPR permitiu, especialmente, identificar a existência de paleocanais (Figura 18), comprovando que a formação do *Spit* de Galinhos ocorre através da evolução de um antigo sistema de ilhas barreiras. Além disso, a autora ressalta a importância do uso do GPR para: i) imagear em detalhe a estratigrafia e estruturação interna dos depósitos costeiros, presentes no *spit* tropical de Galinhos, possibilitando a reconstrução da história deposicional do mesmo; ii) prover informação detalhada relativo à estratigrafia e estruturação interna de depósitos arenosos costeiros em áreas tropicais.

Santos *et al.*, (2006) estudaram os depósitos da Formação Barreiras com base em reflexão por Ondas de Radar no norte do Estado do Rio de Janeiro e no sul do Estado do Espírito Santo. Os autores realizaram 3 (três) seções com antenas de 50 MHz utilizando o sistema GPR *pulseEko IV*. O objetivo dessa pesquisa foi aplicar o GPR na investigação da Formação Barreiras. Para atingi-lo foram realizados furos de sondagens, elaboração de seções geológicas e utilização do GPR (Figura 19). Para a interpretação destas imagens foram aplicados os princípios da sismoestratigrafia, permitindo a interpretação estratigráfica e de sistemas deposicionais. Para cada conjunto de refletores com configurações semelhantes, os autores consideram corresponder a uma fácies de radar, e cada conjunto de refletores concordantes, limitados por superfícies discordantes, consideram constituir uma unidade de radar.

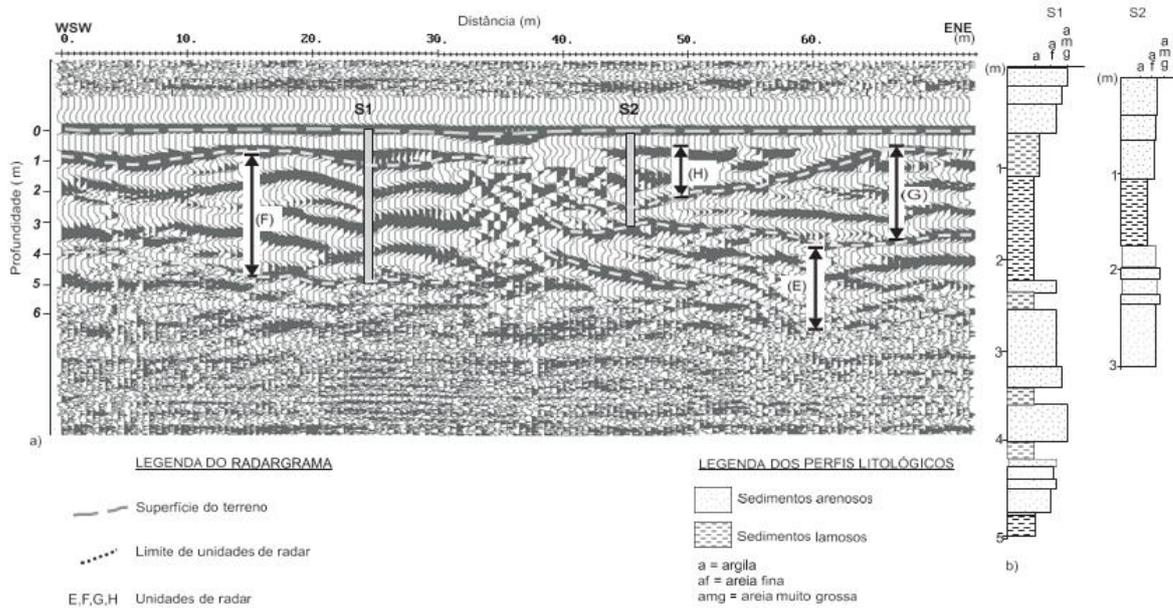
Figura 18 - Seção de direção NW – SE aonde se observa: A) Dado processado. B) Interpretação do dado aonde são demonstrados alguns elementos que corroboram a paleomorfologia formado do Spit na região de Galinhos – RN.



Fonte: Lima, 2004.

Ao final, os autores estabelecem a assinatura geofísica da Formação Barreiras, sendo constituída por 2 (dois) padrões distintos de refletores: i) um padrão que consiste em refletores contínuos, paralelos, as vezes pouco irregulares que correspondem a camadas tabulares de lamitos ou a intercalação de camadas lamosas e arenosas; ii) outro padrão de refletores relacionados a padrões de reflexão ondulados, com geometria côncava para cima, que correspondem a corpos lenticulares preenchidos por depósitos arenosos com estratificações cruzadas e sucessões granodecrescentes.

Figura 19 - Radargrama correlacionando a seções geológicas e interpretações obtidos na localidade de Araçatiba (ES).

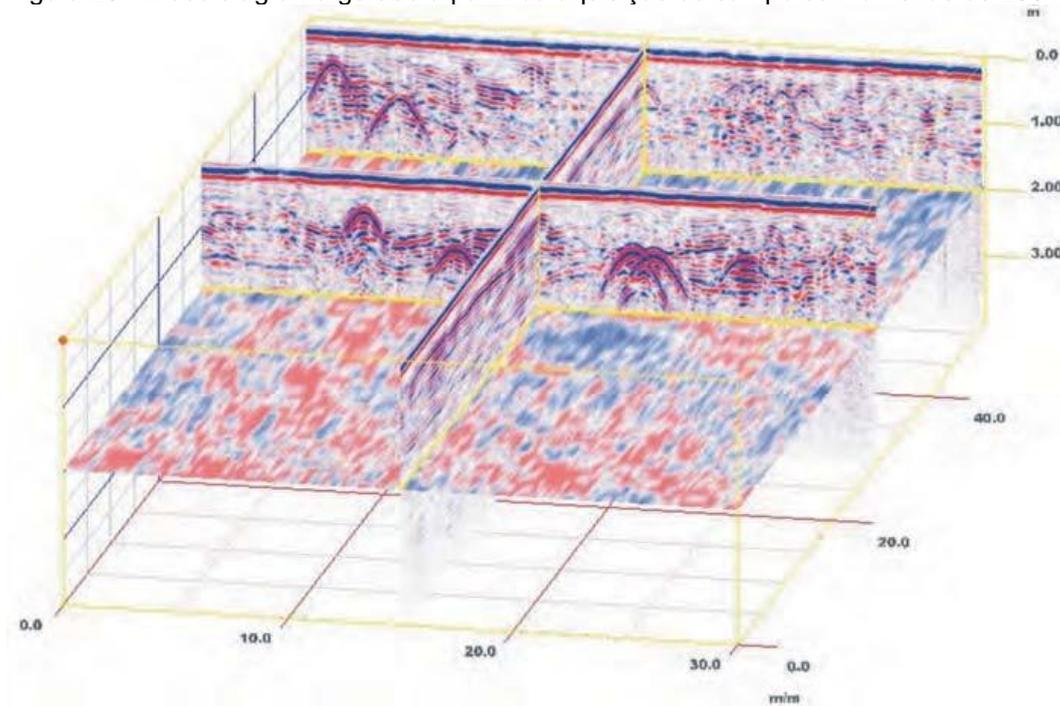


Fonte: Santos *et al.*, 2006.

Porsani *et al.*, (2006) em seu trabalho “O sítio controlado de Geofísica rasa do IAG/USP: Instalação e resultados GPR 2D-3D” interpreta uma área aonde são dispersos diversos tipos de materiais que simulam alvos encontrados em investigações geotécnicas, ambientais e arqueológicos. O objetivo do trabalho foi estabelecer respostas padrões típicas, a partir de alvos com propriedades físicas conhecidas, e extrapolar esses dados para aprimorar a interpretação de dados de geofísica rasa. A instalação do sítio controlado foi pioneira no Brasil, constitui assim uma área de grande valor para o ensino, pesquisa e extensão em geofísica rasa. Após o levantamento topográfico da área se iniciou a aquisição de dados de GPR, para tanto foi utilizado o equipamento Ramac/Mala com a antena de 250 MHz, no modo contínuo e usando antenas blindadas. Os alvos estudados foram agrupados por tipo de material e distribuídos ao longo de sete linhas, com profundidades variando de 0,5 a 2 metros em relação ao topo do alvo. No trabalho são demonstrados os resultados de 51 perfis GPR, com *stack* (empilhamento) de 32, na direção N-S, com intervalo entre os traços de 5 cm e espaçamento de 1 metro entre os perfis. O processamento dos dados utilizou o software *RADAN* (GSSI), nessa etapa foram realizados os seguintes processamentos: i) correção do tempo zero; ii) análise espectral; iii) filtragem temporal passa banda; iv) ganhos no tempo; v) migração-fk; e vi) conversão tempo/profundidade. O estudo conclui que a

obtenção da assinatura geofísica dos alvos (Figura 20), sob condições controladas, permite a calibração dos equipamentos e o embasamento de pesquisas em condições parecidas, a atividade ajuda a testar diversos tipos de métodos geofísicos que são rotineiros em aquisições para trabalhos geotécnicos, geológicos, ambientais e arqueológicos.

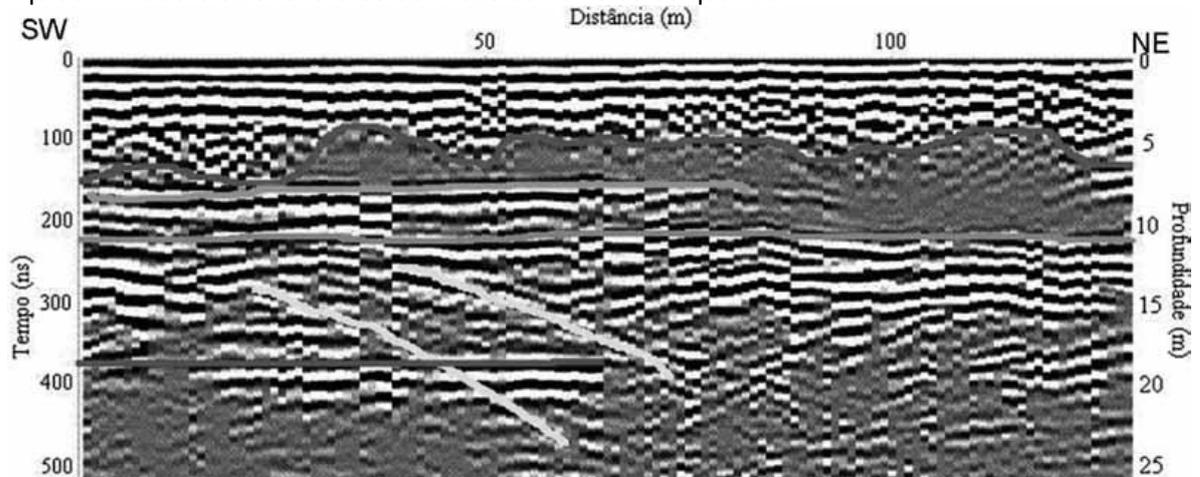
Figura 20 - Bloco diagrama gerado a partir da aquisição de campo com antenas de 250 MHz.



Fonte: Porsani *et al.*, 2006.

Santos *et al.*, (2009) comparou a investigação direta da água subterrânea e o radar de penetração no solo na área do aterro sanitário de Cuiabá (MT), para tanto o trabalho objetivou a realização de análises físico-químicas, exames bacteriológicos e levantamentos geofísicos na área de trabalho. Para a investigação direta da água subterrânea foram avaliados cinco poços de monitoramento, a amostragem dos mesmos seguiu a NBR 13.895/97 que se refere a construção de poços de monitoramento, esgotamento, coleta e preservação de amostras. Para a investigação geofísica foi utilizado o radar de penetração no solo (GPR), sendo realizados dois perfis com afastamento constante de dois metros e utilizando antenas não blindadas de 50 MHz. O trabalho demonstrou zonas com percolação de líquido lixiviado que foram denominadas de zonas de sombra (Figura 21), essas zonas são demonstradas em diversos locais dos radargramas.

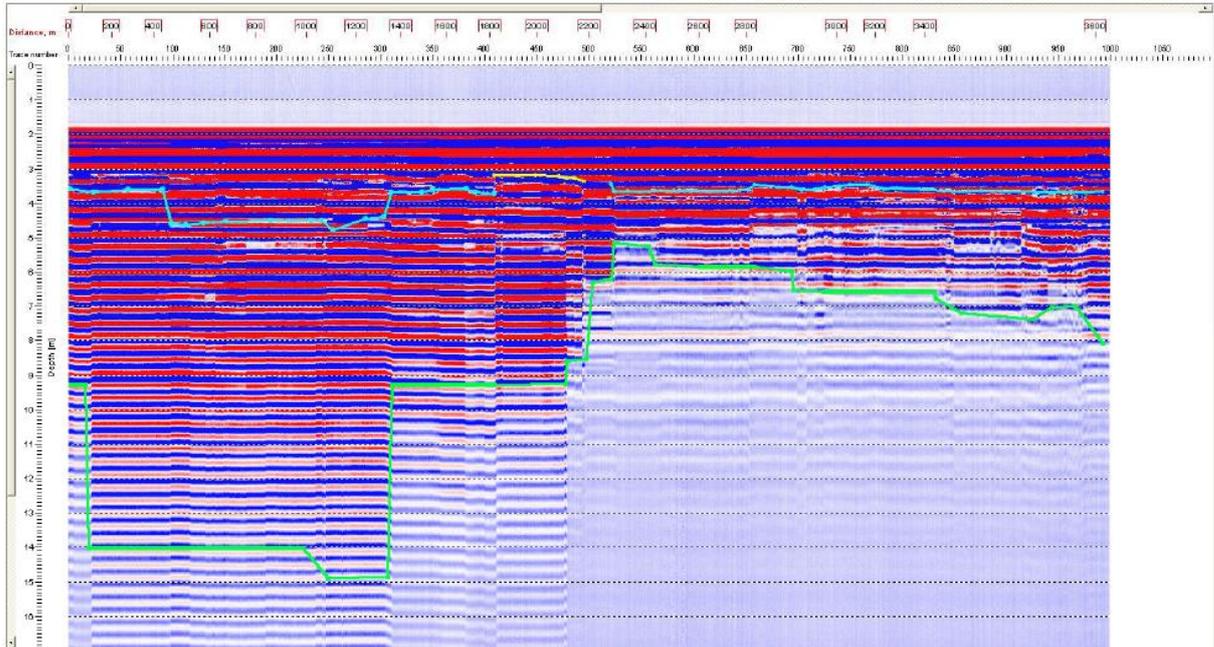
Figura 21 - Perfil adquirido na área de estudo demonstrando as zonas de sombra associadas a líquido lixiviado e dois refletores definidos como veios de quartzo.



Fonte: Santos *et al.*, 2009.

