



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

**GILDENILSON MENDES DUARTE**

**A VIABILIDADE DO MÉTODO GPR PARA O MAPEAMENTO DE CAMADAS DE  
BAUXITA LATERÍTICA EM PARAGOMINAS-PA E DE GOETHITA EM  
XAMBIOÁ-TO.**

**BELÉM-PA  
2011**

**GILDENILSON MENDES DUARTE**

**A VIABILIDADE DO MÉTODO GPR PARA O MAPEAMENTO DE CAMADAS DE  
BAUXITA LATERÍTICA EM PARAGOMINAS-PA E DE GOETHITA EM  
XAMBIOÁ-TO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Elétricos e Eletromagnéticos.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Welby Correa Silva.

Coorientador: Prof. Dr. José Gouvêa Luiz.

BELÉM-PA  
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

D812v Duarte, Gildenilson Mendes

A viabilidade do método GPR para o mapeamento de camadas de bauxita laterítica em Paragominas-PA e de goethita em Xambioá-TO / Gildenilson Mendes Duarte; Orientador: Marcos Welby Correa Silva; Coorientador: José Gouvêa Luiz - 2011.

73 fl.: il.

Dissertação (mestrado em geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2011.

1. Geofísica aplicada. 2. Método GPR. 3. Depósito de Bauxita. 4. Depósito de Goethita. 5. Zonas mineralizadas. 6. Exploração de minérios. I. Silva, Marcos Welby Correa, *orient.* II. Luiz, José Gouvêa, *coorient.* III. Universidade Federal do Pará IV. Título.

CDD 22º ed.: 551

---

**GILDENILSON MENDES DUARTE**

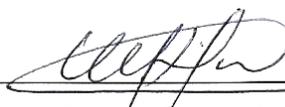
**A VIABILIDADE DO MÉTODO GPR PARA O MAPEAMENTO DE CAMADAS DE  
BAUXITA LATERÍTICA EM PARAGOMINAS-PA E DE GOETHITA EM  
XAMBIOÁ-TO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

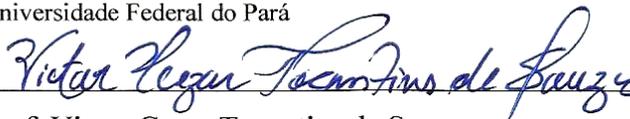
Área de Concentração: Métodos Elétricos e Eletromagnéticos.

Data de aprovação: 31/08/2011

Banca Examinadora:



Prof. Marcos Welby Correa Silva - Orientador  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal do Pará



Prof. Victor Cezar Tocantins de Souza  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal do Pará



Prof. Paulo Roberto de Carvalho  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal Rural da Amazônia

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me proporcionar saúde, disposição e perseverança nesta trajetória que escolhi para minha vida.

Ao CPGf/UFGA pela oportunidade dada a mim de cursar uma pós-graduação.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de mestrado.

A toda a minha família, onde cada membro deixou sua contribuição, na medida do possível, especialmente a minha mãe Abigail Mendes Duarte, que sempre esteve ao meu lado incentivando-me e sustentando-me diante dos maiores obstáculos de minha vida.

A minha esposa Silvia, pelo incentivo e apoio constantes em todos os sentidos e por fazer parte de minha vida.

Ao meu orientador professor Dr. Marcos Welby Correa Silva e ao meu co-orientador professor Dr. José Gouvêa Luiz, pelos ensinamentos, esclarecimentos e paciência na correção deste trabalho.

Ao professor Msc. José Geraldo Alves pelas valiosas sugestões na realização deste trabalho.

Aos professores Cícero Régis e Ellen Gomes, por possibilitarem apoio financeiro quando ainda não era bolsista.

Ao professor Msc. Alberto Leandro pelos diálogos bastante produtivos.

Ao professor Welitom Borges (UnB), pelas contribuições relacionadas ao processamento de dados de GPR.

Ao Dr. Benedito e à Psicóloga Ana Cláudia Bentes, pelo imenso apoio durante momentos muito difíceis que vivi.

Aos professores da pós-graduação, pelas valiosas contribuições na minha formação.

Ao técnico Paulo Magalhães, pela importante assistência nos trabalhos de campo.

À empresa Vale pela logística durante os trabalhos realizados dentro e fora da mina de Bauxita e aos geólogos Clóvis Mauriti e Dário de Castro pelas importantes contribuições e grande apoio.

Aos colegas Diogenes Leão Brasil, Gustavo Dias e Alex Raiol, pelas interações construtivas.

Ao colega Clístenes Catete, pela ajuda na elaboração de mapas contidos neste trabalho.

A todos os alunos de graduação que fizeram parte do grupo da disciplina GT II (Grupo de trabalho II) do ano de 2010.

Às secretárias Benildes Lopes e Lucibela Soares, pela paciência, gentileza e eficiência na realização de seu trabalho.

## RESUMO

Foi aplicado neste trabalho, o método eletromagnético GPR para o mapeamento de camadas em depósitos de minérios em dois diferentes ambientes geológicos. Foram realizadas medidas com o intuito de mapear camadas que compõem depósitos de origem supergênica de Bauxita Laterítica e de Goethita. Os levantamentos para o mapeamento de camadas de Bauxitas foram realizados no interior da mina da empresa Vale e também ao longo da rodovia PA 256, no município de Paragominas-PA. Testes de eletrorresistividade foram realizados no interior da mina de Bauxita, sobre um espesso capeamento de argila na tentativa de correlacionar as variações de resistividade com o perfil litológico da área estudada, uma vez que as medidas de GPR não foram bem sucedidas sobre esse capeamento, devido à atenuação da onda de radar. As medidas para o mapeamento de camadas de Goethita foram realizadas no interior de uma fazenda particular, localizada no trecho entre os municípios de Xambioá e Vanderlândia, estado Tocantins, próximo ao Cinturão Araguaia. O estudo teve como objetivo principal identificar parâmetros como, profundidade e espessura, das zonas mineralizadas, que podem auxiliar no trabalho de exploração dos minérios. Os resultados das medidas de GPR foram bastante satisfatórios, pois o método apresentou boa resposta para os dois tipos de minérios investigados, tornando possível a caracterização das camadas e a verificação de suas profundidades e espessuras.

**Palavras-chave:** Geofísica aplicada. Método GPR. Depósito de Bauxita. Depósito de Goethita. Zonas mineralizadas. Exploração de minérios.

## ABSTRACT

In this work we applied the GPR electromagnetic method mapping of layered deposits of minerals in two different environments. Measurements were made with the aim of mapping layers that form deposits of supergene origin of lateritic bauxite, and Goethite. The surveys for the mapping of layers of bauxites were conducted within the mine company Vale and also along the highway PA 256, in the municipality of Paragominas-PA. Resistivity tests were performed within the mine bauxite on a thick capping of clay in an attempt to correlate the variations of resistivity with the lithologic of the studied area, because the GPR measurements were not successful on this capping due the attenuation of the radar wave. The measures for mapping layers Goethite were carried inside a private property, located on the stretch between the towns of Xambioá and Vanderlândia, Tocantins state, near the Araguaia Belt. The study had as main objective to identify parameters such as depth and thickness of mineralized zones, which may aid in the work of exploitation of ores. The results of GPR measurements were very satisfactory, because the method presented a good response for both types of ores investigated, making it possible to characterize the layers and to verification its depths and thicknesses.

**Keywords:** Applied Geophysics. GPR method. Bauxite deposit. Goethite deposit. Mineralized zones. Exploration of ores.

## LISTA DE LUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Mapa destacando a Província Bauxitífera de Paragominas.....	15
Figura 2.2	Mapa destacando a localização da Folha Xambioá.....	17
Figura 2.3	Mapa de localização da área de Paragominas onde os perfis de GPR foram realizados.....	18
Figura 2.4	Corte na margem da PA 256 onde foram realizados levantamentos de GPR.	19
Figura 2.5	Região da mina de Bauxita da empresa Vale onde foram realizados levantamentos de GPR e Eletroresistividade.....	19
Figura 2.6	Mapa de acesso rodoviário para o município de Xambioá-TO.....	20
Figura 2.7	Mapa de localização da área de Xambioá onde os perfis de GPR foram realizados.....	21
Figura 3.1	(a) Amostra de bauxita fosfática com teor cerca de 26% de alumina. (b) Amostra de bauxita gibítica cristalizada com teor de aproximadamente 56% de alumina.....	23
Figura 3.2	(a) Afloramento de bauxitas cársticas na Serra de Ponce (Zaradilla de Totana) na Espanha. (b) Alumina em pó. (c) Alumínio metálico.....	24
Figura 3.3	Platô Bauxítico típico da região de Paragominas.....	25
Figura 3.4	Desenho esquemático do perfil litológico da área investigada dentro da mina com as espessuras estimadas das camadas.....	26
Figura 3.5	Em sequência: bauxita nodular, laterita ferruginosa, bauxita cristalizada e bauxita amorfa.....	26
Figura 3.6	Amostra de Goethita coletada nas proximidades de Xambioá-TO.....	27
Figura 3.7	Esquema mostrando o processo de formação química da Goethita.....	28
Figura 3.8	Localização geológica da Bacia do Parnaíba.....	29
Figura 3.9	(a) Topo de serra sustentado pela formação ferrífera (Chapéu de Ferro). (b) Afloramento de leito ferrífero de Goethita.....	30
Figura 3.10	Seção NW-SE esquemática entre Xambioá e Vanderlândia. À esquerda, afloramento verticalizado de quartizitos da Formação Morro do Campo. À direita, leitos ferríferos da Formação Pimenteiras que está discordantemente sobre a formação Xambioá.....	31
Figura 3.11	Desenho esquemático do perfil litológico local da área de Xambioá. Informações fornecidas pelo geólogo Wagner Nascimento.....	31

Figura 4.1	Esquema do comportamento de um pulso de onda eletromagnética emitida por uma antena bi-estática de GPR acoplada a uma unidade computacional.	32
Figura 4.2	Antenas de GPR em operação. (a) Antena bi-estática blindada. (b) Antena bi-estática não blindada.....	33
Figura 4.3	Esquema do comportamento das ondas eletromagnéticas transmitidas para a subsuperfície.....	33
Figura 5.1	Levantamentos realizados para o mapeamento de camadas de Bauxita. (a) Levantamentos no interior da mina de Bauxita da empresa Vale. (b) Levantamentos realizados sobre um corte localizado no Km 20 da rodovia PA 256.....	40
Figura 5.2	Levantamentos realizados para o mapeamento de camadas de Goethita no interior de uma fazenda em Xambioá-TO. (a) Marcação da linha de perfis de GPR. (b) No destaque, região da fazenda onde ocorrem afloramentos de Granito.....	41
Figura 5.3	Operação de imageamento elétrico realizado sobre o capeamento argiloso da mina de bauxita da empresa Vale em Paragominas.....	42
Figura 6.1	Desenho esquemático de posicionamento dos perfis 1 e 2.....	44
Figura 6.2	Perfil 1 processado realizado sobre o capeamento de Argila de Belterra com uma antena de 200 MHz.....	46
Figura 6.3	Perfil 1 processado e interpretado realizado sobre o capeamento de Argila de Belterra.....	46
Figura 6.4	Perfil 2 processado e interpretado realizado sobre a zona mineralizada.....	47
Figura 6.5	Desenho esquemático de posicionamento da malha de GPR e das medidas de Resistividade.....	48
Figura 6.6	Perfil 3 processado e interpretado realizado com a antena de 400 MHz sobre a zona mineralizada.....	50
Figura 6.7	Modelo Quase 3D elaborado com a malha de dados de GPR. Visualização do espalhamento da primeira interface.....	51
Figura 6.8	Modelo Quase 3D elaborado com a malha de dados de GPR. Visualização intermediária entre as duas interfaces.....	52
Figura 6.9	Modelo Quase 3D elaborado com a malha de dados de GPR. Visualização do espalhamento da segunda interface.....	53