Almeida (2011) realizou um estudo abrangendo a modelagem geológica do entorno da lagoa de Jacarepaguá, o objetivo do trabalho consiste em realizar duas modelagens, batimétrica e geológica, baseadas em sondagens de GPR (Figura 22) e de furos de sondagem. O estudo têm como principal finalidade auxiliar a gestão governamental, atual e futura, assim como as empresas que atuam na área da construção civil. Para a modelagem batimétrica foi utilizado um veículo anfíbio e um sonar acoplado ao GPS, nessa etapa foram realizados caminhamentos com o conjunto para a obtenção de um modelo final que foi comparado com o georadar a fim de se ratificar ou retificar os dados. Para a modelagem geológica os dados foram coletados através da aquisição de diversas sondagens realizadas na área, a partir daí foram obtidos modelos litológicos e estratigráficos da área através do software *RockWare*. Apesar da dificuldade de obtenção de um bom radargrama, devido à influência salina do meio, o perfil foi utilizado para a validade dos modelos geológicos e batimétricos. O autor conclui, quanto a modelagem geofísica, que os resultados foram satisfatórios apresentando uma boa visualização espacial, no âmbito da modelagem geológica foi concluído que os dados de sondagem foram bem utilizados para montagem do modelo e que o mesmo foi de suma importância para a validação das sondagens geofísicas.

Figura 22 - Radargrama de antena não-blindada com frequência de 250 MHz.

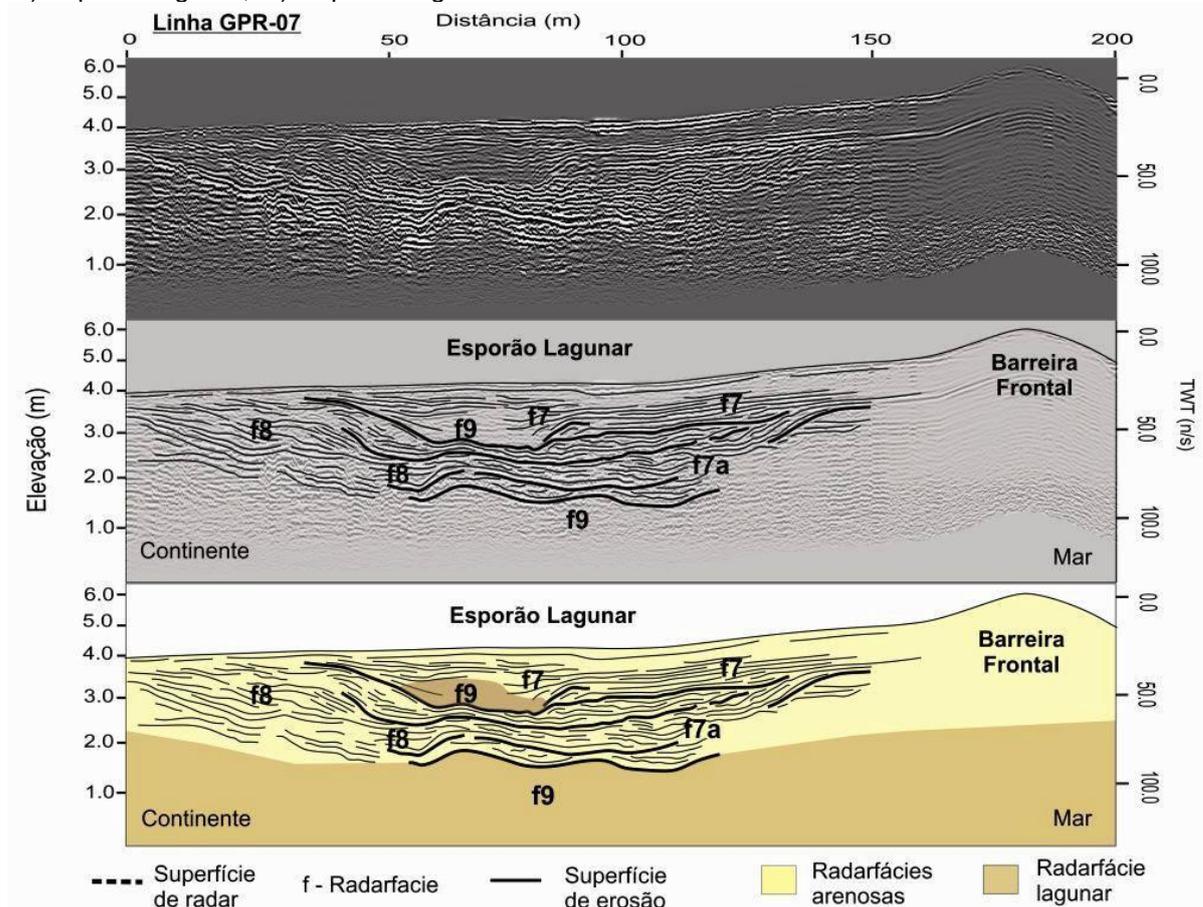


Fonte: Almeida, 2011.

Rocha (2013) analisou a planície costeira meridional do complexo deltaico do rio Paraíba do Sul (RJ): arquitetura deposicional e evolução da paisagem durante o Quaternário Tardio. O objetivo desse estudo aborda a caracterização da morfoestratigrafia e geocronologia da área. O trabalho foi desenvolvido a partir do mapeamento geomorfológico (1:25000), perfis de radar de penetração do solo (GPR) e sondagens a percussão. Os perfis de GPR foram realizados em modo *common-offset*, com antenas de 200 e 400 MHz e na direção longitudinal e transversal em relação a praia. No total foram aquisitados 9 (nove) perfis de radar somando 8 (oito) km de caminhada. Para a correção da profundidade foram realizados quatro perfis adicionais, os mesmos seguiram o modo *common midpoint* (CMP) aonde as antenas foram distanciadas em um intervalo de 20 cm até atingirem 20 metros de distância entre as mesmas. O software utilizado para o processamento dos dados foi o *RADAN 6.6* sendo que o autor utilizou o modo básico. Foram realizados os seguintes processamentos: i) ajuste do “tempo-zero”; ii) filtros e ganho; iii) geração de perfil de velocidade. As radar fácies mapeadas foram interpretadas como: sistemas barreira laguna e esporões lagunares. Apresentam característica regressiva na sequência deposicional e característica transgressiva no sistema barreira-laguna. A técnica de GPR (Figura 23) foi aplicada de forma a corroborar modelos pretéritos realizados na área, as novas técnicas de

GPR aplicadas junto a geocronologia preenchem novas lacunas da evolução da paisagem durante o Quaternário.

Figura 23 - Radargrama interpretado em: f7) Leques de transposição; f7a) Foresets de transposição; f8) Esporão lagunar; f9) Depósito lagunar.



Fonte: Rocha, 2013.

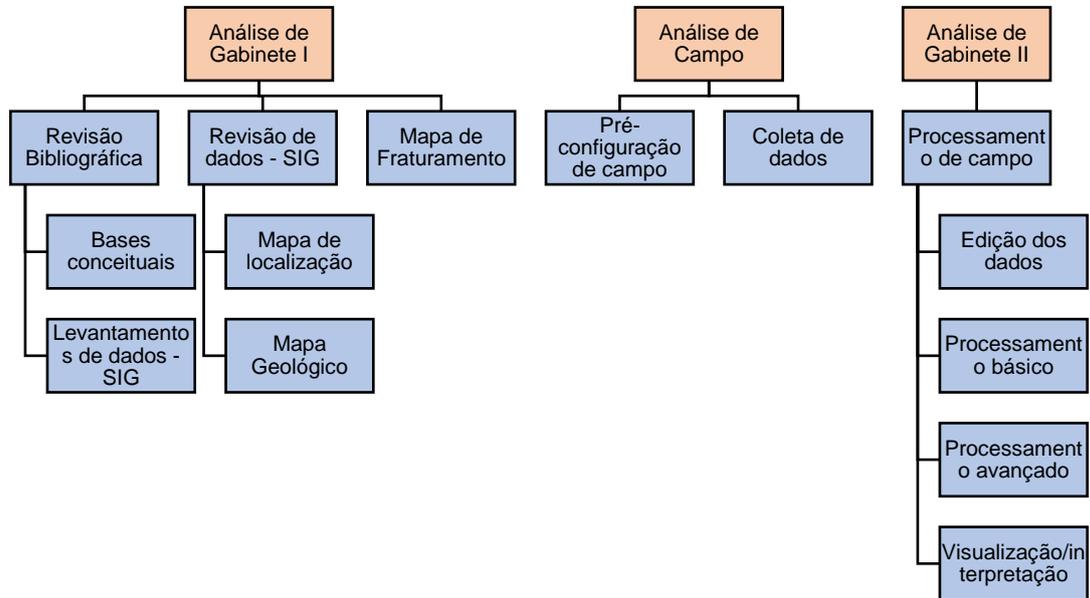
Neal (2004) estuda o uso do radar de penetração no solo na sedimentologia abordando os princípios, problemas e os progressos alcançados, para tanto, o autor aborda: i) princípios físicos do equipamento; ii) possíveis técnicas empregadas no ambiente sedimentar; e iii) resultados encontrados em diferentes aplicações nesse mesmo ambiente. Os objetivos do estudo se subdividem em: i) introduzir aspectos teóricos fundamentais para o entendimento da técnica de GPR e seu uso na sedimentologia; ii) abordagem das limitações da técnica de GPR examinando como radargramas não processados ou mal processados podem afetar a interpretação de estruturas sedimentares e de como objetos de origem não geológicas podem afetar a qualidade do processamento e interpretação do dado nesse mesmo ambiente geológico; iii) examinar as formas apropriadas de como o

dado processado pode melhorar a interpretabilidade do mesmo produzindo perfis que melhor reproduzam as estruturas sedimentares de subsuperfície; iv) criticar a qualidade das suposições provenientes das interpretações do dado de GPR para fins de pesquisa em ambiente sedimentar; e v) mostrar como a interpretação sistemática de perfis processados de GPR, através de uma estrita aplicação de sismoestratigrafia, pode maximizar as informações sedimentológicas extraídas e minimizar os erros de interpretação. Metodologicamente o trabalho consiste no levantamento bibliográfico de diferentes arranjos de antenas e configurações para aquisição de dados, demonstrando as limitações referentes para cada tipo, assim como os diferentes tipos de processamento de dados. O autor aborda também a interpretação de dados, nesse sentido ele aponta a similaridade com o modo de interpretação da sísmica de reflexão e demonstra como determinar fácies de radar, superfícies de radar e superfícies de contato a partir do formato dos refletores obtidos em um radargrama. O trabalho define que existe um amplo alcance de aplicações no campo da sedimentologia, esse mesmo campo de aplicações vem aumentando nas duas últimas décadas devido ao desenvolvimento de novos tipos de aquisição e processamento dos dados, esse desenvolvimento aliado a utilização dos princípios da estratigrafia demonstra uma metodologia efetiva.

5. METODOLOGIA

Para elaboração deste trabalho foram consideradas 2 (duas) etapas essenciais: i) análises de gabinete e; ii) análises de campo. Os procedimentos metodológicos para a elaboração desta pesquisa podem ser observados, de forma sintética, no fluxograma a seguir (Figura 24):

Figura 24 - Fluxograma detalhado demonstrando as etapas realizadas na elaboração da pesquisa.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

5.1. ANÁLISES DE GABINETE

As análises de gabinete foram realizadas em 5 (cinco) etapas: i) revisão bibliográfica e de dados cartográficos e de SIG; ii) elaboração de mapa de localização, edição de mapa geológico e interpretação de fotografias aéreas (Fotointerpretação); iii) mapa de fraturamento e; iv) processamento de dados de campo; v) interpretação de radargramas.

5.1.1. Revisão bibliográfica e de dados cartográficos

A revisão bibliográfica foi dividida em 2 (duas) etapas: i) levantamento das bases conceituais; ii) levantamento de dados cartográficos e de SIG sobre a área estudada.

Na etapa de bases conceituais foram consultados livros, artigos, monografias, dissertações, teses e artigos científicos nacionais e internacionais, referentes ao uso do GPR em trabalhos de Geociências. A partir dos estudos realizados foi possível criar uma base teórica e conceitual pertinente ao tema proposto no presente estudo.

A etapa de levantamento de dados cartográficos e de SIG da área estudada correspondeu à utilização de bases cartográficas e SIG para subsidiar a pesquisa, tais como: Ortofotos Digitais, Entidades Geográficas (*Shape file*) - (GEOBASES, 2002); Modelo Digital de Elevação (MDE), projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Esses dados foram acessados no Laboratório de Cartografia Geográfica e Geotecnologias (LCGGEO) do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Também foram utilizados os dados e mapas geomorfológicos e geológicos disponíveis na folha SE 24-Rio Doce do projeto Radam Brasil, na escala 1:1.000.000 (MENDES *et al.*, 1987; SILVA *et al.*, 1987), e o mapeamento geológico da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2015), na escala 1:400.000.

5.1.2. Elaboração de mapa de localização, edição de mapa geológico e interpretação de fotografias aéreas

Os mapas foram elaborados com o uso do *software* ArcGIS 10.1™ (ESRI, 2012). O acesso ao referido *software* foi disponibilizado pelo LCGGEO. Todos os mapas foram criados ou convertidos para a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), DATUM Geodésico Horizontal SIRGAS 2000, Fuso 24k.

O mapa de localização foi elaborado utilizando dados topográficos, hidrográficos e urbanos (GEOBASES, 2002), na escala 1:100.000, tendo como intuito a localização geográfica da área de estudo e sua relação com elementos como ocupação urbana, vias públicas e proximidade de corpos hídricos.

O mapa geológico foi elaborado utilizando dados hidrográficos, urbanos (GEOBASES, 2002) e geológicas (CPRM, 2015), na escala 1:400.000, com o intuito de caracterizar regionalmente as unidades geológicas encontradas na área

de estudo e proximidades. Desse mapa foram extraídos informações litológicas e litoestruturais.

O mapa geomorfológico foi elaborado utilizando dados topográficos, hidrográficos e geomorfológicos (GEOBASES, 2002) na escala 1:400.0000, com o objetivo de se caracterizar a área geomorfológicamente, nesse mapa foram identificados as principais unidades geomorfológicas para que as mesmas pudessem ser correlacionadas com suas respectivas unidades litoestruturais.

5.1.3. Lineamentos

A extração manual de lineamentos foi elaborada sobre sobre um Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE foi extraído do site <http://srtm.csi.cgiar.org/> (REUTER *et al.*, 2007) correspondente ao levantamento orbital realizado pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM-NASA) dos dias 11 e 22 de fevereiro de 2000. A imagem foi processada e aplicada a iluminação artificial de 315° obtida a partir da ferramenta “*Hillshade*” do ArcGis 10.1™ (ESRI, 2012). A elevação solar utilizada foi a de 45° e o estabelecimento do “*Z-factor*” foi calculado a partir da média entre dos valores das latitudes que englobam o Espírito Santo, sendo utilizado 0,00000934 (BRICALLI, 2011).

Em seguida foram extraídos os lineamentos com utilização da ferramenta de edição ArcGis 10.1™ (ESRI, 2012), considerando esses elementos de identificação: alinhamentos de cristas, vales, *trench's* de rios e lagos e depressões alongadas (LIU, 1984).

5.1.4. Processamento de dados de campo

Os dados de campo foram processados no programa RADAN7, desenvolvido também pela GSSI e licenciado para o Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), o programa oferece uma interface prática e didática para o processamento dos dados considerando as propriedades geofísicas do meio.

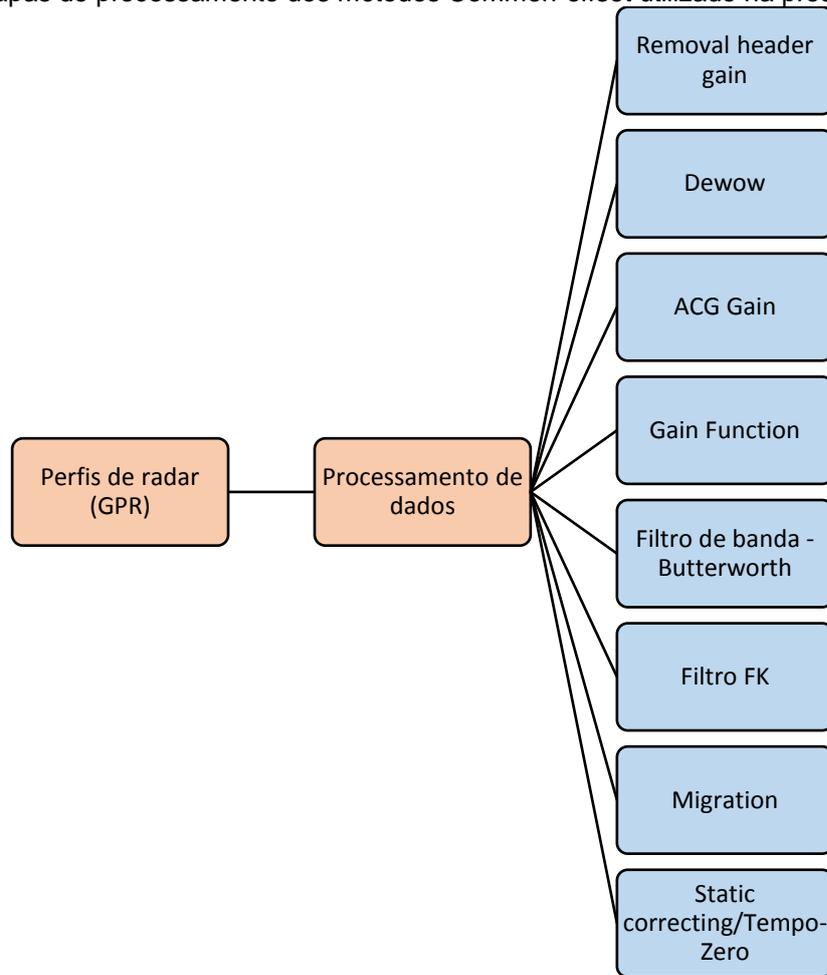
A etapa de processamento de dados se inicia na verificação dos parâmetros de aquisição de campo. Para Jol (2008) a transformação dos dados em informação pode seguir dois caminhos: i) o primeiro é correlacionado a métodos geofísicos aonde a resposta do GPR é representada em seções, planilhas ou volumes indicando alvos anômalos e ii) o segundo caminho consiste em extrair quantitativamente variáveis correlacionadas as propriedades das ondas (velocidade, atenuação e impedância) e depois traduzir as mesmas propriedades em dados quantitativos. Nesse trabalho é utilizado a segunda técnica já que foram aproveitadas variáveis, descritas em bibliografia, referente as propriedades das ondas no meio estudado.

O processamento de dados da presente pesquisa consistiu em: i) edição dos dados; ii) processamento básico; iii) processamento avançado; e iv) visualização/interpretação do processamento (JOL, 2008). Para se alcançar os objetivos de interpretação desta pesquisa foi necessário a utilização de métodos avançados de processamento (Figura 25), para tanto foram empregadas técnicas de filtros temporais, filtros de profundidade, ganhos de sinal, migração e correção do tempo zero, as quais serão explicadas detalhadamente nas linhas abaixo.

A remoção de ganho do cabeçalho (*Removal header gain*) consistiu na filtragem de traço aplicado ao inverso de uma curva de ganho que é dada assim que se faz a coleta do dado, extremamente útil já que um dos objetivos do processamento é a comparação do dado bruto com o dado processado em diferentes tipos de filtro de ganho (SANDMEIER, 2012). Esse filtro foi utilizado para que todo o fluxo de processamento fosse trabalhado a partir de um dado bruto, ou seja, sem nenhum tipo de processamento, já que após cada aplicação de filtro o dado obtido foi comparado com o dado inicial.

A filtragem *DEWOW* foi necessária devido à proximidade das duas antenas (transmissora e receptora). O campo gerado pela antena transmissora é composto por uma frequência baixa associada a campos indutivos e eletrostáticos, os mesmos decaem rapidamente conforme a distância entre as antenas aumenta.

Figura 25 - Etapas de processamento dos métodos Common-offset utilizado na presente pesquisa.



Fonte: Jol, 2008.

A energia de baixa frequência tem por característica ter um componente de variação de tempo lento no dado de campo medido, essa mesma energia causa uma curvatura no nível de base do dado e para esse efeito de curvatura para cima ou para baixo foi dado o nome de WOW. O filtro calcula a média entre os valores de cada traço, atuando em cada traço independentemente e eliminando o ruído de baixa frequência causadas por indução eletromagnética. O processamento para a retirada desse efeito (DEWOW) consistiu na aplicação de um filtro temporal (JOL, 2008).

O Ganho ACG (*AGC Gain*) facilitou a criação de amplitudes igualmente distribuídas no eixo Y (eixo do tempo) em uma janela predefinida. Para realizar esse ganho primeiro foi definido o tamanho da janela de tempo filtrado. O programa calculou uma média da amplitude sobre o alcance do tempo total para cada traço, depois disso o programa dimensionou cada valor de amplitude de forma que a amplitude média tenha o mesmo valor para cada janela selecionada em torno do

valor atual dentro de um traço. O tamanho da janela determinou o tipo de distribuição da amplitude. Após a aplicação do filtro todos os pontos dentro do dado foram automaticamente multiplicados por um fator de escala (SANDMEIER, 2012).

A função de ganho (*Gain function*) possibilitou agir em cada traço facilitando a possibilidade de multiplicação dos dados por uma determinada função $g(t)$ que é dada por (SANDMEIER, 2012):

$$g(t)=(1+a*t)e^{(b*t)} \text{ onde } a=a'/\text{tamanho do pulso e } b=b'*v/8.69 \text{ onde } v=0,1 \text{ m/s}$$

O dado foi multiplicado pela função para compensar perdas por espalhamento geométrico e o amortecimento do sinal (SANDMEIER, 2012).

O filtro de banda *Butterworth* agiu em cada traço independentemente. Esse filtro foi utilizado através da especificação de dois valores de frequência. O primeiro valor foi de corte de baixa frequência e o segundo valor de corte de alta frequência. Ao aplicar esse filtro com tais valores, todos as frequências acima do valor determinado de alta frequência e abaixo do valor determinado como baixa frequência tiveram valor igual a zero, sendo assim, todo ruído que não estava contido no intervalo de frequência escolhido foi suprimido do radargrama (SANDMEIER, 2012).

O Filtro “fk” permitiu que seja aplicado um filtro definido dentro do domínio frequência-tamanho da onda em uma parte selecionada do dado. O filtro agiu através da utilização da transformada de Fourier do intervalo de dados no domínio tempo-espaco para o domínio frequência-número de onda, assim gera o fk -spectrum que é utilizado para atenuar ruídos de refletores inclinados e enfatizar mergulhos. Nesse trabalho foi utilizada a entrada manual dos pontos que definem as margens da área que o filtro será aplicado, esses pontos são conectados por linhas retilíneas o que cria um retângulo no alvo filtrado (SANDMEIER, 2012).

A Migração (*Migration*) é uma forma de deconvolução espacial que tenta reconstruir a distribuição geométrica correta da refletividade do radar em subsuperfície. Essa técnica de processamento requer a velocidade de propagação na estrutura, isso faz com que o processo seja interativo já que se faz necessária um ajuste constante na velocidade de propagação para a otimização da imagem (JOL, 2008). O filtro foi utilizado com o objetivo de corrigir a distribuição geométrica das ondas refletidas no meio estudado, dessa forma o resultado do radargrama é

interpretado de uma forma mais fácil já que os refletores obedecem padrões mais claros de reflexão.

A Correção Estática (*Static function*) é um filtro de correção que pode mover o perfil para cima ou para baixo, em relação ao eixo X, agindo em cada linha independentemente. Nesse trabalho tem a função de eliminar a faixa de dado que é equivalente a onda aérea reajustando assim o perfil para a posição real de aquisição de dado em subsuperfície (SANDMEIER, 2012).

5.1.5. Interpretação de radargramas

Segundo Jol *et al.*, (2003) os radargramas são interpretados a partir da observação dos princípios da sísmica de reflexão (Figura 26), ou seja, essa interpretação se faz através do conceito que as reflexões obtidas no radargrama são resultados de superfícies de acamamento e inconformidades.

Os dados foram interpretados através da associação das reflexões obtidas, a partir do comportamento da onda no meio, com padrões de reflexões sísmicas encontradas no referencial teórico. A partir a configuração dos refletores obtidos no radargrama é possível associar os mesmos com diferentes tipos de substratos, sejam eles litológicos, artificiais ou até mesmos litoestruturais se considerarmos substratos rochosos afetados por estruturas como fraturas, falhas, juntas, estruturas de dissoluções, diques e veios.

O bom entendimento da resposta da técnica GPR aos diferentes meios é um instrumento facilitador, é importante saber diferenciar os diferentes tipos de respostas possíveis quando se trabalha em meios muito fraturados ou maciços. Maciços fraturados terão um padrão de reflexão mais caótico enquanto reflexões ligadas a camadas sedimentares apresentam padrões laminados, sub-horizontais, concordantes e coerentes (XAVIER NETO, 2006).

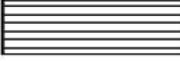
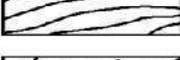
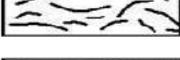
Refletores em formato de hipérbole geralmente são interpretados como alvos artificiais ou interferências de estruturas em superfície (BORGES, 2007).

Devido aos tipos de substratos litológicos aonde foram realizados os caminhamentos alguns refletores aparecem com mais frequências nos radargramas interpretados. Nessa pesquisa foram abordadas rochas ígneas e metamórficas maciças, rochas sedimentares e litotipos com algum tipo de

descontinuidade geológica (juntas, veios, diques etc), ou seja, existe uma grande diversidade de padrões de reflexões nos radargramas obtidos. Segundo a classificação de Haeni (1988) os padrões de reflexão encontrados com mais frequência são os de reflexão livre, livre com difrações, onda, oblíquo e caótico.

Foram encontradas também reflexões em formato de hipérbole e a elas são associadas dois tipos de interpretações; i) Hipérboles fechadas foram interpretadas como estruturas enterradas, tirantes geotécnicos por exemplo; ii) Hipérboles abertas foram interpretadas como interferências de estruturas em superfície, plantas com raízes relativamente grandes e postes por exemplo.

Figura 26 - Tipos de reflexões encontradas em litologias diversas.

TIPOS DE CONFIGURAÇÕES DE REFLEXÃO			INTERPRETAÇÃO	
Configuração de Reflexão Livre	Reflexão Livre		1) Atenuação de Energia 2) Sedimentos Lacustrinos Siltosos 3) Areia, acamamento espesso ou maciço 4) Til, maciço, alguns matacões	
	Reflexão Livre com Difrações		1) Sedimentos, maciço e matacões	
Configuração de Reflexão de Acamamentos	Acamamento Simples	Paralelo		1) Silte e laminações finas 2) Areia e laminações espessas
		Onda		1) Silte e Areia, acamamento 2) Areia e acamamento
		Hummockv		1) Areia e acamamento 2) Areia e cascalho e acamamento
	Acamamento Complexo	Oblíquo		1) Areia e acamamento delgado a espesso
		Sigmóide		1) Silte e acamamento delgado 2) Areia e acamamento delgado
Configuração de Reflexão Caótica	Caótico		1) Areia e Cascalho e estratigrafia cruzada	
	Caótico com Difrações		1) Areia, estratigrafia cruzada e matacões 2) Til, maciço e numerosos matacões	

Fonte: Haeni (1988, *apud* Furtado, 2010).

5.2. ANÁLISES DE CAMPO

O trabalho de campo consistiu nas investigações de radar de subsuperfície objetivando a realização dos perfis geofísicos e na coleta de dados geológicos.

O equipamento GPR utilizado corresponde ao modelo SIR3000 (Figura 27) da empresa GSSI (*Geophysical Survery Systems Inc.*) pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

O equipamento é formado por uma unidade de controle digital e unidade de antena que consiste em duas antenas, transmissoras e receptoras que se encontram blindadas por um invólucro de resina. Nessa pesquisa o equipamento foi utilizado em um carro transportador, uma das rodas do mesmo contém um odômetro que, conectado a unidade de controle, é responsável pela mensuração da distância percorrida nos perfis levantados.

Figura 27 - GPR GSSI3000 com a antena de 270MHz, 1) Equipamento completo, vista do operador; 2) Equipamento em perfil; 3) Unidade de controle; 4) Antena de 270 MHz.



Organizador: Diego Silva da Rocha.

Alguns fatores influenciam a penetração do sinal no meio (BORGES, (2002), são eles: i) espalhamento geométrico; ii) atenuação pelo terreno; e iii) partição da energia nas interfaces. Esses fatores estão correlacionados a perda de energia durante a propagação da onda no meio. O autor afirma também que a resolução do GPR está diretamente relacionada a frequência da onda e assim a profundidade de penetração. A relação determina que quanto maior a frequência, maior será a resolução vertical e menor a profundidade de penetração. Para estudos em materiais geológicos as antenas mais utilizadas do modelo SIR3000 estão no intervalo de frequência que varia de 15 MHz a 400 MHz (Tabela 2).

Tabela 2 - Antenas configuradas para utilização em material geológico.

Frequência	Profundidade de penetração	de Aplicações
------------	----------------------------	---------------

15-80 MHz	0 – 50 metros	Geologia
100 MHz	2 – 15 metros	Geotecnia e Geologia
200 MHz	0 – 9 metros	Geotecnia, Geologia e Meio Ambiente
270 MHz	0 – 6 metros	Engenharia e Geotecnia
400 MHz	0 – 4 metros	Engenharia, Geotecnia e Meio Ambiente.

Fonte: SANDMEIER, 2012.

Nesta pesquisa foi utilizada a antena de 270 MHz já que os pontos estudados são compostos por rochas aflorantes ou com uma pequena faixa de aterro recobrando os mesmos, foi priorizado assim a resolução vertical em detrimento a profundidade de penetração já que um dos objetivos da pesquisa aborda a identificação de litoestruturas locais que por muitas vezes se apresentam na ordem centimétrica.

Para início da análise em campo foi estabelecida a pré-configuração de antena. Considerando a antena de 270 MHz sabemos que a mesma possui uma profundidade de penetração de até 6 (seis) metros de profundidade, foi pré-configurada para um alcance de 100 nanossegundos (ns), com 512 amostras por escaneamento, resolução de 16 bits, 3 pontos de ganho, 120 escaneamentos por segundo e utilizando filtros de banda passa alta e baixa configurados em 700 MHz e 75 MHz respectivamente (TERRASIRCH, 2004).