Figura 6.10	Modelo Quase 3D elaborado com a malha de dados de GPR. Visualização do final da segunda interface.....	54
Figura 6.11	Esquema do perfil litológico exposto no corte do Km 16 da PA 256 utilizado com referência para a interpretação dos demais perfis da estrada...	56
Figura 6.12	Perfil 4 processado e interpretado.....	56
Figura 6.13	Perfil 5 processado e interpretado.....	57
Figura 6.14	Perfil 6 processado e interpretado.....	57
Figura 6.15	Pseudoseção de resistividade aparente resultante do imageamento elétrico realizado sobre o capeamento de Argila de Belterra. <b>(a)</b> Pseudosecção de resistividade aparente medida. <b>(b)</b> Pseudosecção de resistividade aparente calculada. <b>(c)</b> Secção modelo inverso de resistividade aparente.....	59
Figura 6.16	Curva de resistividade aparente adquirida com a Sondagem Elétrica Vertical sobre o capeamento de Argila de Belterra. À direita, aspecto de variação de resistividade elétrica com a profundidade.....	60
Figura 6.17	Esquema de localização dos perfis de GPR no interior da fazenda após os testes.....	62
Figura 6.18	Perfil 7 adquirido com a antena de 80 MHz processado.....	65
Figura 6.19	Perfil 7 adquirido com a antena de 80 MHz processado e interpretado.....	65
Figura 6.20	Perfil 8 adquirido com a antena de 200 MHz processado.....	66
Figura 6.21	Perfil 8 adquirido com a antena de 200 MHz processado e interpretado.....	66
Figura 6.22	Perfil 9 adquirido com a antena de 200 MHz processado e interpretado.....	67
Figura 6.23	Perfil 10 adquirido com a antena de 200 MHz processado e interpretado.....	67
Figura 6.24	Perfil 11 adquirido com a antena de 200 MHz processado.....	68
Figura 6.25	Perfil 12 adquirido com a antena de 200 MHz processado e interpretado.....	68
Figura 6.26	Perfil 13 adquirido com antena de 200 MHz processado e interpretado.....	69
Figura 6.27	Perfil 14 adquirido com antena de 200 MHz processado e interpretado.....	69

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1	Tabela de diferentes frequências associadas a profundidades.....	34
Tabela 4.2	Tabela de valores de propriedades eletromagnéticas de diferentes materiais.....	35
Tabela 6.1	Modelo Geoelétrico de camadas.....	60

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
2	<b>ÁREAS DE ESTUDO</b> .....	15
2.1	A PROVÍNCIA BAUXITÍFERA DE PARAGOMINAS .....	15
2.2	A FOLHA XAMBIOÁ .....	16
2.3	LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS INVESTIGADAS .....	18
2.3.1	<b>Região de Paragominas-PA</b> .....	18
2.3.2	<b>Região de Xambioá-TO</b> .....	20
3	<b>ASPECTOS GEOLÓGICOS DAS ÁREAS INVESTIGADAS</b> .....	22
3.1	GEOLOGIA DA BAUXITA .....	22
3.1.1	<b>Definição de bauxita, alumina e alumínio</b> .....	23
3.2	BAUXITA PARAGOMINAS .....	25
3.3	A GEOLOGIA DA GOETHITA .....	26
3.4	GOETHITA XAMBIOÁ .....	29
4	<b>REVISÃO DE CONCEITOS</b> .....	31
4.1	GROUND PENETRATING RADAR (GPR) .....	32
4.1.1	<b>Conceitos físicos</b> .....	36
4.1.2	<b>Processamento de dados de GPR</b> .....	38
5	<b>AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS</b> .....	40
5.1	MÉTODO GPR .....	40
5.2	MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE .....	41
6	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	43
6.1	GPR PARA BAUXITA .....	43
6.2	ELETRORRESISTIVIDADE NA MINA DE BAUXITA .....	58
6.3	GPR PARA GOETHITA .....	61
7	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	70
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	72

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo das rochas que ocorrem na superfície do solo (afloramentos) bem como de suas relações no espaço e no tempo é de fundamental importância para a compreensão de rochas de subsuperfícies e, portanto, para a localização de depósitos de minérios. Contudo, os afloramentos nem sempre podem nos fornecer informações seguras sobre a subsuperfície e no caso de partes da Amazônia, podem não se encontrar disponíveis devido ao processo de intemperismo ali presente.

A escassez de depósitos de minerais aflorantes ou pouco profundos levou à necessidade de se desenvolver mecanismos que proporcionassem a descoberta de depósitos mais profundos desenvolvendo-se a partir daí a Geofísica de Exploração.

Geralmente as rochas diferem entre si por meio de suas propriedades físicas, o que provoca variações na propagação de ondas que incidem sobre as mesmas. E devido a estas variações podemos adquirir informações acerca dos materiais que provocaram essas respostas (LUIZ; SILVA, 1995). Essas por sua vez, podem ser identificadas através da utilização de métodos geofísicos como, por exemplo, o método GPR (*Ground Penetrating Radar*) e a Eletroresistividade. Existem numerosas aplicações dos métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos nas mais diferentes áreas, como meio ambiente (detecção de plumas contaminantes), prospecção de água subterrânea, petróleo e também exploração mineral que é o foco do presente trabalho. Utilizamos neste trabalho o método GPR com antenas bi-estáticas blindadas de 200 MHz e 400 MHz e uma antena bi-estática não blindada de 80 MHz. O método da Eletroresistividade também foi empregado sendo aplicado no interior da mina de Bauxita, da empresa Vale, sobre um capeamento argiloso. Foram realizados uma Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e um Imageamento Elétrico.

O tipo de mineração aqui investigado é um depósito de Bauxita laterítica e também um depósito de Goethita ( $\text{HFeO}_2$ ). O objetivo central deste trabalho é verificarmos a viabilidade da aplicação do método GPR para o mapeamento das camadas que compõem as bauxitas lateríticas e de Goethita, identificando, assim, parâmetros como, profundidade e espessura, que podem auxiliar no trabalho de exploração dos minérios. Os levantamentos para mapear camadas de Bauxita foram realizados na região da Província Bauxitífera de Paragominas-PA, nas proximidades da rodovia PA 256. Esta região contém formações sedimentares que sustentam os platôs, que são feições geomórficas dominantes na região (KOTSCHOUBEY et al, 2005). Já os levantamentos para o mapeamento de Goethita foram realizados numa área que se encontra nas proximidades do município de Xambioá-TO. Esta região encontra-se na

Folha Xambioá, denominação dada pela Companhia de Produção e Recursos Minerais (CPRM), situada sobre a Bacia do Parnaíba próximo ao Cinturão Araguaia. As rochas presentes na área investigada são rochas da formação Pimenteiras como: Argilito siltoso, Irostone oolítico (minério de Ferro), Argilito siltoso contendo oxi-hidróxido de ferro (Goethita) e Conglomerado, seguidos de Xisto típico da Formação Xambioá e Quartizito da Formação Morro do Campo.

## 2 ÁREAS DE ESTUDO

### 2.1 A PROVÍNCIA BAUXITÍFERA DE PARAGOMINAS

A área investigada faz parte da Província Bauxitífera de Paragominas que ocupa uma extensão de aproximadamente 50.000 km<sup>2</sup>, localizada na porção leste do Estado do Pará/oeste do Maranhão na Amazônia oriental. É o mais extenso e denso conjunto de depósitos de Bauxita da Amazônia e do Brasil possuindo dimensões cerca de 300 km na direção norte-sul e até 200 km na direção leste-oeste (Figura 2.1). A porção sul do município de Paragominas comporta os distritos de Miltônia, Gurupi, Tiracambu, Camoai e a norte os distritos de Futuro e Jabuti (KOTSCHOUBEY et al, 2005).

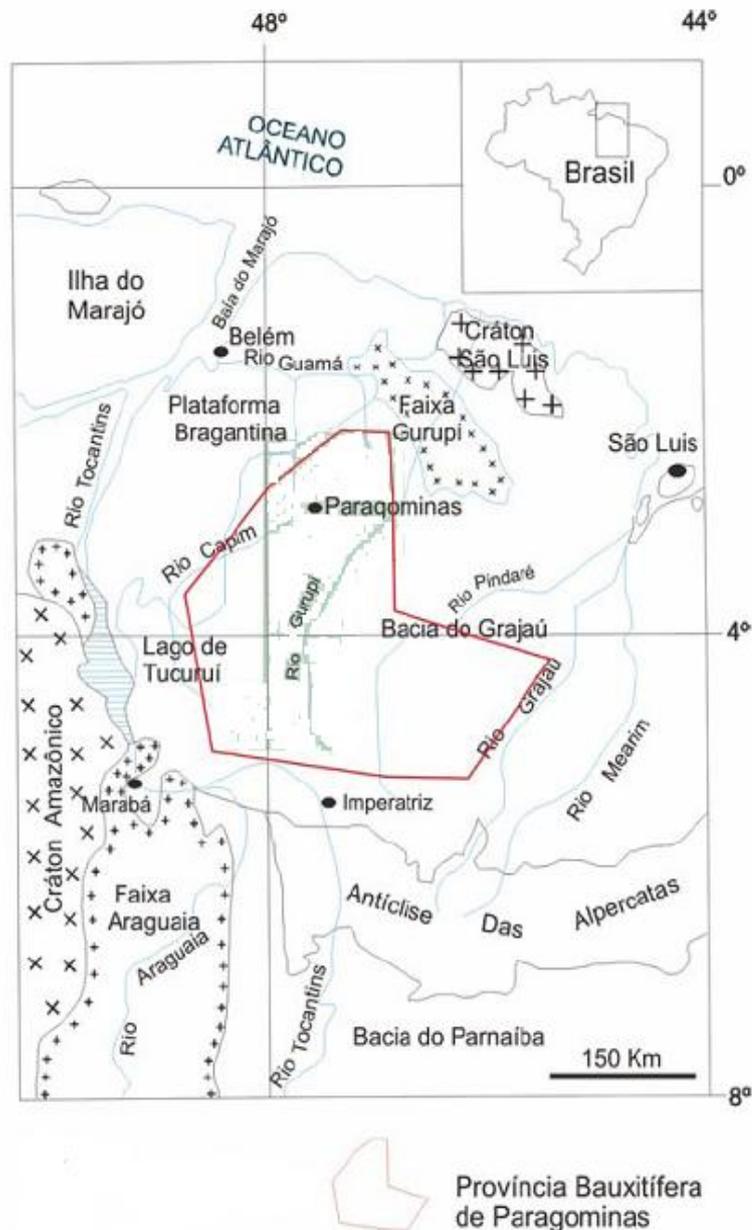


Figura 2.1 – Mapa destacando a Província Bauxitífera de Paragominas. Modificado de Kotschoubey et al (2005).

O acesso à província bauxitífera é facilitado pela rodovia BR 010, ao longo da qual estão localizados os principais municípios do leste do Pará e do oeste do Maranhão. Existem ainda, estradas secundárias e vicinais permitindo o acesso a fazendas e povoados. As estradas são: Paragominas – Jurupari-Tomé Açu e as estradas de acesso aos Platôs Jabuti, Miltônia (PA 256), Gurupi, Tiracambu, Camoai, entre outros.