Em seguida, outras configurações de campo foram utilizadas para melhor se adaptaram ao tipo de meio encontrado. Essas configurações são relacionadas a possíveis ganhos de sinal que melhor ajudem a reproduzir o meio e a calibração para o tipo de material encontrado. Nos pontos estudados são encontrados predominantemente granitos porfiríticos (Pontos UFES-PETROBRAS e Pedra da Cebola), outras litologias dispostas na área são arenitos esbranquiçados com intercalações de argilitos (Formação Barreiras) e depósitos fluviais argilo-arenosos e arenosos recentes, sabendo disso o equipamento foi configurado para valores de constante dielétrica e condutividade elétrica que fossem condizentes com o tipo de substrato encontrado em subsuperfície. O equipamento permite que seja escolhido entre 4 (quatro) tipo de opções que melhor representem o substrato estudado,

nessa pesquisa foi optado pela opção “Tipo de solo 1” pois a mesma é configurada para as litologias encontradas na área estudada. Dentro deste grupo, existe a seguinte classificação: i) areia seca; ii) cascalho; iii) granito; iv) arenito; e v) terra seca. A escolha desse grupo se deu com base nas leituras dos furos de sondagem obtidos da área e o mapeamento de campo realizado em etapas anteriores.

5.2.1. Coleta de dados

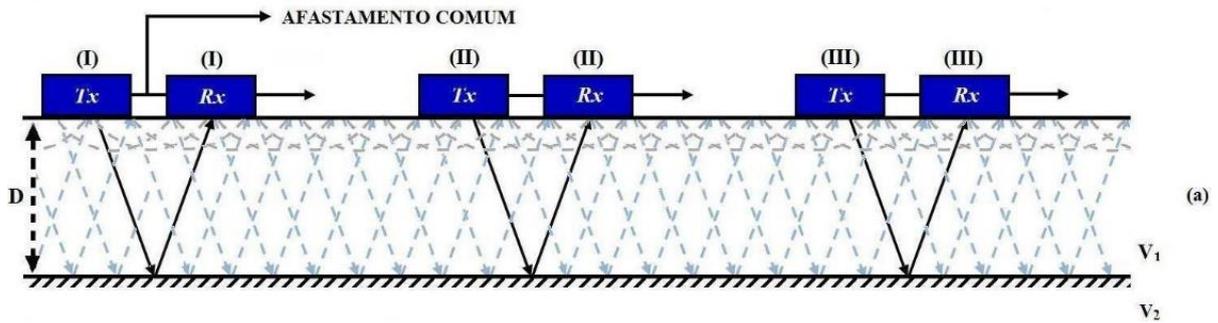
A coleta de dados foi realizada de duas formas concomitantes, a realização dos perfis geofísicos e a descrição de litologias e estruturas nos pontos estudados.

Os perfis foram realizados no modo Common-offset (Figura 28), é o método mais convencional e se constituiu no posicionamento da antena de forma perpendicular à linha de levantamento, ele é dado por:

Perfil de Reflexão com Afastamento Constante (*Common-offset*)

Essa técnica consiste em uma geometria que mantém a distância fixa entre antena transmissora (Tx) e receptora (Rx) ao longo de um perfil, dessa forma se obtém uma imagem aonde o eixo horizontal representa a posição das antenas e o eixo vertical as variações das propriedades dielétricas em subsuperfície (BORGES, 2004). O tempo entre transmissão, reflexão e recepção da onda é mensurado em nanosegundos (10^{-9} s) e denominado de *two-way-travel* (TWT). O primeiro pulso de onda recebido é denominado de *airwave* e o segundo *ground wave*, esses dois pulsos foram desprezados já que não representam a subsuperfície e mascaram os primeiros refletores (ROCHA, 2013).

Figura 28 - Técnica de aquisição de perfil de reflexão com afastamento constante.



Fonte: Furtado *et al.*, 2010

A localização dos perfis respeitou o levantamento de dados prévios da área e o reconhecimento de campo, dessa forma eles foram dispostos em direções que facilitarão a obtenção do melhor radargrama possível. Os caminhamentos foram realizados dentro da área aonde haviam dados de sondagem, em campanhas de campo realizadas de Janeiro a Abril de 2018, dessa forma é possível comparar as diferentes respostas dos radargramas com a modelagem geológica, quando não foi possível a realização do caminhamento sob o ponto exato do furo de sondagem o mesmo foi deslocado para que houvesse a maior possibilidade de correlação possível entre os dados de sondagem e os radargramas. Testes de aquisição foram realizados de abril a setembro de 2017 afim de se estudar a melhor configuração possível do equipamento, esses testes foram conduzidos em área similar aos pontos de estudo desse trabalho.

A etapa de coleta de dados geológicos consiste na descrição das litologias e estruturas dispersas na área de estudo, a partir do mapa geológico (Figura 7) foi realizada a descrição das principais litologias e estruturas nos pontos. A descrição litológica foi realizada através da amostragem e descrição macroscópica dos litotipos presentes na área, para tanto foram utilizados materiais como cadernetas de campo, martelo geológico, cartela mineralógica, lupa e trena. A descrição de estruturas é realizada através da medição das principais estruturas geológicas observadas nos afloramentos, para tanto é utilizado uma bússola de precisão tipo *Brunton Pocket Transit*.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados e as discussões que decorrem a partir deles abrangem alguns aspectos, são eles: i) a análise do mapa de lineamentos para que as estruturas encontradas em campo sejam correlacionadas com o comportamento tectônico regional; e ii) análise pontual dos radargramas extraídos na área de estudo.

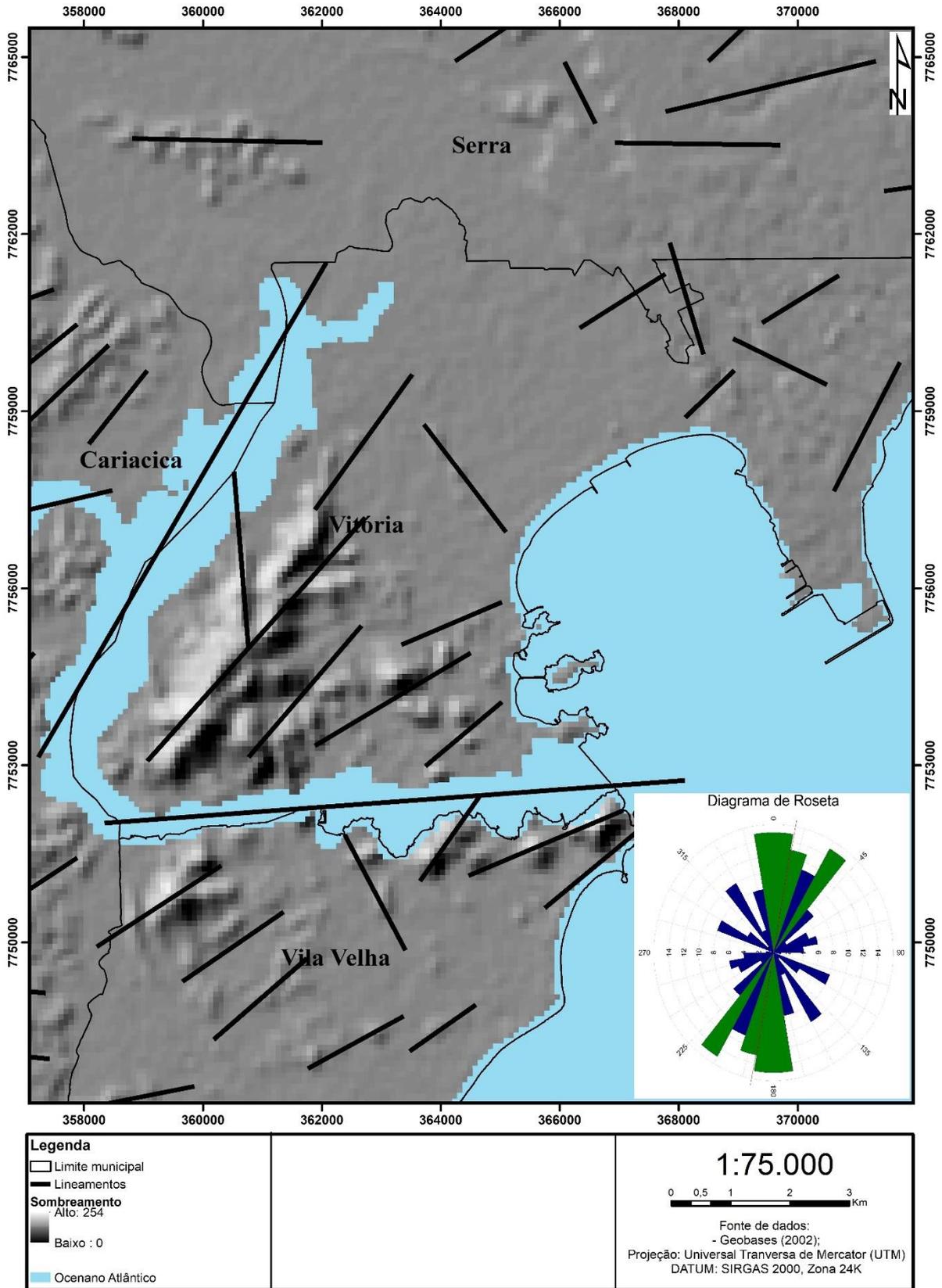
6.1. ANÁLISE DE LINEAMENTOS

O mapa de lineamentos (Figura 29) foi elaborado de forma manual, na escala 1:75000, abrangendo a área da RMGV e com um total de 122 (Cento e vinte e dois) lineamentos. O diagrama de roseta demonstra uma maior concentração de lineamentos na direção NE-SW, N-S e NW-SE. Os lineamentos que possuem maior comprimento tem direção NE-SW. Outra observação interessante é a densidade de lineamentos, observa-se que a densidade dos maiores lineamentos (14 – 42) possuem orientação NE-SW. Correlacionam-se as direções correspondentes a Faixa Colatina, com *trend* estrutural NW-SE e NE-SW na porção mais cenozoica da área (Depósitos Fluviais argilo arenosos e Formação Barreiras), e com um *trend* NW-SE mais a sul da área.

Os padrões observados demonstram uma distinção clara mesmo em uma escala local, dessa forma podemos concluir que o mesmo reflete os padrões regionais observados em trabalhos anteriores (BRICALLI, 2011; RIBEIRO, 2010).

Os lineamentos encontrados mostram que há uma predominância de estruturas NE-SW, seguido de lineamentos NNW-SSE. O predomínio de lineamentos NE-SW, pode ser explicado pela predominância de falhas, fraturas e foliações de direção NE-SW, relacionadas à estruturação da Faixa Ribeira, cortadas quase que perpendicularmente por estruturas de orientação NW-SE (MACHADO FILHO *et al.*, 1983; PEDROSA SOARES e WIEDEMAN-LEONARDOS, 2000; BRICALLI, 2011);

Figura 29 - Mapa de lineamentos da área que abrange os pontos estudados sobre MDE na iluminação de 315°. Diagrama de rosetas demonstrando a maior densidade de orientações dos lineamentos (verde) assim como a mediana das orientações (vermelho) e as demais orientações (azul).



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Os lineamentos NNW-SSE pode estar associado a Faixa Colatina, que é a mais importante feição estrutural no estado do Espírito Santo.

6.2. ANÁLISE GEOFÍSICA

Os radargramas foram elaborados em 2 (duas) áreas: i) UFES (*Campus* de Goiabeiras) – Afloramento da antiga PETROBRAS; e ii) Parque Pedra da Cebola.

6.2.1. UFES (*Campus* de Goiabeiras) – Afloramento da antiga PETROBRAS

A área é composta por rochas do embasamento pré-cambriano e adjacente à rocha, encontra-se um material de aterro (Figuras 31, 32 e 33), de aproximadamente 1 (um) metro de profundidade segundo observações feitas em campo, que recobrem essas rochas, caracterizado por um material bastante heterogêneo do ponto de vista textural. Parece existir paleossolo junto ao material de aterro, observação feita através da interpretação de determinadas áreas do radargrama, mostrando um padrão caótico. Apresenta também autólitos de rocha máfica classificados como microdioritos. Sobre o material do aterro foi elaborado o radargrama 1, com orientação (NE-SW).

As amostras coletadas neste ponto foram descritas como rochas máficas de coloração preta com índice de cristais melanocráticos orientados na direção do fluxo magmático. As rochas apresentam estrutura anisotrópicas com textura holocristalina, inequigranular, fanerítica, de granulação média a grossa com pórfiros de feldspato. Mineralogicamente (Tabela 3) a rocha é constituída por quartzo, biotita e plagioclásico.

Figura 30 - Mapa de localização do transecto 1, mostrando a direção do Radargrama elaborado na orientação 020 (NE-SW), localizado na UFES (Campus de Goiabeiras) – Afloramento da antiga PETROBRAS.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Figura 31 – Rocha plutônica (porção superior da foto) e aterro da área da UFES (Campus Goiabeiras) antiga Petrobrás (porção inferior da foto), com destaque para o transecto, mostrando a orientação de elaboração do radargrama.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Figura 32 – Detalhe do transecto, mostrando a orientação de elaboração do radargrama no aterro da área da UFES (Campus Goiabeiras) antiga Petrobrás.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Tabela 3 - Composição mineralógica das amostras coletadas.

Mineralogia	Percentual (%)
Quartzo	50%
Biotita	40%
Plagioclásio	10%

Elaboração: Diego Silva da Rocha

O quartzo ocorre anédrico, xenomórfico, com fratura colchoidal e com granulação fina. A biotita ocorre euédrica, como palhetas tabulares dispersas na matriz e de granulação variando entre fina e média (Figura 34). O feldspato ocorre anédrico, podendo ser representado em pórfiros, dispersos na matriz mas com sua maior porção de granulação média. A rocha plutônica é classificada como Granitóide, segundo Streckeissen (1978).

Figura 33 - Granito porfirítico do afloramento da UFES (Campus Goiabeiras) antiga Petrobrás, também observado em todo o Maciço Vitória.



Elaboração: Diego Silva da Rocha

Os autólitos (Figura 35) encontrados no afloramento da rocha plutônica da UFES (Campus Goiabeiras) antiga Petrobrás, são descritos como rocha máfica de coloração preta e cristais ultramelanocráticos. A mineralogia da rocha consiste em Plagioclásio e K-feldspato. A rocha é classificada como Microdiorito de acordo com

suas características composicionais e estruturais, apresentando textura afanítica e equigranular.

Figura 34 - Figura representando os autólitos encontrados na rocha plutônica do afloramento da UFES (Campus Goiabeiras) antiga Petrobrás, demarcado em vermelho na foto.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Na área existem estruturas rúpteis (Figura 36) possivelmente a esforços tectônicos. As fraturas apresentam espaçamento que varia entre milimétricos a decimétricos.

Figura 35 - Fratura presente no afloramento, observa-se o espaçamento da mesma que pode variar entre milimétrico a decimétrico.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Três famílias de fraturas na porção mais a SW do mesmo apresentam comportamentos distintos. O primeiro padrão se refere a parte mais superior do afloramento e apresenta direções entorno de 140/30. O segundo padrão fica na porção intermediária do afloramento e apresenta direções em torno de 160/40. O terceiro padrão fica na porção mais inferior do afloramento, quase no contato entre o mesmo e o aterro, e apresenta direções em torno de 165/40.

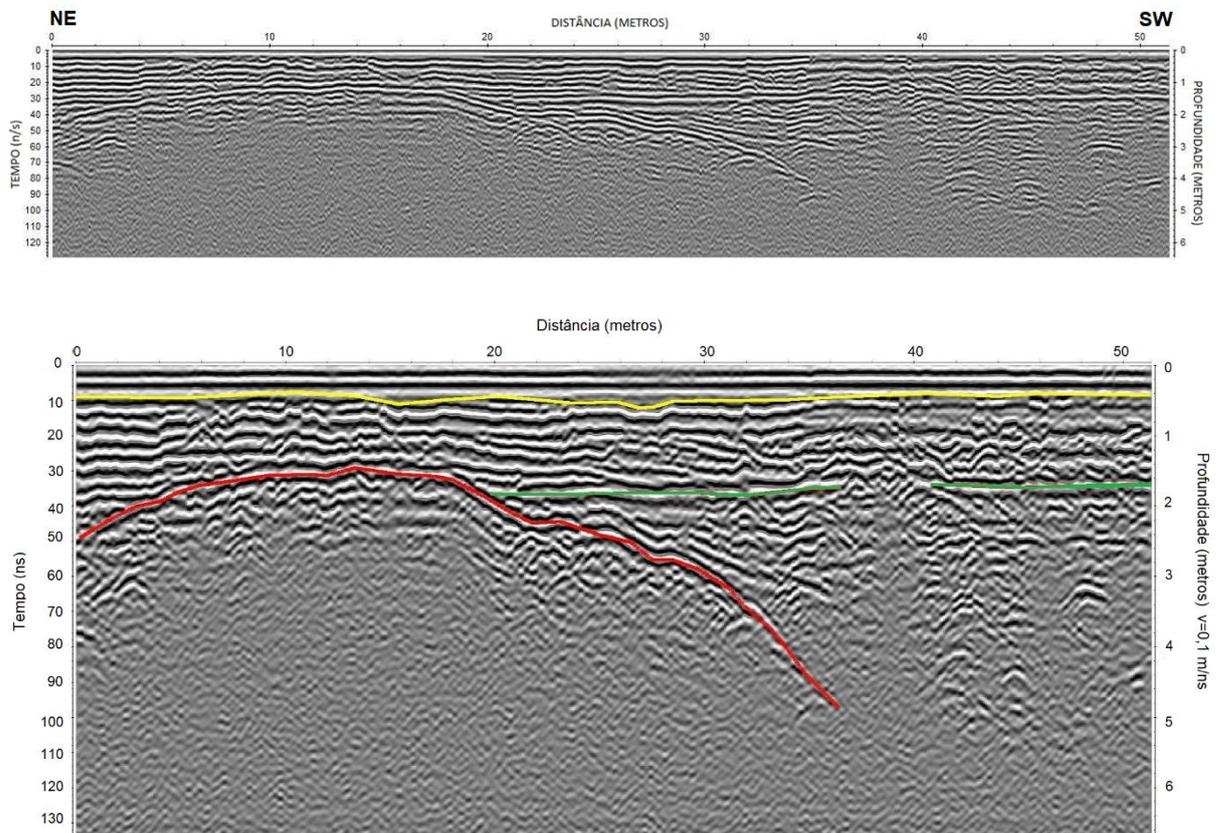
6.2.1.1. Radargrama 01 (NE-SW)

O transecto foi realizado na direção NE-SW e possui cinquenta e dois metros (52 metros) de comprimento, e uma profundidade de aproximadamente 6 (seis) metros.

O radargrama (Figura 37) apresenta 2 (duas) zonas: i) a primeira vai até cerca de 70 ns e apresenta refletores horizontais e subhorizontais; ii) a segunda

zona ocorre de 70 ns até 120 ns e é constituída basicamente de ruído de sinal e alguns refletores subhorizontais. Na primeira zona, os refletores horizontais, podem ser interpretados como a unidade de aterro seguida de um possível paleossolo. Na unidade de aterro os refletores são bem demarcados e completamente horizontais, sendo que próximo aos 40 ns podemos observar o contato entre refletores horizontais e um outro tipo de refletor caótico, podendo ser interpretado como uma zona de alteração da rocha, podendo ser interpretado pela presença de argilominerais e a formação inicial dos horizontes de um paleossolo. O radargrama apresenta um refletor subhorizontal que demarca o contato entre o embasamento cristalino e as unidades sobrepostas ao mesmo (aterro e paleossolo). Esse mesmo refletor demarca também o mergulho do afloramento exposto (Figura 31) sob a unidade de aterro. Após os primeiros 20 metros do perfil um segundo refletor bem demarcado estabelece o contato do aterro com uma área dominada por paleossolo (Figura 37).

Figura 36 - Radargrama da área da UFES (Campus Goiabeiras) antiga Petrobrás demonstrando as três unidades descritas (unidade de aterro, unidade de embasamento e unidade de paleossolo) demarcadas.

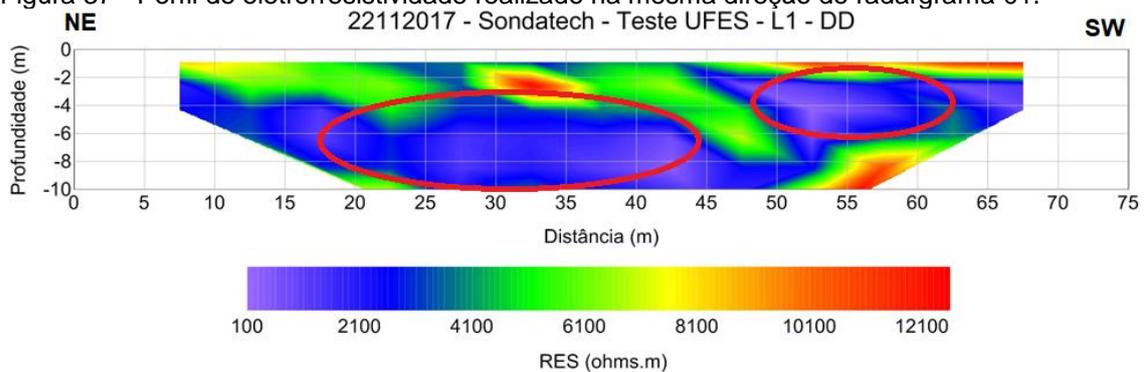


Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Litotipos e estruturas geológicas em subsuperfície

O radargrama não reflete com clareza estruturas litológicas como fraturas e autólitos observados em campo, no entanto, a partir de um perfil de eletroresistividade (Figura 38), possuindo a mesma orientação do radargrama, e em, aproximadamente, nas profundidades de 2 (dois) e 6 (seis) metros, pode-se interpretar que as porções que variam de 20 (vinte) a 35 (trinta e cinco) metros e 40 (quarenta) a 55 (cinquenta e cinco) metros de comprimento, respectivamente, exista um maior conteúdo de água, ou seja, locais onde possivelmente existem fraturas preenchidas por solo húmido ou até mesmo água, devido a menor resistividade apresentada (Figura 38).

Figura 37 - Perfil de eletroresistividade realizado na mesma direção do radargrama 01.
22112017 - Sondatech - Teste UFES - L1 - DD



Fonte: Rocha *et al.*, (2018)

Contato entre rochas do embasamento pré-cambriano e os depósitos tecnogênicos

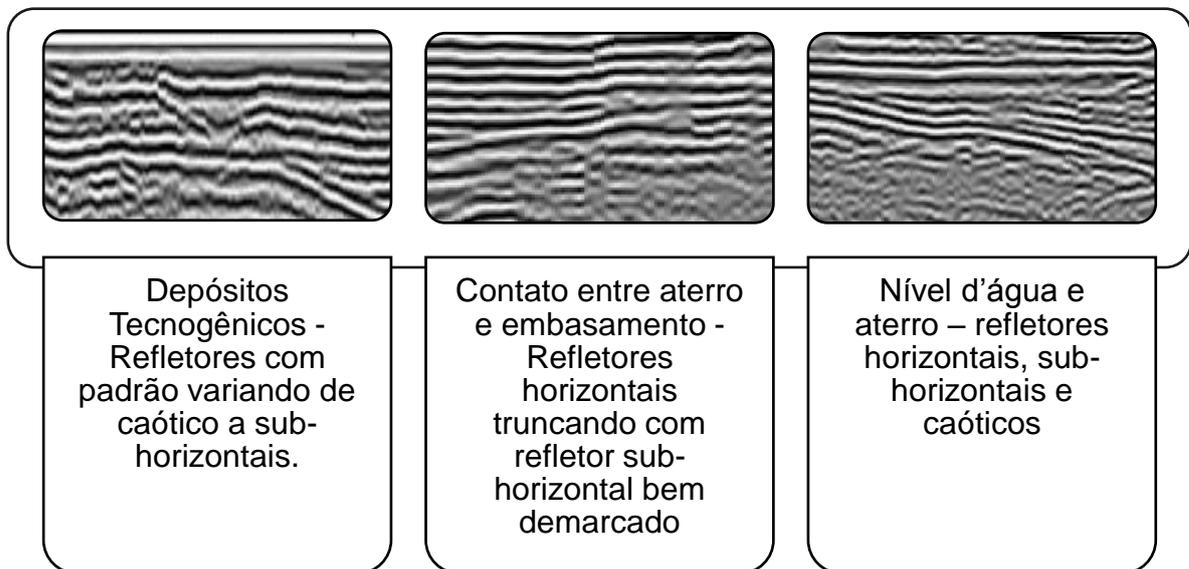
Esse radargrama tem como principal característica a observação nítida do contato entre o embasamento pré-cambriano e a área que abrange os depósitos tecnogênicos em quase toda a sua extensão. Esse mesmo contato é caracterizado por um refletor forte e concavo que abrange o perfil entre 30 e 50 ns (Figura 37) e se demonstra nítido do início do radargrama até aproximadamente 35 metros. Devido a presença de água, e possivelmente a presença de um material desagregado mais argiloso, a partir dos 35 metros de extensão, o contato entre a rocha do embasamento pré-cambriano e os depósitos tecnogênicos desaparece no radargrama, ou seja, os refletores subhorizontais passam a caóticos até

desaparecerem nessa região do radargrama, esse comportamento é típico de regiões aonde existe uma mudança composicional evidente do material.

Assinatura geofísica dos principais dos litotipos

O ponto estudado demonstrou 3 (três) assinaturas geofísicas (Figura 39) que se destacam dentro do radargrama: i) a primeira é referente aos Depósitos Tecnogênicos que apresentam refletores de padrão caótico a sub-horizontais; ii) a segunda assinatura é referente a um refletor bem demarcado e que varia entre horizontal a sub-horizontal interpretado como o contato entre o Embasamento cristalino e a área de Depósito Tecnogênico; e iii) a terceira assinatura é referente a um refletor horizontal a subhorizontal podendo ser caótico em determinadas porções e pode ser interpretado como a assinatura de uma área onde existem, possivelmente, porções de solo interagindo com estruturas rochosas consolidadas, ou seja, podensu refletir um processo de intemperismo e a formação de regolito na área.

Figura 38 - Principais assinaturas geofísicas da área estudada.



Elaboração: Diego Silva da Rocha

6.2.2. Parque Pedra Da Cebola

Nessa localidade (Figuras 40 e 41) foram realizados 4 (quatro) perfis em diferentes direções e tamanhos. Os perfis foram realizados nas direções NE-SW,

E-W e NW-SE e possuem entre 29 (vinte e nove) e 34 (trinta e quatro) metros de comprimento e uma profundidade máxima de 6 (seis) metros.

Figura 39 - Mapa de localização dos transectos da área da Pedra da Cebola.



Elaboração: Diego Silva da Rocha

Figura 40 - Representação do ponto estudado.



Organização: Diego Silva da Rocha

A litologia da rocha nessa área consiste em rochas máficas de coloração preta com índice de cristais melanocráticos orientados na direção do fluxo magmático. As rochas apresentam estrutura anisotrópicas com textura holocristalina, inequigranular, fanerítica, de granulação média a grossa com pórfiros de feldspato. Mineralogicamente (Tabela 4) a rocha é constituída por quartzo, biotita e plagioclásico.

Tabela 4 - Composição mineralógica das amostras coletadas.

Mineralogia	Percentual (%)
Quartzo	50%
Biotita	40%
Plagioclásio	10%

Elaboração: Diego Silva da Rocha.

O quartzo ocorre anédrico, xenomórfico, com fratura colchoidal e com granulação fina. A biotita ocorre euédrica, como palhetas tabulares dispersas na matriz e de granulação variando entre fina e média. O feldspato ocorre anédrico, podendo ser representado em pórfiros, dispersos na matriz mas com sua maior porção de granulação média. Rocha plutônica classificada como Granitóide (Figura 42) segundo Streckeissen (1978).

Figura 41 - Granitóide encontrado no ponto de estudo.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Foram encontradas, em diversas porções da rocha, famílias de juntas (Figura 43) perpendiculares umas às outras, esse padrão foi interpretado como planos de fraqueza na rocha.

Figura 42 - Granito com fraturas preenchidas por solo no ponto de estudo.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Duas famílias de fraturas na porção mais a SW do mesmo apresentam comportamentos distintos. O primeiro padrão se refere a parte mais superior do afloramento e apresenta planos 180/65, orientação NNE-SW. O segundo padrão se apresenta praticamente em posição ortogonal a primeira família, dessa forma possui planos com medidas de 270/43 e 275/50, orientação E-W.

6.2.2.1. Radargrama 02 (NE-SW)

O primeiro transecto (02) tem direção NE-SW, possui 6 (seis) metros de profundidade e 29 (vinte e nove) metros de comprimento.

O radargrama 02 (Figura 44) apresenta uma zona de refletores até 40 ns. Nessa área podemos observar refletores horizontais na porção central do mesmo; já nos extremos do perfil radargrama 02 é possível observar refletores sub-horizontais e algumas hipérbolas, essas duas áreas foram interpretadas como locais aonde existem presença de famílias de juntas (Figura 43) dessimétricas preenchidas por solo.