## 2.2 A FOLHA XAMBIOÁ

A área de estudo sobre depósitos de Goethita está localizada em uma região denominada Folha Xambioá (Figura 2.2), região que abrange uma superfície de aproximadamente 18.000 km<sup>2</sup> e situa-se no sudeste do Estado do Pará e norte do Estado do Tocantins. Engloba inteiramente o município de Xambioá e parte dos municípios de Araguaína, Ananás, Vanderlândia, Babaçulândia, Nazaré, Araguatins e Tocantinópolis, no Estado do Tocantins; e no Estado do Pará estendem-se parcialmente sobre os municípios de São Geraldo do Araguaia, Curionópolis, Xinguara e Palestina do Pará (CPRM, 2008).

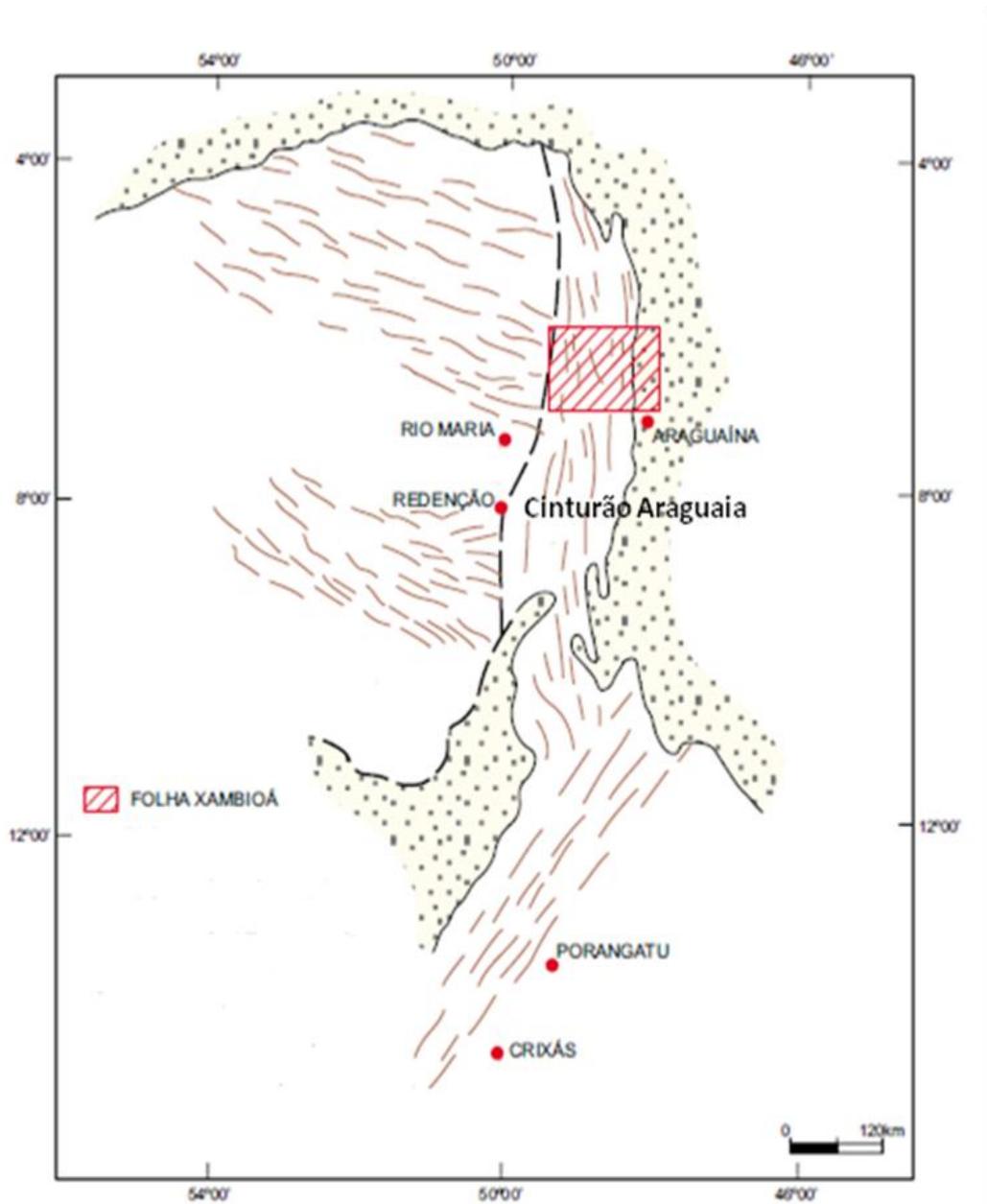


Figura 2.2 - Mapa destacando a localização da Folha Xambioá. Modificado de CPRM (2008).

## 2.3 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS INVESTIGADAS

### 2.3.1 Região de Paragominas-PA

Neste trabalho foram realizadas medidas no interior da mina de Bauxita da empresa Vale, localizada no município de Paragominas-PA (Figura 2.3), no distrito de Miltônia, e também ao longo da rodovia PA 256, sobre cortes situados à margem da estrada.

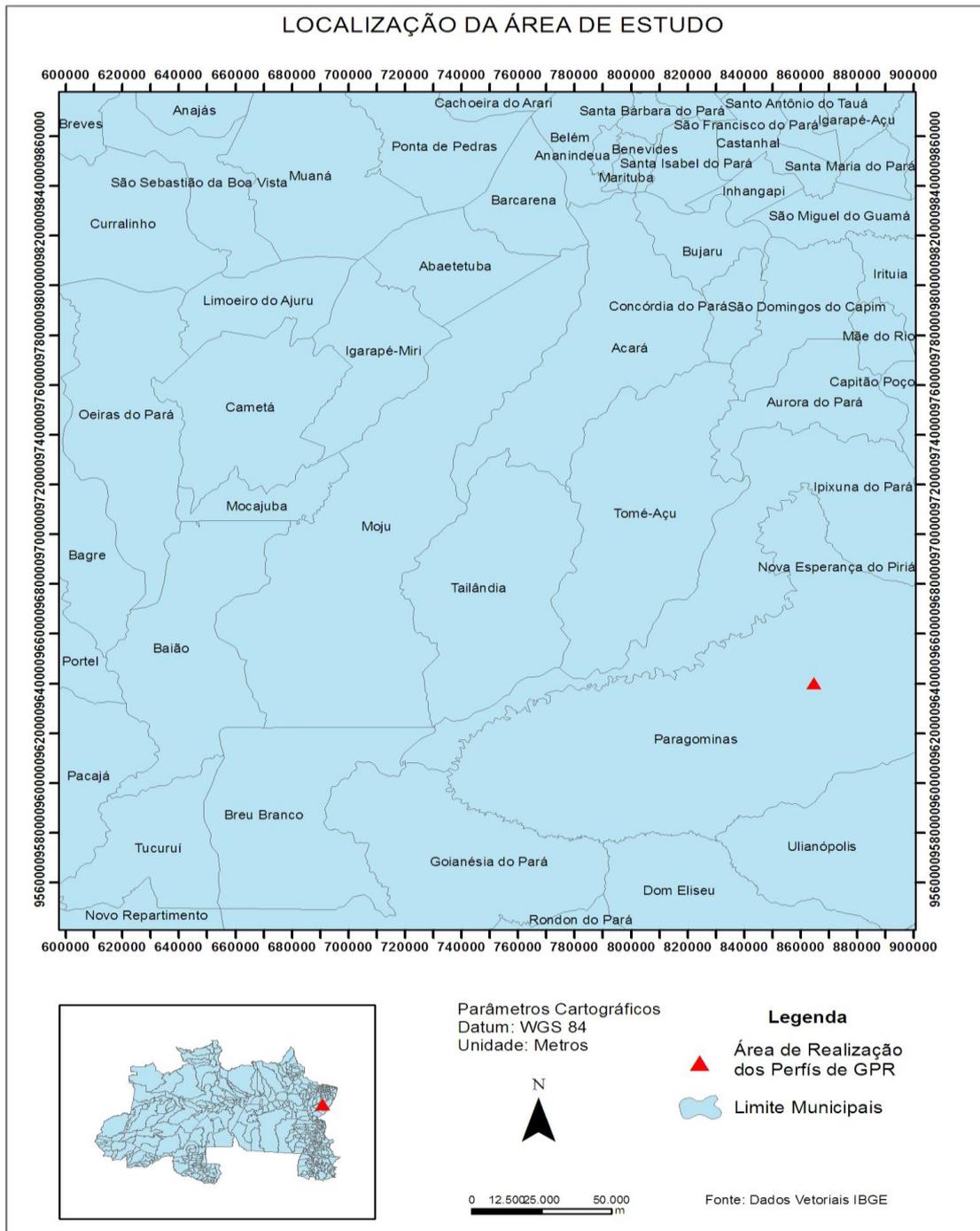


Figura 2.3 – Mapa de localização da área de Paragominas onde os perfis de GPR foram realizados.

As figuras 2.4 e 2.5 mostram, respectivamente, um dos cortes situados na rodovia PA 256 e o interior da mina de Bauxita da empresa Vale, localizados na Província Bauxitífera de Paragominas onde foram realizados levantamentos de GPR e de Eletrorresistividade.



Figura 2.4 – Corte na margem da PA 256 onde foram realizados levantamentos de GPR.



Figura 2.5 – Região da mina de Bauxita da empresa Vale onde foram realizados levantamentos de GPR e Eletrorresistividade.

### 2.3.2 Região de Xambioá-TO

O trabalho de campo para o mapeamento de camadas de Goethita foi realizado dentro de uma fazenda situada na BR-153, no trecho entre os Km 29 e Km 31, de Xambioá para Vanderlândia, Estado do Tocantins, mais especificamente sobre a bacia do Parnaíba que é uma bacia cratônica localizada na região Nordeste do Brasil, que ocupa uma área de aproximadamente 600.000 km<sup>2</sup> e cuja sucessão sedimentar, em seu depocentro, chega a mais de 3,5 km de espessura (CPRM, 2008). Está limitada geologicamente a norte pelo arco Ferrer–Urbano Santos, que a separa das bacias de São Luís e Barreirinhas, na margem continental; ao sul pelo arco do Médio São Francisco, separando-a da bacia Sanfranciscana; e a nordeste, pelo arco de Tocantins, que a separa da bacia do Marajó. O acesso rodoviário (Figura 2.6) é feito via estrada pavimentada BR-153 até a cidade de Araguaína. Daí, a região tocaninense da Folha Xambioá é atingida por várias estradas estaduais, sem pavimento asfáltico (TO-287, 386, 136, 388 e 291). Uma dessas (TO-287) alcança a porção paraense, que é adentrada em travessia do rio Araguaia, por balsa, no povoado do Pontão ou, alternativamente, na cidade de Xambioá.