Litotipos e estruturas geológicas em subsuperfície

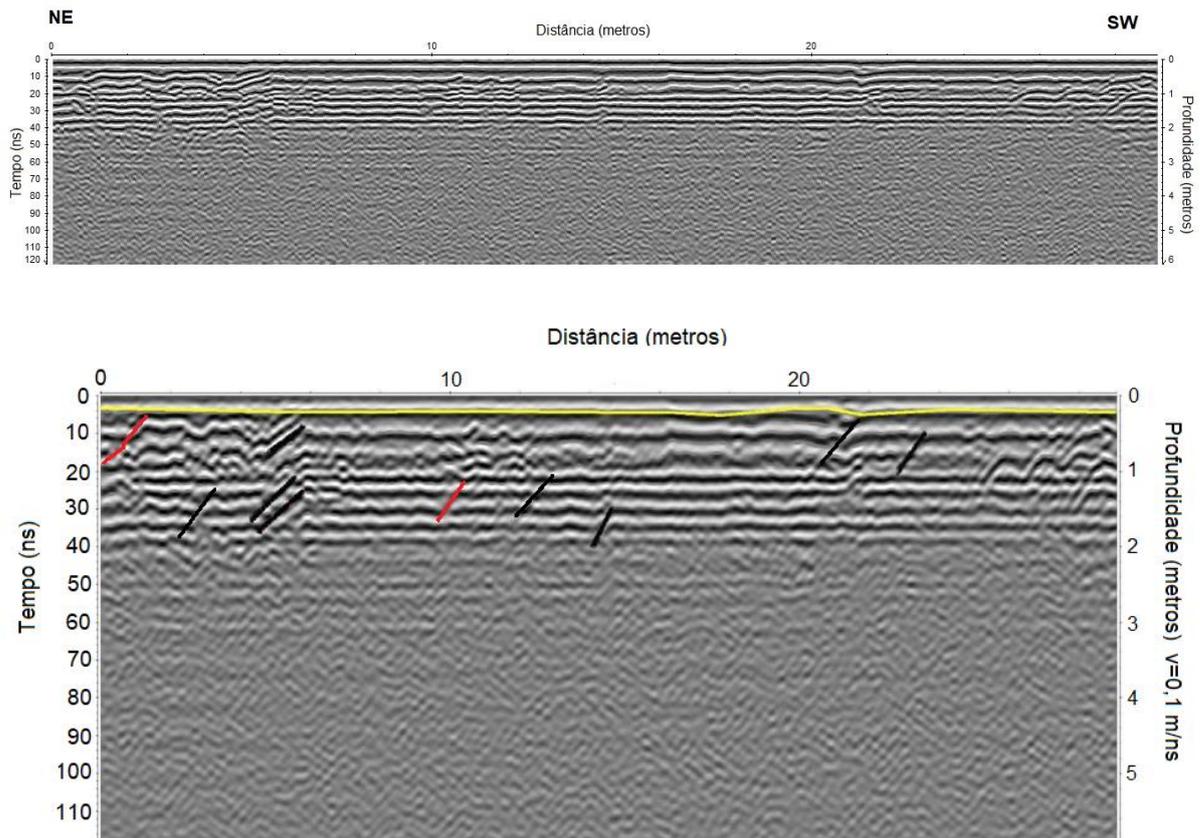
O radargrama demonstra uma área homogênea do ponto de vista geológico, onde quase toda a área demonstra refletores característicos do granito pertencente ao embasamento Pré-Cambriano, ou seja, demonstra refletores horizontais a subhorizontais com quase nenhum contraste com refletores de outro formato. Algumas estruturas são identificadas na área, apresentando quebras na continuidade dos refletores e são identificadas como produto do fraturamento da rocha, tendo representações nas camadas mais superiores e nas camadas mais profundas, também preenchidas por solo (Figura 44).

Contato entre rochas do embasamento pré-cambriano e os depósitos tecnogênicos

O contato entre o solo e o embasamento é caracterizado por refletores superficiais e abaulados nas posições de 4 (quatro) metros e 22 (vinte e dois) metros. Devido a inexpressividade da porção de solo presente nesses pontos e em todo o restante do perfil, não existe um refletor típico e bem demarcado que seja

representativo do contato entre as duas unidades citadas. A interpretação da presença de solo no local só foi possível através da comparação entre as fotos de campo e o radargrama (Figura 44).

Figura 43 - Radargrama 02, área localizada no Parque Pedra da Cebola.

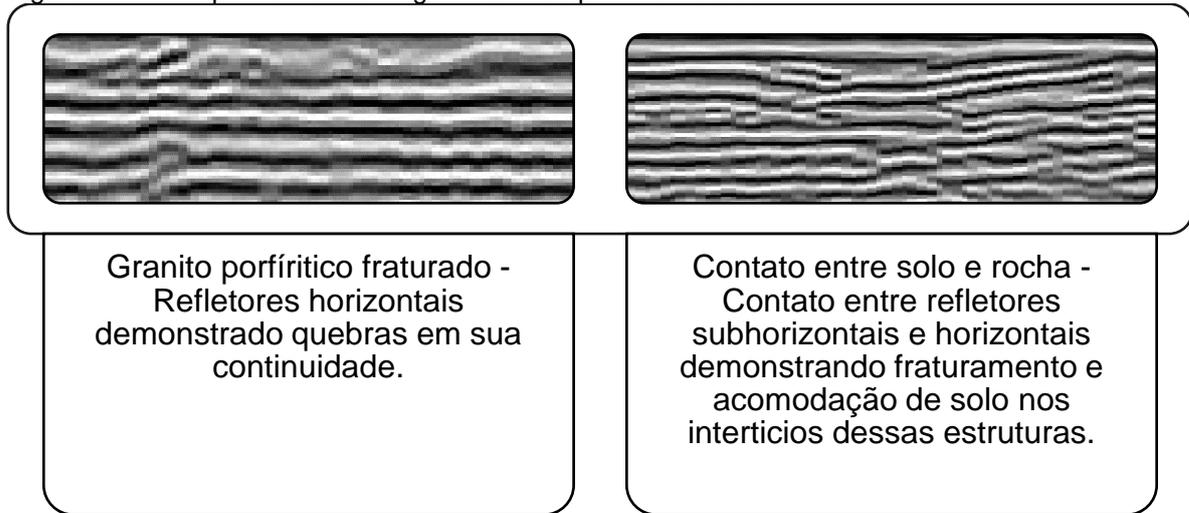


Elaboração: Diego Silva da Rocha

Assinatura geofísica dos principais dos litotipos

O ponto estudado demonstrou 2 (duas) assinaturas geofísicas (Figura 45) que se destacam dentro do radargrama: i) a primeira é formada por refletores horizontais com pequenas quebras na sua continuidade, sendo assim interpretados como zonas fraturadas, podendo ser demonstrado pelos padrões estruturais observados em superfície; ii) a segunda assinatura é formada por refletores subhorizontais a horizontais que demonstram a presença de fraturas e a acomodação do solo nas mesmas.

Figura 44 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

6.2.2.2. Radargrama 03 (E-W)

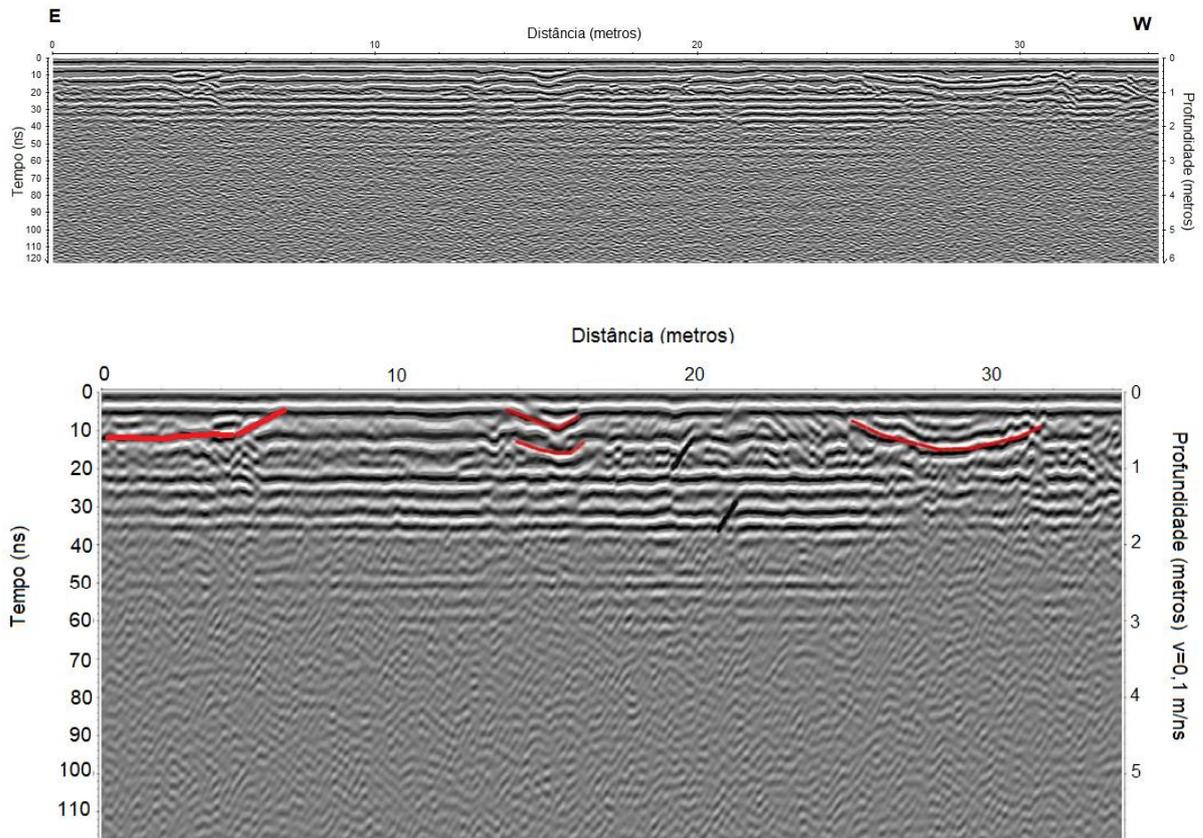
O segundo transecto (03) foi realizado na direção E-W (Leste-Oeste), com possui 6 (seis) metros de profundidade e um comprimento de 34 (trinta e quatro) metros.

O radargrama 03 (Figura 46) apresenta uma zona de refletores que vai até 40 ns com refletores horizontais que vão desde 30 ns a 40 ns. Acima dessa área se encontram refletores horizontais e sub-horizontais. O perfil do radargrama 03 apresenta nas posições 4 (quatro), 14 (quatorze) e 26 (vinte e seis) metros reflexões associadas a famílias de juntas preenchidas por solo. Na última posição (26 metros) existe a presença de uma área com solo já formado, observando-se, dessa maneira, o contato entre o embasamento e o solo, delimitado por juntas.

Litotipos e estruturas geológicas em subsuperfície

O radargrama demonstra uma outra área também homogênea do ponto de vista geológico. Seus refletores são característicos do granito pertencente ao embasamento Pré-Cambriano, ou seja, demonstra refletores horizontais a subhorizontais com pouco contraste com refletores de outro formato.

Figura 45 - Radargrama 03, área localizada no Parque Pedra da Cebola.



Elaboração: Diego Silva da Rocha

Nesse ponto pode se observar algumas porções com refletores côncavos, onde foram observados porções de solo bem formados. A área se aproxima aos demais pontos quanto as estruturas presentes, demonstradas no radargrama por quebras na continuidade dos refletores e são identificadas como produto do fraturamento da rocha, com representações tanto nas camadas mais superiores quanto nas camadas mais profundas, e preenchidos por solo (Figura 46).

Contato entre rochas do embasamento pré-cambriano e os depósitos tecnogênicos

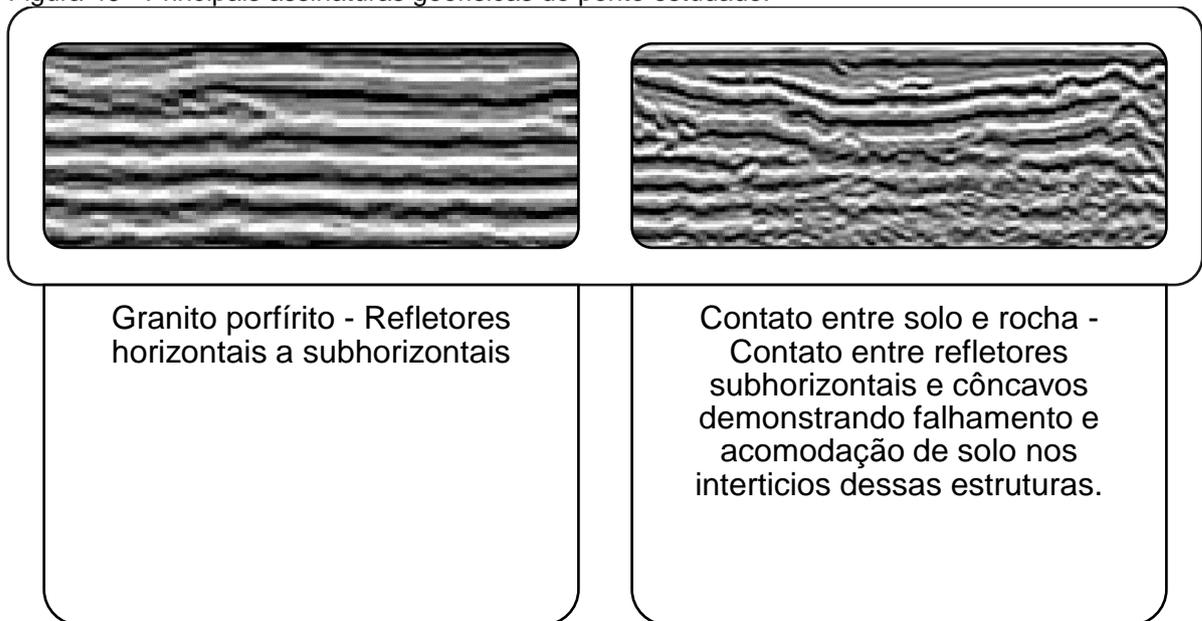
Observa-se no radargrama, logo abaixo da onda aérea caracterizada pelos refletores horizontais, uma área de aproximadamente 1 (um) metro de espessura que se estende por todo o comprimento do radargrama. Essa mesma área é formada por refletores subhorizontais em meio a padrões mais caóticos. Em determinadas porções podem ser observados ainda refletores bem demarcados juntamente com pequenas quebras de reflexão, logo pode se interpretar que essa

área corresponde a interação entre um solo juvenil e um fraturamento mais superficial do granito porfírico pertencente ao embasamento. Porções onde o solo é melhor formado possuem refletores fortes estabelecendo o contato entre essa unidade e a unidade sotoposta (Figura 46).

Assinatura geofísica dos principais dos litotipos

O ponto estudado demonstrou 2 (duas) assinaturas geofísicas (Figura 47) que se destacam dentro do radargrama: i) a primeira é formada por refletores horizontais a subhorizontais referente aos granitos porfíricos representados na área; ii) a segunda assinatura geofísica da área é referente a refletores subhorizontais e côncavos que demonstram o fraturamento da área com parcelas de solo acomodadas preenchendo as mesmas.