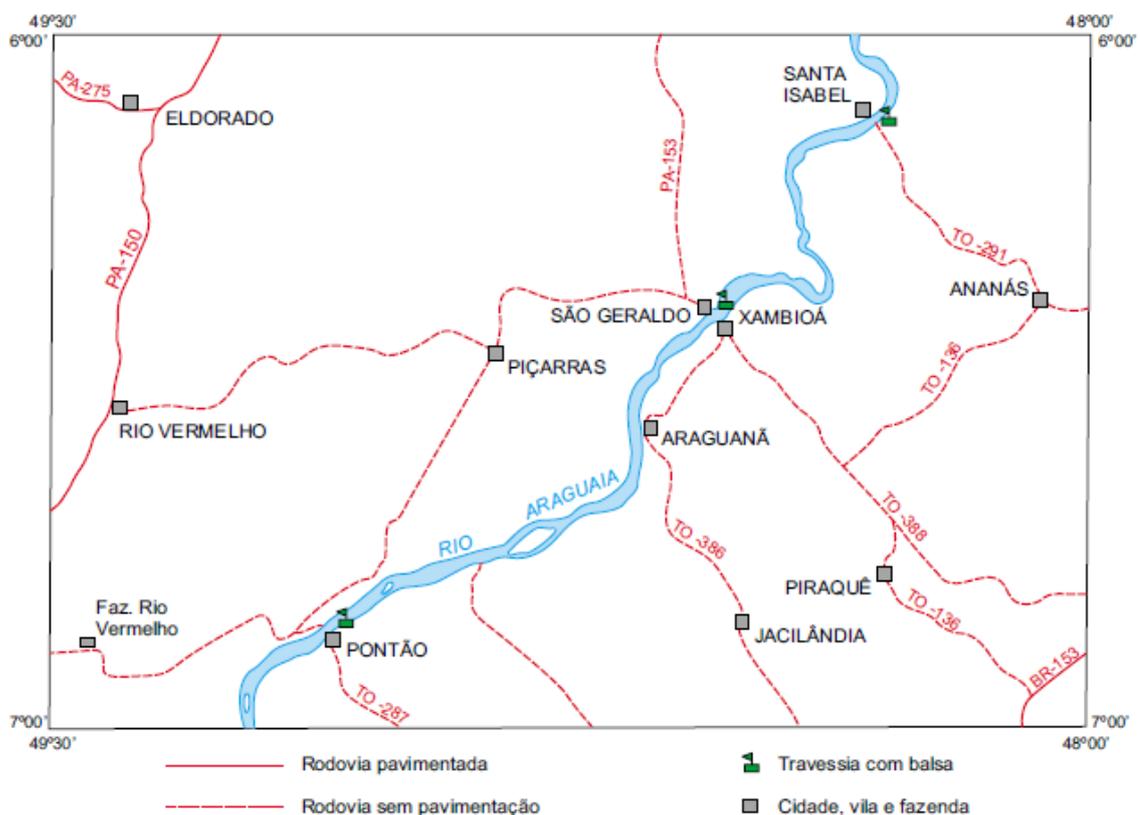


Figura 2.6 – Mapa de acesso rodoviário para o município de Xambioá-TO. Adaptado de CPRM (2008).

A figura 2.7 mostra o mapa de localização e acesso da área onde os perfis de GPR foram realizados.

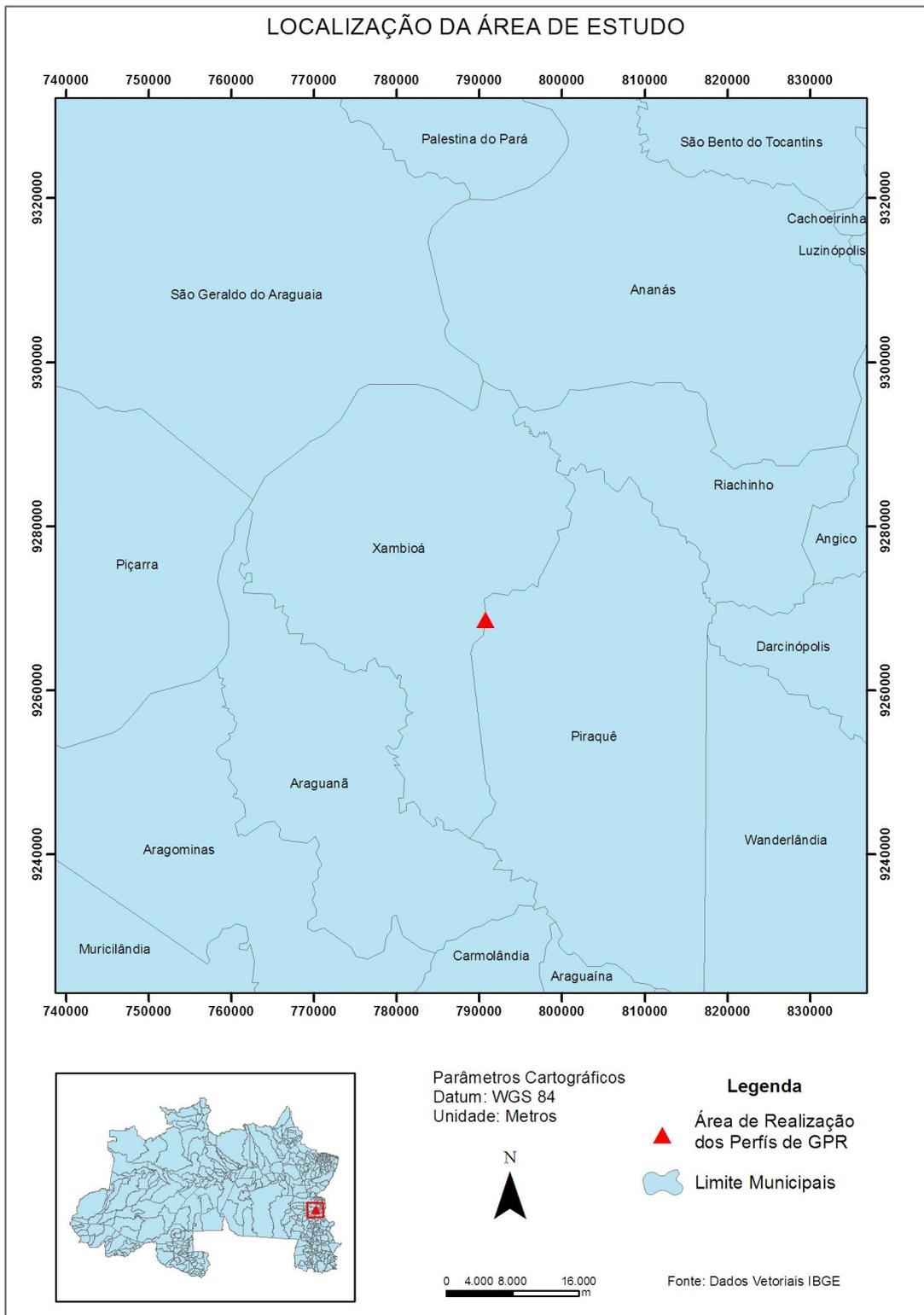


Figura 2.7 – Mapa de localização da área de Xambioá onde os perfis de GPR foram realizados.

### 3 ASPECTOS GEOLÓGICOS DAS ÁREAS INVESTIGADAS

#### 3.1 GEOLOGIA DA BAUXITA

A Bauxita é o minério do elemento químico alumínio, o metal mais abundante na crosta terrestre. Depois de oxigênio e silício, o alumínio é o terceiro mais comum elemento da crosta terrestre da qual é formada de 8,1%. O alumínio expõe uma marcante afinidade para o oxigênio e não é encontrado em estado nativo. Embora esse metal seja um importante constituinte das argilas e silicatos ( $\text{SiO}_2$ ) ele é industrialmente obtido de uma mistura de óxidos de alumínio hidratados conhecidos como Bauxita. Os principais óxidos que constituem a Bauxita são os minerais gibsite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), boemita e diásporo. A mineralogia da bauxita depende de sua idade. Jovens bauxitas são denominadas gibsíticas. Com respeito a idade, gibsite dá lugar à boemita e ao diásporo. (EVANS, 1993). A Bauxita contém ainda: Ferro na forma de goethita, e em menor quantidade na forma de hematita, magnetita e siderita; titânio na forma de rutilo ( $\text{TiO}_2$ ); e sílica na forma de quartzo e caolinita. Sua composição típica inclui 35-65% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina), 2-10% de  $\text{SiO}_2$ , 2-20% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 1-3% de  $\text{TiO}_2$ , 10-30% de água (JENSEN; BATEMAN, 1979). Para exploração como minério, a Bauxita deve conter no mínimo 35% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , possuir menos de 5% de  $\text{SiO}_2$ , menos de 6% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e menos de 3% de  $\text{TiO}_2$  (JENSEN; BATEMAN, 1979).

VALETON (1972) afirma que a formação dos depósitos de Bauxita se dá por meio de um processo de lateritização. Tradicionalmente, três processos são responsáveis pela formação de Bauxita, são eles: a) intemperismo e lixiviação in situ de rochas para produzir alumínio e resíduos ricos em ferro, b) enriquecimento em alumínio de sedimentos ou rochas desgastadas por lixiviação das águas subterrâneas e c) erosão e redeposição de materiais bauxíticos. A gênese de jazidas de Bauxita laterítica é regida, em grande parte, pelo efeito cumulativo de vários controles importantes entre eles: a) uma rocha mãe favorável com minerais facilmente solúveis cuja lixiviação vai deixar um residual de enriquecimento de alumínio e / ou ferro, b) porosidade efetiva da rocha, permitindo a livre circulação de água, c) muita chuva intermitente com períodos de seca, d) boa drenagem, e) clima tropical quente, f) baixo relevo topográfico, g) estabilidade prolongada e h) presença de vegetação inclusive de bactérias.

Segundo EVANS (1993), quando a Laterita consiste basicamente de Hidróxido de Alumínio puro, ela é chamada de Bauxita e é o principal minério de alumínio (Figura 3.1). A produção total mundial de Bauxita em 1989, foi de aproximadamente 92 Mt e a maior parte

desta foi usada para a produção de alumínio metálico. Cerca de 4-5 Mt, porém, foi absorvido por operações não-metálicas para a fabricação de abrasivos, alumina química e cimento industrial.

Segundo o modelo poligenético citado em KOTSCHOUBEY et al (2005), as formações de Bauxitas na Província bauxitífera de Paragominas – PA, se dá em cinco fases, ou seja: a) lateritização inicial do saprólito, b) formação da crosta ferro – aluminosa e seu retrabalhamento parcial, c) primeira e principal fase de gipsitização da crosta (formação do horizonte bauxítico inferior), d) segunda fase de retrabalhamento da crosta e formação do cascalho ferruginoso do topo do perfil, e e) segunda fase de gipsitização e bauxitização da parte superior da crosta.

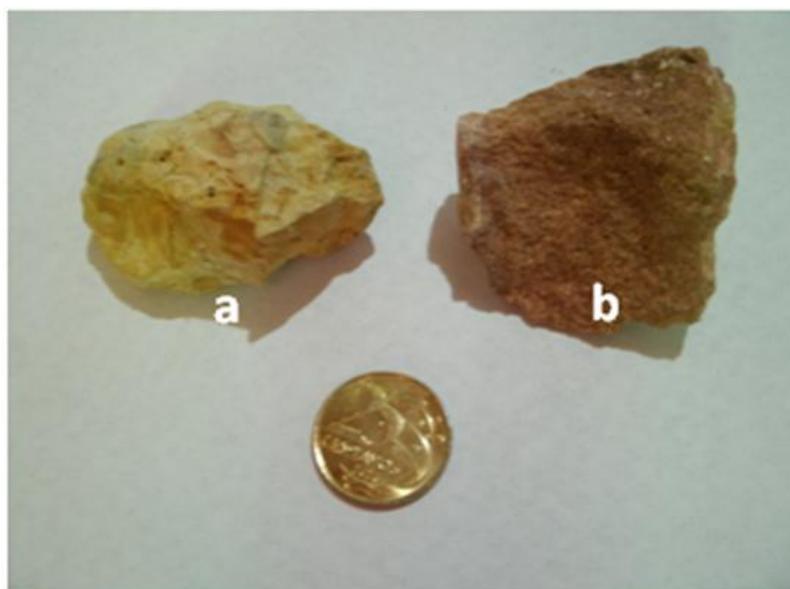


Figura 3.1 – (a) Amostra de bauxita fosfática com teor cerca de 26% de alumina. (b) Amostra de bauxita gipsítica cristalizada com teor de aproximadamente 56% de alumina.

### 3.1.1 Definição de Bauxita, Alumina e Alumínio

O termo Bauxita foi introduzido pelo geólogo francês Pierre Berthier em 1821, para sedimentos ricos em alumina encontrados nas vizinhanças de Les Baux de Provence na França meridional (VALETON, 1972). Devido ao esgotamento de suas minas de Bauxita, a França cessou quase completamente a sua exploração em 1991. As minas francesas eram localizadas em Var, Bouches-du-Rhône e Herault (VALETON, 1972).

O termo Bauxita é utilizado para produtos de intemperismo ricos em alumina, mas pobre em alcalinos terrosos e sílica. O termo Bauxita minério, portanto, é aplicado para

bauxitas que sejam economicamente lavráveis no presente ou no futuro previsível, contendo  $\text{Al}_2\text{O}_3$  não inferior a 45-50% e não superior a 20% de Fe, S, e 3-5% de sílica combinada.

O termo Alumina refere-se ao puro  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , matéria-prima básica para a obtenção industrial do alumínio, obtida a partir do beneficiamento da Bauxita, que contém 52.9% Alumínio e 47.1 % de Oxigênio. E quando falamos em Alumínio já estamos nos referindo à sua forma metálica do produto final retirado após o processamento da Bauxita e da Alumina (Figura 3.2).



Figura 3.2 – (a) Afloramento de Bauxita na Serra de Ponce (Zarzadilla de Totana) na Espanha. Adaptado de <http://www.regmurcia.com/servlet/s.S1?sit=c,365,m,108&r=ReP-16228> (b) Alumina em pó. Adaptado de <http://www.google.com/images?hl=pt-BR&source=imghp&biw=1152&bih=638&q=> (c) Alumínio metálico. Adaptado de <http://www.google.com/images?hl=pt-BR&biw=1152&bih=638&gbv=2&tbs=isch%3A1>

### 3.2 BAUXITA PARAGOMINAS

A Província Bauxitífera de Paragominas é uma região vasta que comporta antigos vestígios importantes de manto laterítico, hospedeiro de depósitos de Bauxita e apresentando características estruturais semelhantes por toda a sua extensão. Sua gênese se insere no quadro evolutivo supergênico e, de forma mais generalizada, no contexto ecológico, como um todo, da Amazônia Oriental durante o cenozóico (KOTSCHOUBEY, et al. 2005).

As rochas mais antigas dessa região pertencem ao Grupo Itapecurú (nas porções sul e central da região) e à Formação Ipixuna (na porção norte) e estão expostas em inúmeros afloramentos ao longo da rodovia BR 010 e outras rodovias das proximidades. Estas formações sedimentares sustentam os Platôs (regiões elevadas e aplainadas no seu topo) dominantes da região (Figura 3.3), portadores da cobertura laterítica/bauxítica e do seu capeamento argiloso, feições geomorfológicas dominantes na região (KOTSCHOUBEY, et al. 2005).



Figura 3. 3 - Platô Bauxítico típico da região de Paragominas. Adaptado de Kotschoubey et al ( 2005).

As informações sobre a litologia da área investigada, no interior da mina de Bauxita da empresa Vale, foram obtidas por meio de furos de sondagem e fornecidas pelo Geólogo dessa empresa, Clóvis Maurity. Esse perfil é composto por uma espessa camada argilosa (Argila de Belterra), seguida de um Horizonte pisolítico, uma camada de Bauxita nodular, Laterita ferruginosa, Bauxita cristalizada, zona de Bauxita cristalizada/amorfa, Bauxita amorfa e, por fim, Argila variegada. A figura 3.4 mostra o perfil litológico da área destacando também a espessura estimada de cada camada.

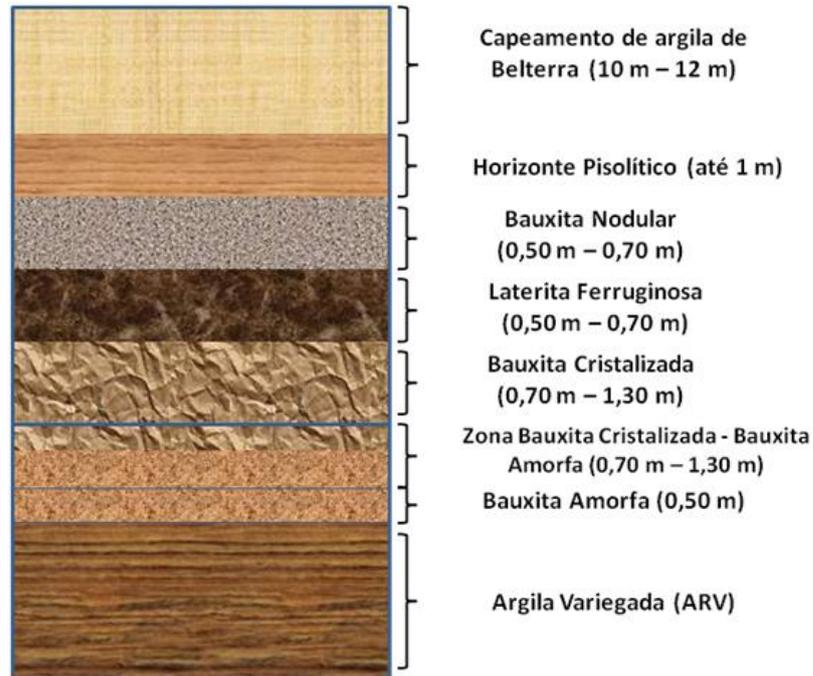


Figura 3.4 – Desenho esquemático do perfil litológico da área investigada dentro da mina com as espessuras estimadas das camadas. Informações fornecidas pelo geólogo da empresa Vale, Clóvis Maurity.

Uma característica importante a ser observada é o fato da existência de três tipos de Bauxita (Figura 3.5). Outra característica na área estudada é a presença de camadas onduladas.



Figura 3.5 – Em sequência: Bauxita nodular, laterita ferruginosa, Bauxita cristalizada e Bauxita amorfa.

### 3.3 A GEOLOGIA DA GOETHITA

Óxidos de ferro, é um termo inclusivo para óxidos e oxihidróxidos de ferro, são minerais que apresentam extensa distribuição em solos do mundo inteiro, em concentrações que variam de menos de 1 a mais de 500g de Fe/kg, dependendo do teor de ferro do material de origem e do estágio de intemperismo do solo. Exceto quando mascarados pela matéria orgânica, são notados visualmente pelo efeito pigmentante que imprimem no solo, refletindo

em matizes, amareladas ou avermelhadas, conforme o tipo ou a associação de tipos de óxidos de ferro presentes no solo (INDA JUNIOR, 2002). A goethita é um mineral de óxido de ferro hidratado (Figura 3.6) com 90,0% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 10,0% de  $\text{H}_2\text{O}$ , com fórmula química  $\text{FeO}(\text{OH})$  que pode ocorrer em vários tons de castanho, laranja, amarelo e vermelho, o que faz variar da mesma forma a sua risca. É opaco e tem brilho por vezes adamantino a submetálico. Este mineral aparece sob a forma de um agregado cristalino fibroso. É muito dificilmente riscado pelo estilete, o que corresponde a uma dureza entre 5,0 e 5,5. Tem clivagem perfeita e fractura desigual, é denso (4,28) e quebradiço. A goethita possui também um aspecto estriado e áspero. Sua ocorrência está associada ao quartzo, por alteração de sulfetos como pirita; inclusões em hematita, limonita e micas. Em parte, é formado a partir de limonita. Durante o processo de intemperismo o Piroxênio ( $\text{FeSiO}_3$ ) rico em ferro libera sílica e íons ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ) para a solução aquosa, daí o ferro ferroso é oxidado formando ferro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Esse ferro férrico combina-se com água formando produtos ferruginosos, por exemplo o Oxi-Hidróxido de Ferro que recebe o nome de Goethita (Figura 3.7). Em ambientes aeróbios os óxidos de ferro predominantes são a Goethita e a Hematita cuja alta estabilidade termodinâmica e baixa solubilidade permitem que esses minerais persistam no solo por um longo período desde que mantido o ambiente aeróbio (INDA JUNIOR, 2002).



Figura 3.6 – Amostra de Goethita coletada nas proximidades de Xambioá-TO.

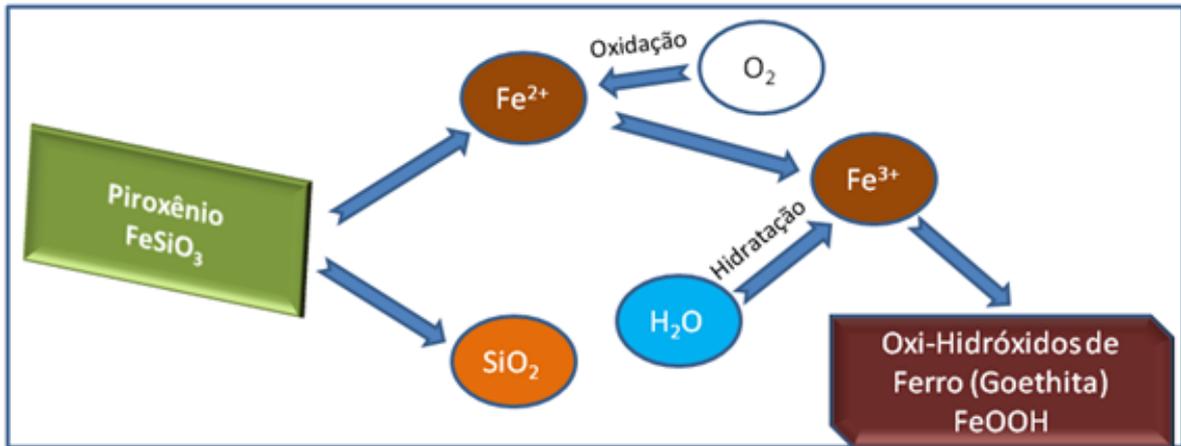


Figura 3.7 – Esquema mostrando o processo de formação química da Goethita.

### 3.4 GOETHITA XAMBIOÁ

Regionalmente, ocorrem sucessões de rochas sedimentares de unidades litoestratigráficas basais da Bacia do Parnaíba (Figura 3.8) que constituem áreas topograficamente elevadas, com características de platôs. Em vários locais foram formadas crostas lateríticas, as quais capeiam serras e morros, tornando os topos mais resistentes à erosão. Essas formações ferríferas fazem parte da Formação Pimenteiras e repousam em discordância erosional sobre rochas metamorfizadas do Cinturão Araguaia (AMARO, 2011). Constituem camadas horizontalizadas de espessuras centimétricas a métricas. Apresentam textura oolítica, sendo que, quase sempre, os oólitos exibem estruturas concêntricas assimétricas em tons laranja e marrom e, em menor quantidade há oólitos sem estruturação, ou seja, maciços, mas são sempre constituídos de hematita e/ou goethita (AMARO, 2011).