Figura 46 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

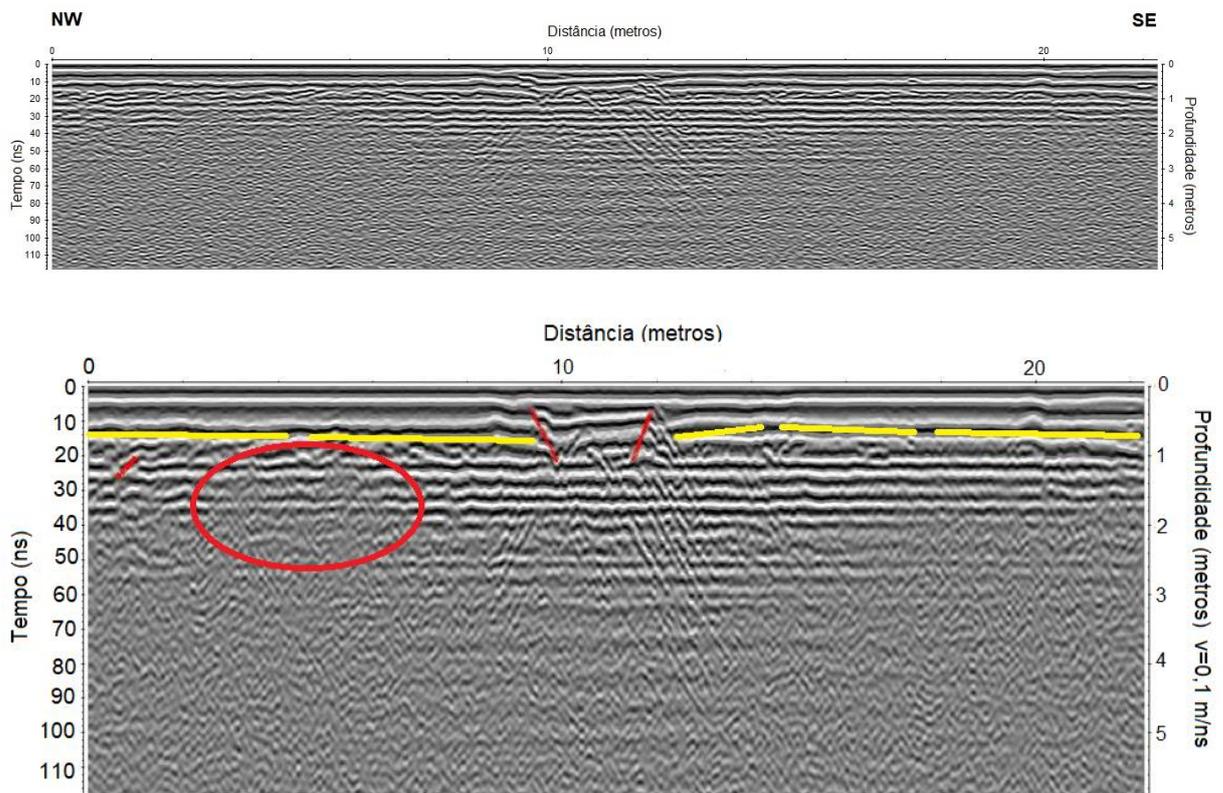
6.2.2.3. Radargrama 04 (NW-SE)

O terceiro transecto (04) realizado na direção NW-SE, possui 6 (seis) metros de profundidade e um comprimento de 22 (vinte e dois).

O radargrama 04 (Figura 48) apresenta reflexões até 40 ns, sendo que em algumas áreas observa-se a perda de sinal em 30 ns. Em quase todo o radargrama observam-se refletores com padrão horizontal. Na porção central do perfil

(aproximadamente 10 a 12 metros) são observadas hipérbolas, podendo ser associadas a juntas não preenchidas, já que acima dos mesmos se observam famílias de juntas sobrepostas por material argiloso. As demais áreas do radargrama, com o padrão de refletos horizontais, são associados a litologia (granito porfirítico) que predomina na área.

Figura 47 - Radargrama 04, área localizada no Parque Pedra da Cebola.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Litotipos e estruturas geológicas em subsuperfície

Observa-se no radargrama, logo abaixo da área com onda aérea, refletos horizontais a subhorizontais em quase todo o radargrama na área que pode ser interpretada como o embasamento Pré-cambriano.

A aproximadamente 10 (dez) metros de comprimento pode ser observado uma área fraturada em suas bordas com o centro constituído por refletos que destoam do restante do perfil. Essa área foi interpretada como granito fraturado

com o preenchimento das fraturas por solo sotoposta por uma região constituída por solo. A estrutura é classificada como uma estrutura em flor invertida característica de ambientes sedimentares com forte controle estrutural.

A aproximadamente 6 (seis) metros de comprimento do perfil existe uma área com sombreamento causado possivelmente pela presença de água em fraturas no embasamento ou por uma porção de solo húmida no solo. A área foi interpretada dessa maneira devido a ausência de refletores no local, causada pela mudança brusca de velocidade da onda ao passar por um material húmido e de composição muito diferente do meio estudo.

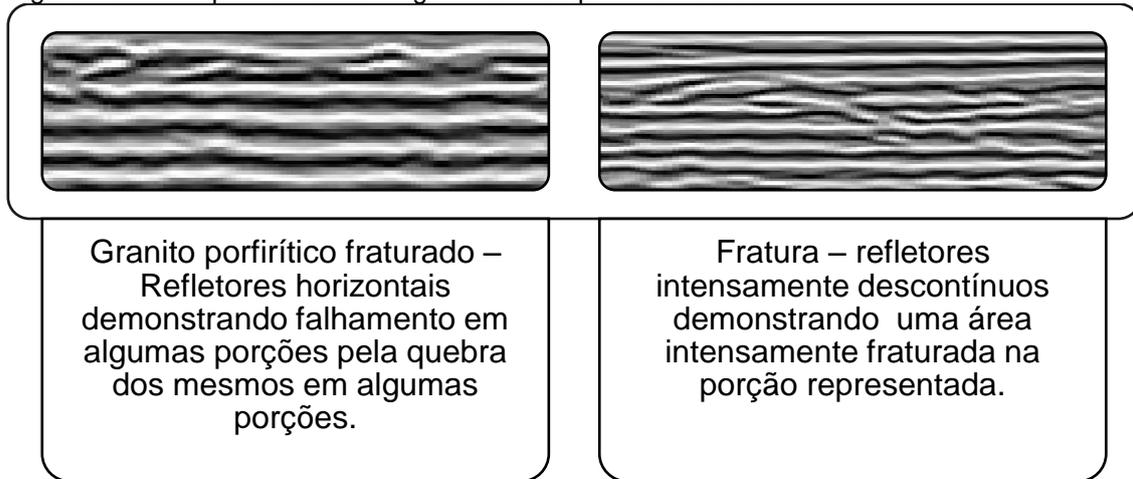
Contato entre rochas do embasamento pré-cambriano e os depósitos tecnogênicos

A área possui refletores bem demarcados nas duas unidades que a constituem. Existe uma boa separação com refletores bem demarcados no contato entre as mesmas. Isso pode ser constatado na área que abrange a estrutura em flor onde apesar de se separado nas laterais pelas fraturas na parte mais profunda, pode ser visto o contato entre o refletor do embasamento e o refletor referente ao solo (Figura 48).

Assinatura geofísica dos principais dos litotipos

O ponto estudado demonstrou 2 (duas) assinaturas geofísicas (Figura 49) que se destacam dentro do radargrama: i) a primeira é formada por refletores horizontais, por vezes descontínuos, associados a granito fraturado; ii) a segunda assinatura é demonstrada por refletores intensamente descontínuos o que demonstra áreas intensamente fraturadas.

Figura 48 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado.



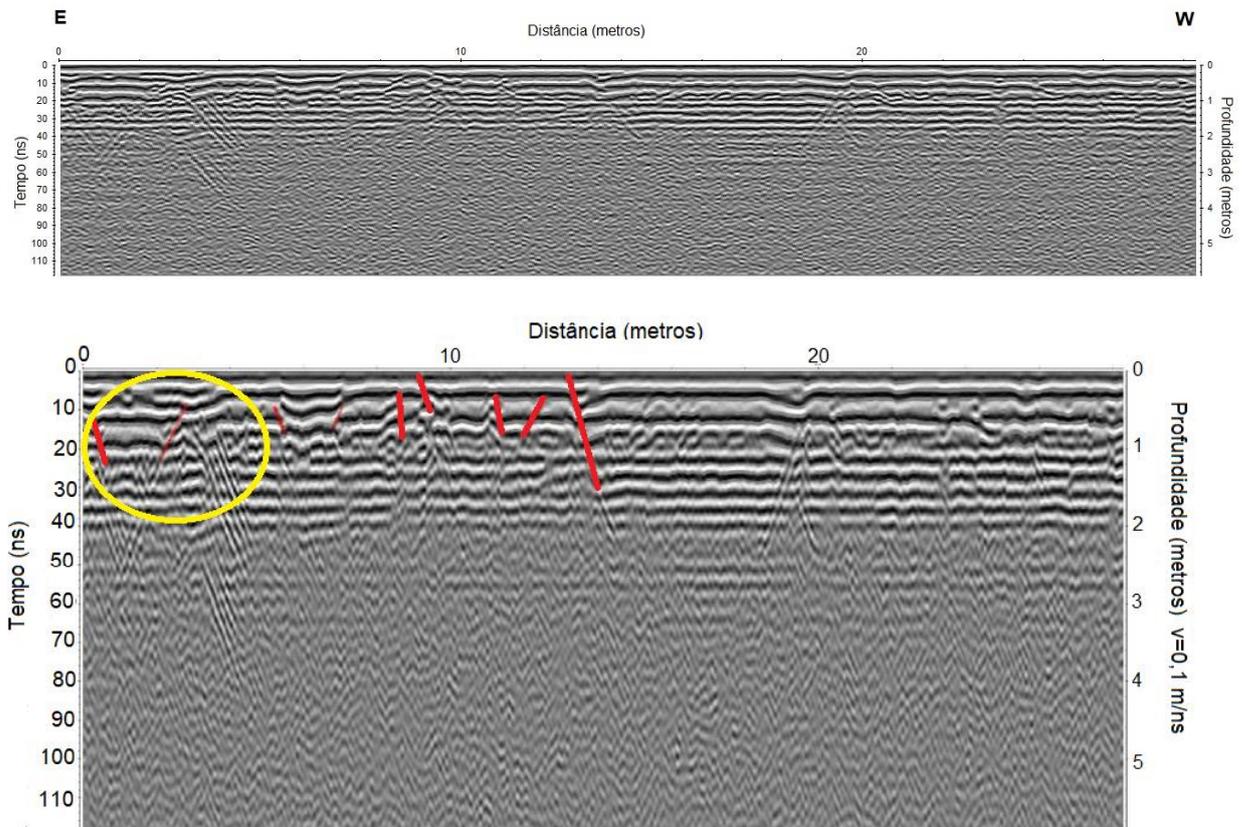
Elaboração: Diego Silva da Rocha.

6.2.2.4. Radargrama 05 (E-W)

O quarto e último transecto (05) foi realizado na direção E-W, possui 6 (seis) metros de profundidade e 29 (vinte e nove) metros de comprimento.

O radargrama 05 (Figura 50) apresenta reflexões até 40 ns e seus principais refletores também se encontram nos padrões horizontais e sub-horizontais. Nos primeiros metros do transecto se observam algumas hipérboles que são associadas a tirantes geotécnicos e a presença dos mesmos acontece por um alto faturamento do granito nessa posição. Em algumas porções do perfil, principalmente em 3 (três) metros e em 8 (oito) metros, se encontram fraturas que variam de milimétricas a decimétricas, ou seja, fora do alcance de resolução que a antena de 270 MHz possui e portanto pouco representadas no radargrama mas evidenciadas pela presença dos tirantes naquela posição. O restante do radargrama é representado pelo padrão horizontal característico de uma rocha granítica e portanto maciça nessas porções.

Figura 49 - Radargrama 05, área localizada no Parque Pedra da Cebola.



Elaboração: Diego Silva da Rocha.

Litotipos e estruturas geológicas em subsuperfície

Observa-se no radargrama duas faixas de refletores, na mais superior se observa refletores subhorizontais a caóticos em algumas porções. Nessa área se observa a presença de solo, rocha fraturada com fraturas preenchidas por solo e a presença de tirantes geotécnicos em subsuperfície. Na porção, mais inferior se observa a presença de refletores paralelos a subparalelos em quase toda a sua extensão, no entanto essa área se apresenta mais fraturada do que as demais e isso implica na presença de fraturas bem demarcadas em quase toda a extensão do radargrama.

A parte inicial do radargrama (Figura 50) apresenta hipérbolas levemente marcadas que são características de alvos de composição completamente diferente dos materiais naturais, os quais são identificados como tirantes geotécnicos usados para a estabilização do maciço rochoso. Observa-se a grande presença de fraturas

na área aonde as hipérboles são encontradas em detrimento a outra extremidade do perfil.

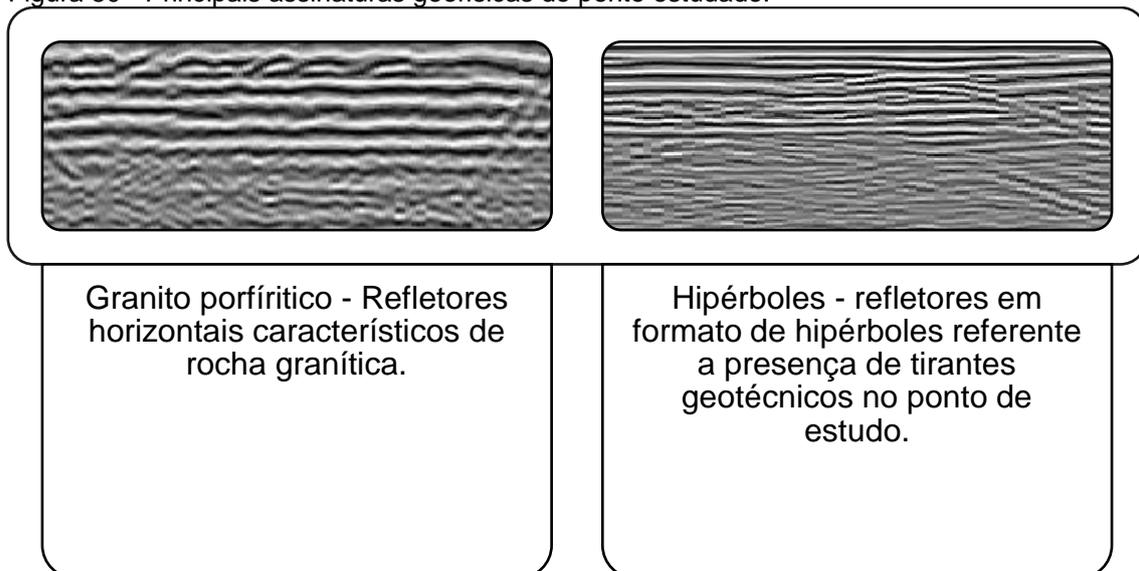
Contato entre rochas do embasamento pré-cambriano e os depósitos tecno gênicos

Observa-se no radargrama refletores fortes que separam a área do embasamento com a unidade de solo sotoposta. Além disso, as hipérboles no início do perfil estão bem marcadas e são características da presença de matérias com características eletromagnéticas muito distintas do material no restante da área.

Assinatura geofísica dos principais dos litotipos

O ponto estudado demonstrou 2 (duas) assinaturas geofísicas (Figura 51) que se destacam dentro do radargrama: i) a primeira é formada por refletores horizontais característicos de rochas graníticas como no restante dos pontos estudados; ii) a segunda assinatura geofísica é formada por hipérboles que são interpretadas como representativas de material constituído por material destoante do *background*, e, nesse caso é interpretado como a representação da presença de tirantes geotécnicos presentes nessa porção da área estudada.

Figura 50 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado.



7. CONCLUSÕES

A utilização da técnica de GPR para a obtenção de imageamento de alta resolução de subsuperfície mostrou-se eficaz.