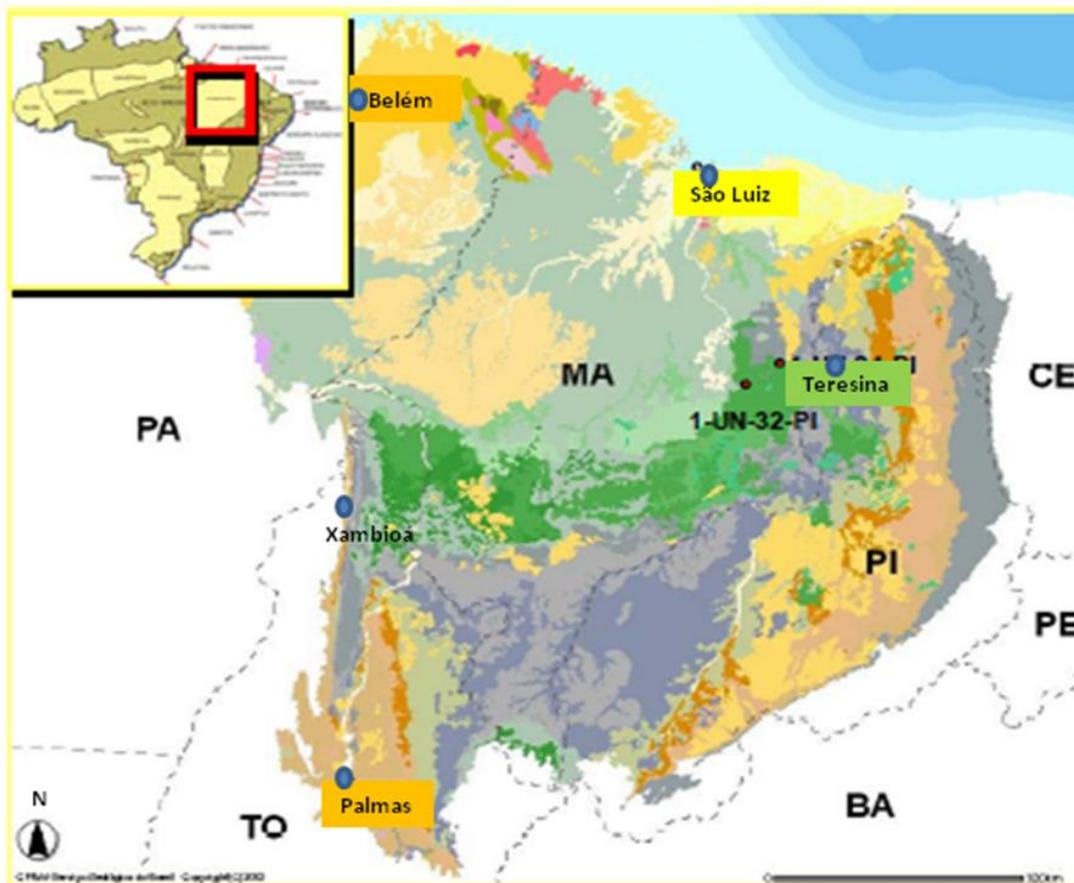


Figura 3.8 – Localização geológica da Bacia do Parnaíba. Modificado de [http://www.google.com.br/imgres?imgurl=http://www.ogx.com.br/media/Bacia-Parnaiba\\_novo.jpg](http://www.google.com.br/imgres?imgurl=http://www.ogx.com.br/media/Bacia-Parnaiba_novo.jpg)

A concentração do minério de ferro é mais freqüente sobre as serras (Figura 3.9b) e menos freqüente nos vales, pois o intemperismo remove do solo o material mais vulnerável

(formando os vales) permanecendo o material mais resistente (os picos das serras) devido à presença de ferro. Segundo o geólogo Wagner Nascimento, este tipo de feição geológica denominada de chapéu-de-ferro ou Gossan (Figura 3.9a) é constituído por capeamento residual laterítico que é um solo fortemente lixiviado por intemperismo químico, que se desenvolve em climas tropicais a temperados úmidos, pobre em nutrientes e com alta concentração residual de hidróxido de ferro e de alumínio. A alta concentração residual acompanhada do ressecamento desses hidróxidos pouco solúveis leva à formação de uma crosta ou carapaça laterítica muito resistentes aos agentes erosivos de zonas mineralizadas com sulfetos ricos em ferro, que se originam pelo intemperismo químico dos sulfetos com oxidação do ferro II para ferro III, formando-se hematita e hidróxido de ferro limonítico que é muito resistente ao intemperismo químico. Ocorrências de Gossans são importantes, pois indicam uma possível existência de minério em profundidade. Modelos limoníticos de sulfetos e outros minerais solúveis em suas formas externas, muitas vezes com indicação de antigas clivagens e fraturas, podem ser encontradas em certos gossans (CPRM, 2008).



Figura 3.9 – (a) Topo de serra sustentado pela formação ferrífera (Chapéu de Ferro). (b) Afloramento de leito ferrífero de Goethita. Informações fornecidas pelo Geólogo Wagner Nascimento.

A litologia da área investigada é formada por sedimentos recentes, seguido de rochas da formação Pimenteiras como: Argilito siltoso, Ironstone oolítico (rochas com concreções esféricas contendo oxi-hidróxido de ferro), Argilito siltoso contendo oxi-hidróxido de ferro (Goethita) e Conglomerado, seguidos de Xisto típico da Formação Xambioá e Quartizito da Formação Morro do Campo (AMARO, 2011). A Figura 3.10 mostra esses aspectos geológicos na região que se localiza entre os municípios de Xambioá e Vanderlândia. Segundo o geólogo Wagner Nascimento, a litologia local da área investigada é composta de camadas de Goethita, seguida de uma camada de Argilito Siltoso que estão localizados sobre um embasamento de Granito (Figura 3.11).

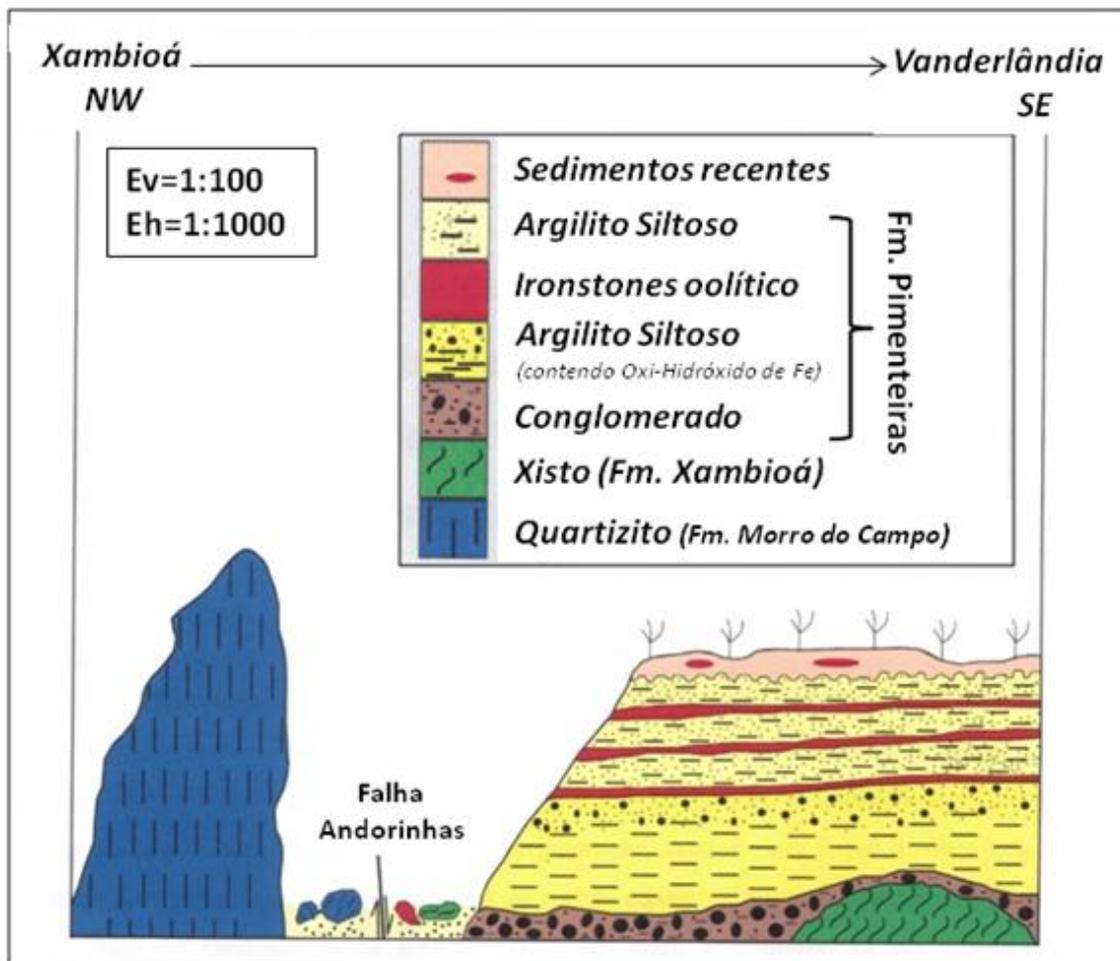


Figura 3.10 – Seção NW-SE esquemática entre Xambioá e Vanderlândia. À esquerda, afloramento verticalizado de quartizitos da Formação Morro do Campo. À direita, leitos ferríferos da Formação Pimenteiras que está discordantemente sobre a formação Xambioá. Modificado de Amaro (2011).

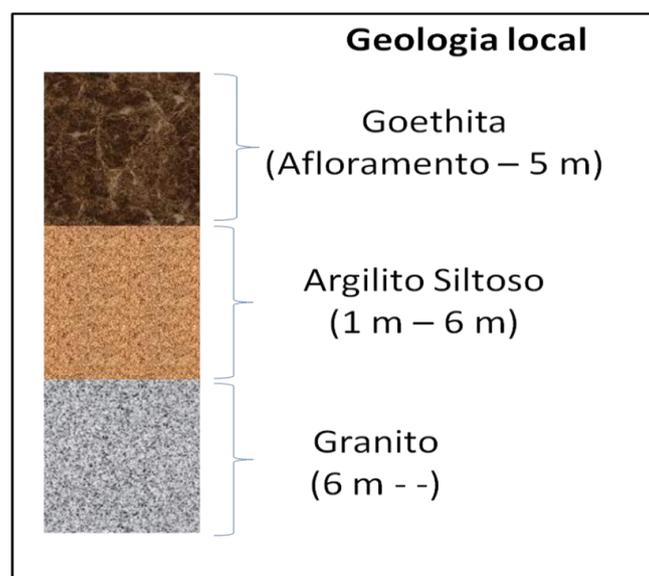


Fig. 3.11 - Desenho esquemático do perfil litológico local da área de Xambioá. Informações fornecidas pelo geólogo Wagner Nascimento.

## 4 REVISÃO DE CONCEITOS

### 4.1 GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

O GPR é um método eletromagnético de Geofísica rasa de imageamento de subsuperfície em alta resolução, que se fundamenta na propagação e reflexão de ondas eletromagnéticas de altas frequências (normalmente em torno de 10 MHz a 2500 MHz) para mapear estruturas e feições geológicas bem como objetos postos enterrados (BORGES, 2007). Esse sistema Eletromagnético consiste em um par de antenas sendo uma transmissora (Tx) e a outra receptora (Rx) acopladas a uma unidade computacional onde será visualizada, em alta resolução, a resposta que é chamada radargrama (perfil de reflexão) trazidas pelas ondas refletidas. A antena transmissora (Tx) irradia, continuamente, ondas eletromagnéticas à subsuperfície, num tempo duplo de percurso do pulso eletromagnético sofrendo refração, difração e reflexão, e interagindo com os materiais do meio que podem possuir diferentes propriedades eletromagnéticas. As ondas refletidas que retornam à superfície são captadas por outra antena, a receptora (Rx) - (Figura 4.1), que pode estar acoplada à antena receptora ou posta separada da mesma - (Figura 4.2).

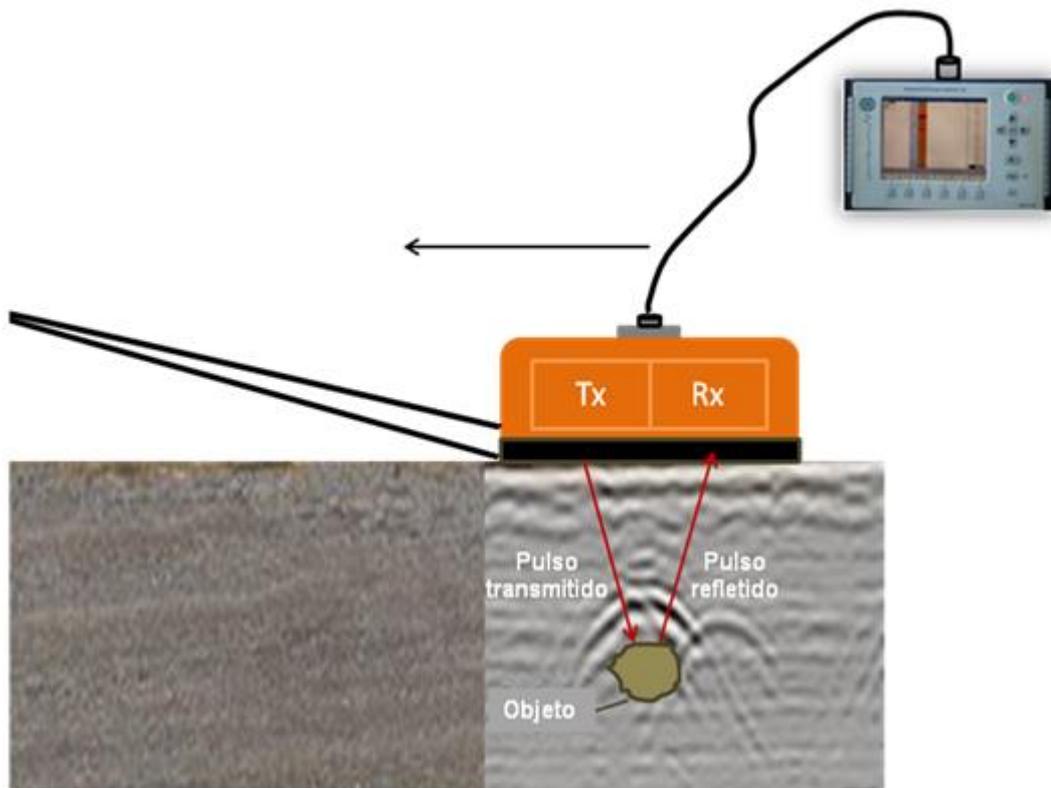


Figura 4.1 – Esquema do comportamento de um pulso de onda eletromagnética emitida por uma antena bi-estática de GPR acoplada a uma unidade computacional.

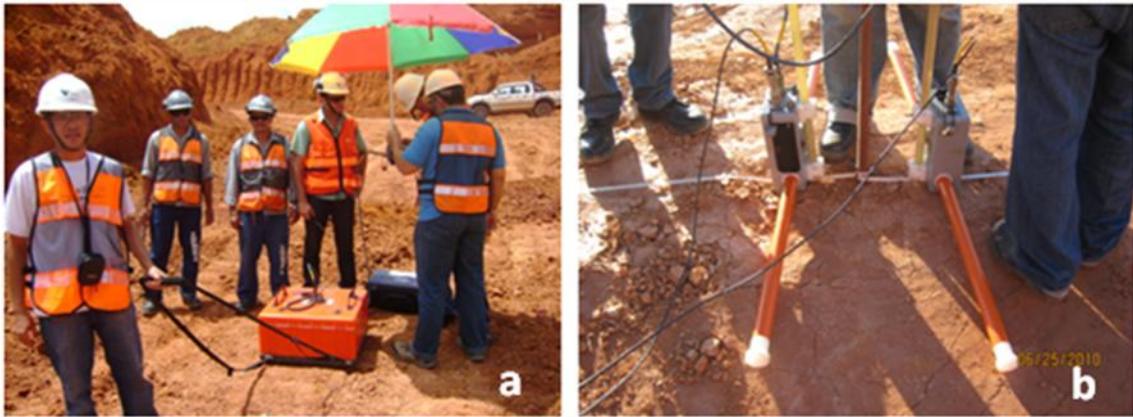


Figura 4.2 – Antenas de GPR em operação. (a) Antena bi-estática blindada. (b) Antena bi-estática não blindada.

A figura 4.3 mostra o aspecto do comportamento da onda eletromagnética emitida pela antena transmissora (Tx) e a refletida captada pela receptora (Rx). Um aspecto importante é o fato de a antena transmissora emitir, também, ondas através do ar (ondas diretas). A interação desta onda com o ar não mostra nenhuma anomalia justamente devido ao fato de as propriedades eletromagnéticas, ao longo desse meio, não sofrer variação.

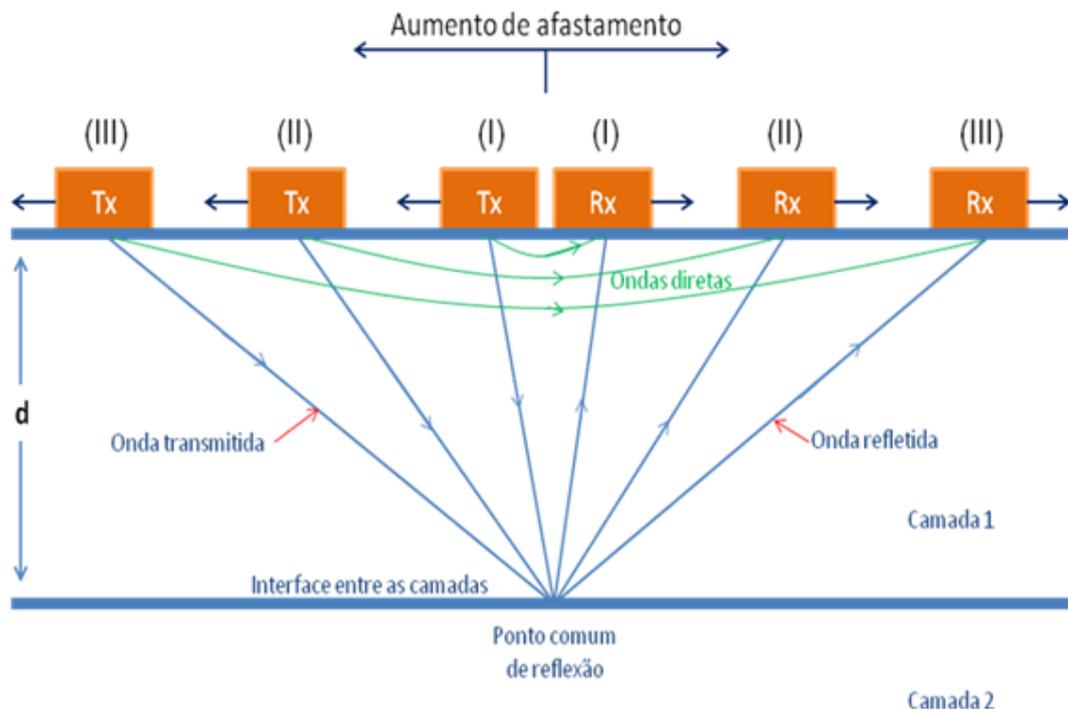


Figura 4.3 – Esquema do comportamento das ondas eletromagnéticas transmitidas para a subsuperfície. Reproduzido de LUIZ (1998).

O comportamento da onda eletromagnética, como a sua profundidade de penetração, sua reflexão, difração e refração, ao penetrar o solo, depende de sua frequência e das

propriedades eletromagnéticas do meio investigado. Quanto maior for a frequência da onda eletromagnética que penetra o solo, maior será a sua interação com o meio e, portanto, maior será a dissipação de sua energia o que ocasiona uma menor penetração (LUIZ, 1998). A tabela 4.1 mostra para diferentes áreas de interesse de aplicação do GPR, a frequência comumente usada e a profundidade estimada de penetração

Tabela 4.1 - Frequência associada à profundidade (adaptada da GSSI, 2003).

Área de Interesse	Frequência Central (MHz)	Profundidade Estimada de Penetração (m)
<b>Estruturas de Concreto, Estradas e Pontes</b>	1500	<b>0,5</b>
<b>Concreto, Arqueologia e Solos Superficiais</b>	900	<b>1</b>
<b>Geologia, Arqueologia e Ambiental</b>	400	<b>4</b>
<b>Geologia e Meio Ambiente</b>	200	<b>8</b>
<b>Geologia e Meio Ambiente</b>	<b>100</b>	<b>20</b>

Por outro lado, essa profundidade alcançada depende também das propriedades eletromagnéticas do meio. Por exemplo, se o meio for condutivo (zona de alta perda) a onda sofre atenuação alcançando uma baixa profundidade. Já quando o meio for menos condutivo (zona de baixa perda) a onda sofre uma menor atenuação e alcança uma maior profundidade. A equação 4.1 mostra que a velocidade de propagação da onda é governada pela permissividade dielétrica relativa do meio. Em rochas que possuem uma alta resistividade elétrica, a velocidade de propagação é controlada, principalmente, pela permissividade dielétrica do meio (DANIELS, 1996). A água tem uma permissividade relativa de 80, enquanto que grande parte dos materiais geológicos possui uma permissividade que está em um intervalo de 4-8. Por esse motivo, o conteúdo de água nos materiais exerce uma grande influência na propagação de um pulso de radar. A tabela 4.2 reúne materiais com diferentes propriedades mais a velocidade de propagação da onda eletromagnética e sua atenuação.

Tabela 4.2 - Constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ), condutividade elétrica ( $\sigma$ ), velocidade ( $v$ ) e atenuação ( $\alpha$ ) típicas de alguns materiais (DAVIS ; ANNAN, 1989).

Material	$\epsilon_r$	$\sigma$ (mS/m)	$v$ (m/ns)	$\alpha$ (dB.m)
Ar	1	0	0,30	0
Água destilada	80	0,01	0,033	0,002
Água fresca	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	3000	0,01	1000
Areia seca	3-5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20-30	0,1-1	0,06	0,03-0,3
Calcário	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
Folhelho	5-15	1-100	0,09	1-100
Siltito	5-30	1-100	0,07	1-100
Argila	5-40	2-1000	0,06	1-300
Granito	4-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Sal seco	5-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Gelo	3-4	0,01	0,16	0,01

Os contrastes como, por exemplo, a verificação de interfaces entre camadas as quais visualizamos no radargrama, é consequência da reflexão de parte do pulso de radar que é provocada pela variação das propriedades dielétricas do meio (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009). Outra característica do método está relacionada à resolução dos dados obtidos. Quanto maior for a frequência da onda maior será a resolução obtida, permitindo a identificação de interfaces menos separadas e de pequenos objetos.

$$v = \frac{c}{\sqrt{(\mu_r \epsilon_r)}} \quad (4.1)$$

Onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo (0,3 m/ns),  $\mu_r$  a permeabilidade magnética relativa que é próxima da unidade para rochas não-magnéticas, e  $\epsilon_r$  é a permissividade dielétrica relativa.

A permeabilidade magnética relativa e a permissividade elétrica relativa são dadas, respectivamente, pelas equações 4.2 e 4.3

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4.2)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (4.3)$$

Onde  $\mu$  e  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  H/m são respectivamente a permeabilidade magnética do meio investigado e permeabilidade magnética no vácuo. E  $\epsilon$  e  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m são respectivamente a permissividade elétrica do meio e permissividade elétrica no vácuo.