A qualidade dos produtos está diretamente ligada as características composicionais dos materiais em subsuperfície e a disposição dos mesmos no meio e o processamento de dados. Devido a predominância de pesquisas com GPR na área sedimentar, já que a mesma proporciona uma maior qualidade nos padrões de reflexão, essa pesquisa apresenta diferentes formas de identificação e interpretação de refletores em terrenos ígneos apresentando intensa estruturação.

Os dados dos radargramas mostraram dois aspectos geológicos importantes: o limite de unidades geológicas bem marcantes e a presença de estruturas geológicas.

A mudança abrupta de composição do material demonstra refletores fortemente demarcados nas zonas limítrofes das unidades estudadas, observa-se também que devido a variação composicional característica dos Depósitos Tecnogênicos a área de aterro apresenta refletores com padrão caótico, pode se esperar em determinadas áreas a presença de difrações nesse tipo de material, ou seja, a presença de blocos rochosos inseridos no material de aterros o que possivelmente proporcionaria refletores de padrão caóticos com hipérboles.

Foram observados radargramas com refletores interrompidos em determinados regiões o que evidencia o forte controle estrutural presente na área, através das medidas retiradas em campo e dos dados supracitados foi possível observar uma predominância de fraturas NE-SW e NNW-SE (Figura 30).

Tanto os lineamentos sobre a imagem como as medidas em campo mostraram que as estruturas NE-SW são muito bem marcadas.

O predomínio de lineamentos NE-SW, pode ser explicado pela predominância de falhas, fraturas e foliações de direção NE-SW, relacionadas à estruturação da Faixa Ribeira, cortadas quase que perpendicularmente por estruturas de orientação NW-SE (MACHADO FILHO *et al.*, 1983; PEDROSA SOARES e WIEDEMAN-LEONARDOS, 2000; BRICALLI, 2011);

No entanto, além da associação aos controles litoestruturais mencionados, os padrões de lineamentos na área e os padrões estruturais em campo podem refletir tensões neotectônicas documentadas por Bricalli (2011) no estado do Espírito Santo, uma vez que a autora destaca padrões de fraturamento verificados no Compartimento dos Depósitos Cenozoicos apresentando semelhanças aos encontrados no Compartimento do Embasamento Pré-cambriano no estado do Espírito Santo, afirmando assim poder refletir a reativação neotectônica de estruturas preexistentes, atestada pela continuidade de *trends* estruturais.

Sendo assim:

- as orientações NNE-SW a NNE-SW, encontradas nos lineamentos e em campo, podem ser associadas a padrões de fraturamento caracterizados por falhas normais NE-SW, relacionados a um regime tectônico distensivo de orientação NW-SE, atribuído a uma idade holocênica (BRICALLI, 2011);
- o conjunto de lineamentos com orientação no quadrante NNW, encontradas nos lineamentos, se associa a padrões de fraturamento caracterizados por falhas normais NW-SE, sendo menos comuns falhas sinistrais NNW-SSE, ambas relacionadas ao regime de transcorrência dextral E-W (BRICALLI, 2011);
- os lineamentos E-W, presentes em campo, podem ser associados a falhas dextrais com aproximadamente esta orientação, também relacionadas ao regime de transcorrência dextral E-W (BRICALLI, 2011).

Os resultados obtidos, especialmente nos radargramas da Pedra da Cebola, confirmam a importância dos mecanismos neotectônicos na estruturação da margem continental brasileira, como vem sendo discutido por diferentes autores (HASUI, 1990; SAADI, 1993; MELLO, 1997; BEZERRA *et al.*, 2001; FERRARI, 2001; RICCOMINI *et al.*, 2004; BRICALLI, 2011).

O método demonstrou uma fácil e rápida aplicação, destacando-se aqui uma otimização de tempo e custo para análise de material em subsuperfície.

O GPR apresentou algumas limitações como a presença de água em subsuperfície e a limitação quanto a profundidade observada nos radargramas que pode ser considerada rasa para materiais geológicos, essas mesmas limitações podem ser solucionadas com a realização de mais um tipo de método de aquisição de dado geofísicos e geológicos, por exemplo podemos citar sondagens e perfis de

eletrorresistividade desde que respeitado as limitações do meio físico e do método escolhido.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. F. R. de. 2011. **Modelagem Geológica do entorno da lagoa de Jacarepaguá**. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

BEZERRA, F. H. R. **Deformação tectônica na Formação Barreiras: exemplos das bacias Potiguar e Paraíba, Brasil**. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. 2011.

BORGES, W. R. **Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletrorresistividade**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 22, n. 1, p. 91-91, 2004.

BORGES, W. R. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BORGES, W. R.; PORSANI, J. L. **Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 20, n. 3, p. 187-192, 2002.

BRICALLI, L. L.; MELLO, C. L. 2011. **Padrões de lineamentos relacionados a litoestrutura e fraturamento neotectônico (Estado do Espírito Santo, SE do Brasil)**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 14, n. 3, p. 301-311.

CAMARGO, M.N.; LARACH, J. O. L. Pedologia. 1983. **Levantamentos de recursos naturais/Projeto RADAMBRASIL**. Folhas 23/24 Rio de Janeiro/Vitória. V 32. Rio de Janeiro, 1983.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Mapa geológico do estado do Espírito Santo. **Ministério de Minas e Energia. Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral**, 2015.

DOURADO, T. C. **Aplicação de Técnicas Clássicas do Processamento Sísmico de Reflexão em Dados de Radar (GPR) para Detecção de Hidrocarbonetos em Sedimentos Arenosos**. 2004. 132f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Curso de Pós Graduação em Geofísica, Salvador, 2004.

ESRI. **ArcGIS® 10.1 - ArcMap™ Tutorial**. 2012. Disponível em: <<http://webhelp.esri.com>>. Acesso em: 31 jul. 2017.

FERRARI, A. L. **Evolução Tectônica do Graben da Guanabara**. 2001. 412p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade São Paulo, São Paulo, 2001.

FRANÇA, R. L.; TOKUTAKE, L. R. **Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Espírito Santo**. Phoenix, v. 69, p. 1-6, 2004.

FURTADO, C. P. Q. et al. **Gpr-Processamento e Modelagem**. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica. 2010.

GATO, L.C.S; RAMOS, V.L.S.; NUNES, B.T.A.; MAMEDE, L.; GÓES, M.H.B.; MAURO, C.A.; ALVARENGA, S.M.; FRANCO, E.M.S.; QUIRICO, A.F. & NEVES, L.B. 1983. **Levantamentos de recursos naturais/Projeto RADAMBRASIL - Rio de Janeiro, FIBGE**. V. 32, p. 3-5-384, folha SE 23/24, Rio de Janeiro/Vitória.

GEOBASES- Sistema Integrado de Bases Georreferenciadas do estado do Espírito Santo (Geobases). **Plano de Informações: limite estadual, localidades, hidrografia, rede viária**. Fornecido pela unidade local do Departamento de Geografia (DGEP/UFES) em 2017.

HAENI, F.P. **Evaluation of the continuous seismic-reflection method for determining the thickness and lithology of stratified drift in the glaciated northeast**, In: RANDALL, A.D.; JOHNSON, A.I. (Eds.) Regional aquifer systems of the United States – the northeast glacial aquifers. [S.I.] American Water Resources Association, 1988. (Monograph, 11)

HASUI, Y. 1990. **Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil**. In: SBG/MG, WORKSHOP SOBRE NEOTECTÔNICA E SEDIMENTAÇÃO CENOZÓICA CONTINENTAL NO SUDESTE BRASILEIRO, 1, Belo Horizonte, Boletim SBG/MG, 11:11-31.

HEILBRON, M. et al. **Evolution of reworked Paleoproterozoic basement rocks within the Ribeira belt (Neoproterozoic), SE-Brazil, based on U-Pb geochronology: Implications for paleogeographic reconstructions of the São Francisco-Congo paleocontinent**. Precambrian Research, v. 178, n. 1-4, p. 136-148, 2010.

HEILBRON, M. et al. **Província Mantiqueira. Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, p. 203-235, 2004.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=es>. Acesso em: 28 abr. 2017.

JOL, H. M. (Ed.). **Ground penetrating radar theory and applications**. elsevier, 2008.

JOL, H. M.; BRISTOW, C. S. **GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide**. Geological Society, London, Special Publications, v. 211, n. 1, p. 9-27, 2003.

LIMA, Z. M. C. **Caracterização da dinâmica ambiental da região costeira do município de Galinhos, litoral setentrional do Rio Grande do Norte.** 2004.

LIU, C.C. 1984. **Análise Estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao estado do Rio de Janeiro.** Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 157p.

MACHADO FILHO, L.M; RIBEIRO, M.W; GONZALEZ, S.R; SCHENINI, C.A; NETO, A.S; PALMEIRA, R.C.B; PIRES, J.L; TEIXEIRA, W; CASTRO, H.E.F. **Geologia. Projeto Radam Brasil.** Folhas 23/24 Rio de Janeiro/Vitória .V 32. Rio de Janeiro, 1983.

MACHADO, N.; SCHRANK, A.; NOCE, C.M.; GAUTHIER, G. 1996. **Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: Implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil.** Earth and Planetary Science Letters, 141:259-276.

MANTESSO-NETO, V. et al. **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.** São Paulo: Beca, p. 383-405, 2004.

MARTIN, L. et al. **Geologia do Quaternário costeiro do litoral norte do Rio de Janeiro e do Espírito Santo.** CPRM, Belo Horizonte, v. 2, 1997.

MENDES, L. A; DANTAS, M; BEZERRA, L.M.M. **Geomorfologia. Projeto Radam Brasil.** Folha SE.24 Rio Doce .V 34. Rio de Janeiro, 1987.

MELLO, C. L. **Sedimentação e tectônica cenozóica no Médio Vale do Rio Doce (MG, Sudeste do Brasil) e suas aplicações na evolução de um sistema de lagos.** 1997. 275p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.

MELLO, C. L. et al. **Reativações tectônicas cenozóicas na Faixa de Lineamentos Colatina (ES).** In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS/IV INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECTONICS OF THE BRAZILIAN GEOLOGICAL SOCIETY, 10., Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBG, p. 186-188, 2005.

MIRANDA, D. J. **Análise de estruturas rúpteis associadas a deformações neotectônicas na região centro-norte do estado do Espírito Santo.** 2007. 58 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MIRANDA, D. J. **Tensões e fraturamento neotectônico na área emersa da bacia do Espírito Santo.** Dissertação (Mestrado em Geologia) — Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MORAIS, RMO. 2007. **Sistemas fluviais terciários na área emersa da bacia do Espírito Santo (Formações Rio Doce e Barreiras)**. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geologia, IGEO/UFRJ. 139p.

NEAL, A. 2004. **Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress**. *Earth-Science Reviews*, n.66, p.261-330.

NEAL, A.; ROBERTS, C. L. **Applications of ground-penetrating radar (GPR) to sedimentological, geomorphological and geoarchaeological studies in coastal environments**. Geological Society, London, Special Publications, v. 175, n. 1, p. 139-171, 2000.

NOVAIS, L.C.C.; TEIXEIRA, L.B.; NEVES, M.T.; RODARTE, J.B.M.; ALMEIDA, J.C.H.; VALERIANO, C.M. **Novas ocorrências de diques de diabásio na faixa Colatina – ES: estruturas rúpteis associadas e implicações tectônicas para as bacias de Campos e do Espírito Santo**. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, Rio de Janeiro, v 12, n.1, 2004. p.191-194.

OVERMEEREN, R. A.; SARIOWAN, S. V.; GEHRELS, J. C. **Ground penetrating radar for determining volumetric soil water content; results of comparative measurements at two test sites**. *Journal of Hydrology*, v. 197, n. 1-4, p. 316-338, 1997.

PEDROSA-SOARES A.C. & WIEDEMAN-LEONARDOS C. 2000. **Evolution of the Araçuaí belt and the connection to the Ribeira belt, eastern Brazil**. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho & D.A. Campos (eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, Brazil, pp.: 265-285.

PEDROSA-SOARES, A. C. et al. **Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977**. *Revista Geonomos*, v. 15, n. 1, 2013.

PORSANI, J. L. et al. **O sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP: Instalação e resultados GPR 2D-3D**. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, n. 1, p. 49-61, 2006.

PORSANI, J. L. **Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP**. 1999. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 30.03. 99.

RANGEL, H. D. et al. Bacia de campos. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 8, n. 1, p. 203-217, 1994.

REUTER, H. I, et al. 2007. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. **International Journal of Geographic Information Science**, v. 21, n. 9, p. 983-1008, 2007.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. John Wiley & Sons, 2011.

- RIBEIRO, C.S. Influência da tectônica pós-deposicional na distribuição da Formação Barreiras entre o rio. Paraíba do Sul (RJ) e o rio Doce (ES). 2010. 164 p.
- RICCOMINI, C. et al., 2004. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R; BRITO NEVES, B.B. (orgs.). **Geologia do Continente Sul- Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Beca, p.383-405.
- ROCHA, D. S. et al. **Caracterização geofísica do Maciço Vitória (Campus UFES-Goiabeiras), Espírito Santo, Sudeste do Brasil**. 49º Congresso Brasileiro de Geologia, 2018, Rio de Janeiro.
- ROCHA, T. B. **A planície costeira meridional do complexo deltáico do rio Paraíba do Sul (RJ): arquitetura deposicional e evolução da paisagem durante o Quaternário Tardio**. 2013. Tese de Doutorado. Instituto Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 178p.
- SAADI, A. 1993. Neotectônica da plataforma brasileira: esboço e interpretação preliminares. **Geonomos**, 1(1):1-15.
- SANDMEIER, K. J. REFLEXW Version 7.0. **Program for the Processing of Seismic, Acoustic or Electromagnetic Reflection, Refraction and Transmission Data**. Manual do software, Karlsruhe, Germany (578 pp.), 2012.
- SANTOS, A. de A. et al. **Comparação entre a investigação direta da água subterrânea e radar de penetração no solo (GPR) na área do aterro sanitário de Cuiabá (MT)**. Revista Brasileira de Geociências, v. 39, n. 4, p. 768-772, 2009.
- SANTOS, P. de F. et al. **Estudo de Depósitos da Formação Barreiras com base em reflexão por ondas de radar**. Geologia USP. Série Científica, v. 6, n. 2, p. 31-42, 2006.
- SILVA, J. M. R. da et al. Projeto Radambrasil. **Folha SE-24 Rio Doce**. Rio de Janeiro, v. 34, p. 23-174, 1987.
- SIR, GSSI. 3000 User's Manual. Salem, New Hampshire: Geophysical System Survey Inc 2006. Bridge Assessment Module: RADAN, v. 6, p. 43-172.
- STRECKEISEN, A. IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. **Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites and Melilite Rocks**. Recommendations and Suggestions. Neues Jahrbuch fur Mineralogie. Stuttgart. **Abhandlungen**, v. 143, p. 1-14, 1978.
- SOUZA JUNIOR. et al. **Localização de fraturas em rochas graníticas, no município de Capão Bonito-SP, Brasil**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 20, n. 2, p. 123-128, 2002.
- TERRASIRCH, S. I. R. **System-3000 User's Manual**. Geophysical Survey Systems Inc., Salem, NH, 2004.

TUPINAMBÁ, M. et al. **Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí.** Revista Geonomos, v. 15, n. 1, 2013.

XAVIER NETO, P. **Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR: aplicações no imageamento de feições kársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém-CE.** 2006.