#### 4.1.1 Conceitos físicos

A energia eletromagnética pode ser transferida para a subsuperfície por difusão (frequências baixas menores que  $10^4$  Hz) ou por propagação (frequências muito elevadas da ordem de MHz). No caso do GPR, a transferência é realizada por propagação da onda, pois as frequências utilizadas são muito elevadas. Uma onda eletromagnética consiste na oscilação de um campo elétrico e de um campo magnético. Podemos trabalhar com a equação de um dos campos apenas, já que as suas soluções possuem a mesma forma.

A equação da onda para o campo elétrico é dada por

$$\nabla^2 \vec{E} = i\omega\mu\sigma\vec{E} - \omega^2\mu\epsilon\vec{E} \quad (4.4)$$

Onde  $\omega$  é a frequência angular que corresponde a  $2\pi f$  ( $f$  é a frequência da onda transmitida em Hz),  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio,  $\sigma$  é a condutividade elétrica,  $i$  é complexo e  $\epsilon$  é a permissividade elétrica do meio.

A solução geral da equação 4.4 é dada por

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \alpha z)} e^{-\beta z} \quad (4.5)$$

A primeira exponencial controla a propagação da onda enquanto que a segunda controla a atenuação da mesma, o demonstrando, assim, que as propriedades eletromagnéticas

do meio governam o comportamento dessa onda (LUIZ, 1998).  $E_0$  é a amplitude máxima da onda eletromagnética,  $z$  é a profundidade,  $\alpha$  e  $\beta$  são os parâmetros que possuem as propriedades eletromagnéticas do meio investigado (condutividade elétrica, permeabilidade magnética e permissividade elétrica do meio), definidos por (WARD ; HOHMANN, 1987) por meio de:

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[ 1 + \operatorname{tg}^2 \delta^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (4.6)$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[ 1 + \operatorname{tg}^2 \delta^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}. \quad (4.7)$$

As reflexões e as refrações sofridas pela onda provocadas pela variação das propriedades eletromagnéticas do meio, ao penetrar a subsuperfície, são acopladas normalmente em um parâmetro chamado impedância intrínseca, definida por

$$Z = \frac{\sqrt{i\omega\mu}}{\sqrt{\sigma + i\omega\epsilon}} \quad (4.8)$$

Onde  $Z$  representa a impedância intrínseca do meio.

A energia refletida dessa onda eletromagnética depende das variações das propriedades eletromagnéticas ou das impedâncias intrínsecas dos meios. A quantidade de energia refletida pode ser determinada por meio do coeficiente de reflexão  $K$ , como mostra a equação

$$K = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.9)$$

Onde  $Z_1$  e  $Z_2$  representam as impedâncias dos meios 1 e 2, respectivamente.

Quando a condutividade do meio é muito pequena (menor que  $10^{-3}$  Siemens/metro), a impedância intrínseca  $Z$  é aproximada por  $\sqrt{\mu/\epsilon}$ . Assim o coeficiente de reflexão  $K$  pode ser escrito como

$$K = \left( \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \right) = \left( \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \right) \quad (4.10)$$

Onde  $v_1$  e  $v_2$  representam as velocidades da onda nos meios 1 e 2, respectivamente.

Como citado anteriormente, as propriedades eletromagnéticas do meio governa o comportamento da onda eletromagnética ao penetrar esse meio. A condutividade elétrica exerce influência na atenuação da onda, já a permissividade elétrica influencia na velocidade da onda numa razão inversa. A permeabilidade magnética influencia tanto na atenuação da onda como na sua velocidade. Valores elevados dessa propriedade eletromagnética provocam maior atenuação e menor velocidade. Na realidade, essa propriedade só exerce grande influência quando se tem uma elevada anomalia magnética (LUIZ, 1998).

#### 4.1.2 Processamento de dados de GPR

Devido às interações das ondas eletromagnéticas emitidas pelo GPR com o meio na subsuperfície, há perdas na energia dessas ondas causadas por espelhamento e atenuação. As perdas exercem influência no sinal registrado, ocultando ou modificando as formas das estruturas enterradas. Além desses efeitos, comumente pode haver saturação dos registros pelas grandes amplitudes das ondas aéreas ou diretas, que de certa forma escondem os sinais provenientes das refrações e reflexões. Esse tipo de interferência, denominada de “wow”, concentra-se em frequências muito baixas, próximas de zero (LUIZ, 1998).

Para minimizar os efeitos citados acima, faz-se necessário a utilização de métodos numéricos para processar os dados e assim melhorar o aspecto das imagens obtidas com o GPR (LUIZ, 1998). Os dados, antes do processamento, passam por uma etapa de pré-processamento, que podem envolver modificações no cabeçalho, retirada de *scans* ruins e redistribuição de *scans* para manter uma escala horizontal constante. Algumas dessas etapas de processamento são descritas a seguir:

- Correção estática: Permite a eliminação do registro das ondas diretas fazendo com que o zero do perfil coincida com a superfície do terreno.

- Filtros: Permitem a eliminação de frequências indesejáveis, que escondem ou provocam ambiguidade em feições importantes. Existe uma variedade de filtros que podem ser aplicados ao perfil durante o processamento, e cada um possui uma finalidade dependendo do problema que está sendo investigado, ou que feições precisam ser destacadas.

- Ganho: Aplica-se um ganho para realçar os refratores e os difratores de baixa amplitude que ocorrem em maiores profundidades e normalmente desaparecem devido à atenuação da onda eletromagnética.

- Conversão de tempo em profundidade: Consiste em transformar o tempo duplo da propagação da onda eletromagnética (ida e volta) emitida, em profundidade uma vez que o parâmetro que realmente se mede com o GPR é exatamente o tempo de propagação da onda emitida.

## 5 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

Os levantamentos para o mapeamento de camadas de Bauxita foram realizadas no interior da mina da empresa Vale e também ao longo da rodovia PA 256 (Figura 5.1), estrada que dá acesso à mina nas proximidades do município de Paragominas-PA. Já os levantamentos para o mapeamento de camadas de Goethita foram realizadas em uma fazenda localizada nas proximidades do município de Xambioá-TO, onde ocorrem afloramentos de Granito, como mostra a figura (5.2). No presente trabalho utilizamos o método eletromagnético GPR (Ground Penetrating Radar) na mina de Bauxita e na PA 256 e o método da Eletrorresistividade somente no interior da mina.

### 5.1 MÉTODO GPR

Utilizamos o método GPR com o objetivo de mapear camadas de Bauxita-laterítica e de Goethita identificando aspectos como ondulações e descontinuidades dessas camadas. No presente trabalho, utilizamos antenas de 80 MHz não-blindada (bi-estática não blindada), de 200 MHz (bi-estática blindada) e de 400 MHz também, bi-estática blindada e o equipamento TerraSirch SIR System – 3000, da Geophysical Survey Systems, operando no modo tempo e contínuo. As medidas foram feitas ao longo de perfis de comprimentos variando entre 50 m e 100 m e com posicionamento controlado pela inserção de marcas no registro a intervalos de 5 m e 10 m.



Figura 5.1 – Levantamentos realizados para o mapeamento de camadas de Bauxita. (a) Levantamentos no interior da mina de Bauxita da empresa Vale. (b) Levantamentos realizados sobre um corte localizado no Km 20 da rodovia PA 256.



Figura 5.2 – Levantamentos realizados para o mapeamento de camadas de Goethita no interior de uma fazenda em Xambioá-TO. (a) Marcação da linha de perfis de GPR. (b) No destaque, região da fazenda onde ocorrem afloramentos de Granito.

O processamento dos dados de GPR foi feito por meio do software Reflexw, versão 5.5.1 da K. J. Sandmeier. Foi feita a correção estática, um ganho de energia de decaimento, interpolação das marcas, filtro *1-D subtract-mean* (dewow), filtros *2-D running average* e *background removal* e Filtro FK. A velocidade utilizada, no processamento, foi de 0,08 m/ns para os levantamentos realizados no mapeamento de camadas de Bauxita e no processamento dos dados coletados em Xambioá foi utilizado o valor de 0,06 m/ns, ambas velocidades determinadas por meio de ajustes hiperbólicos.

## 5.2 MÉTODO DA ELETORRESISTIVIDADE

No interior da mina de Bauxita empregamos ainda o método da Eletorresistividade sobre o capeamento de Argila de Belterra de aproximadamente 12 m de espessura sobre a zona mineralizada, já que durante a pesquisa, um perfil com o GPR foi realizado no local, porém sem sucesso. O perfil não mostrou bom resultado, não sendo possível alcançar a zona mineralizada com a antena de 200 MHz, pois a condutividade elétrica da argila atenuou a onda do GPR antes que fosse alcançada a mineralização. Daí tornou-se viável a aplicação do método da Eletorresistividade, pois a condutividade elétrica favorece a aplicação desse método. Durante a aplicação do método realizamos um imageamento elétrico e uma Sondagem Elétrica Vertical (SEV) com o intuito de fazer uma correlação com os perfis de GPR referentes à zona mineralizada. O imageamento elétrico foi realizado com o equipamento Geotest no arranjo Wenner - Schlumberger com 20 eletrodos com espaçamento

mínimo de 10 m, investigando até ao nível 7 (Figura 5.3). Já a SEV foi realizada com o resistivímetro modelo IRPI-1000 da GEOTEST (Brasil) de 1KW e 20 canais no arranjo Schlumberger atingindo o valor  $AB/2 = 100$  m.

O processamento do imageamento elétrico foi realizado por meio do software RES2DINV da Geotomo Software, que utiliza o método da suavidade (GEOTOMO, 2009) enquanto que a curva de eletrorresistividade da SEV foi plotada por meio do software IX1D da Interpex Limited.



Figura 5.3 – Operação de imageamento elétrico realizado sobre o capeamento argiloso da mina de Bauxita da empresa Vale em Paragominas.

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 GPR PARA BAUXITA

Como dito na seção 5, realizamos as medidas de GPR para Bauxita no interior da mina localizada sobre o Platô Miltônia e também sobre cortes localizados ao longo da rodovia PA 256. Os levantamentos com o GPR tiveram como objetivo principal verificarmos a viabilidade da aplicação desse método para o mapeamento das camadas que compõem as bauxitas lateríticas, identificando, assim, parâmetros como, profundidade e espessura. Utilizamos uma antena bi-estática blindada de 200 MHz realizando perfis que variam de 50 m a 100 m de comprimento. Ao longo deste capítulo serão mostrados perfis que identificam esses parâmetros tanto para a Bauxita quanto para Goethita. Realizamos, para Bauxita, 6 perfis 2 D, sendo 5 com a antena de 200 MHz e um com a antena de 400 MHz incluindo um modelo Quase 3D utilizando essa mesma antena. Já para a Goethita, realizamos 8 perfis 2 D, sendo 1 realizado com antena de 80 MHz e 7 com a antena de 200 MHz.

Como mostrado na figura 3.4, a geologia local no interior da mina de Bauxita é caracterizada por possuir um espesso capeamento de Argila de Belterra (sobre a zona mineralizada), seguida de um Horizonte pisolítico, Bauxita nodular, Laterita ferruginosa, Bauxita cristalizada, Bauxita cristalizada-Amorfa, Bauxita amorfa e Argila Variegada. A espessura do capeamento argiloso mede cerca de 12 m. Primeiramente foi realizado um perfil de 50 m na direção Nordeste-Sudoeste sobre o capeamento argiloso cuja argila caracteriza-se por ser bastante compactada e com uma pequena cobertura de argila de tom amarelado. A figura 6.1 mostra o esquema de posicionamento dos perfis 1 e 2.

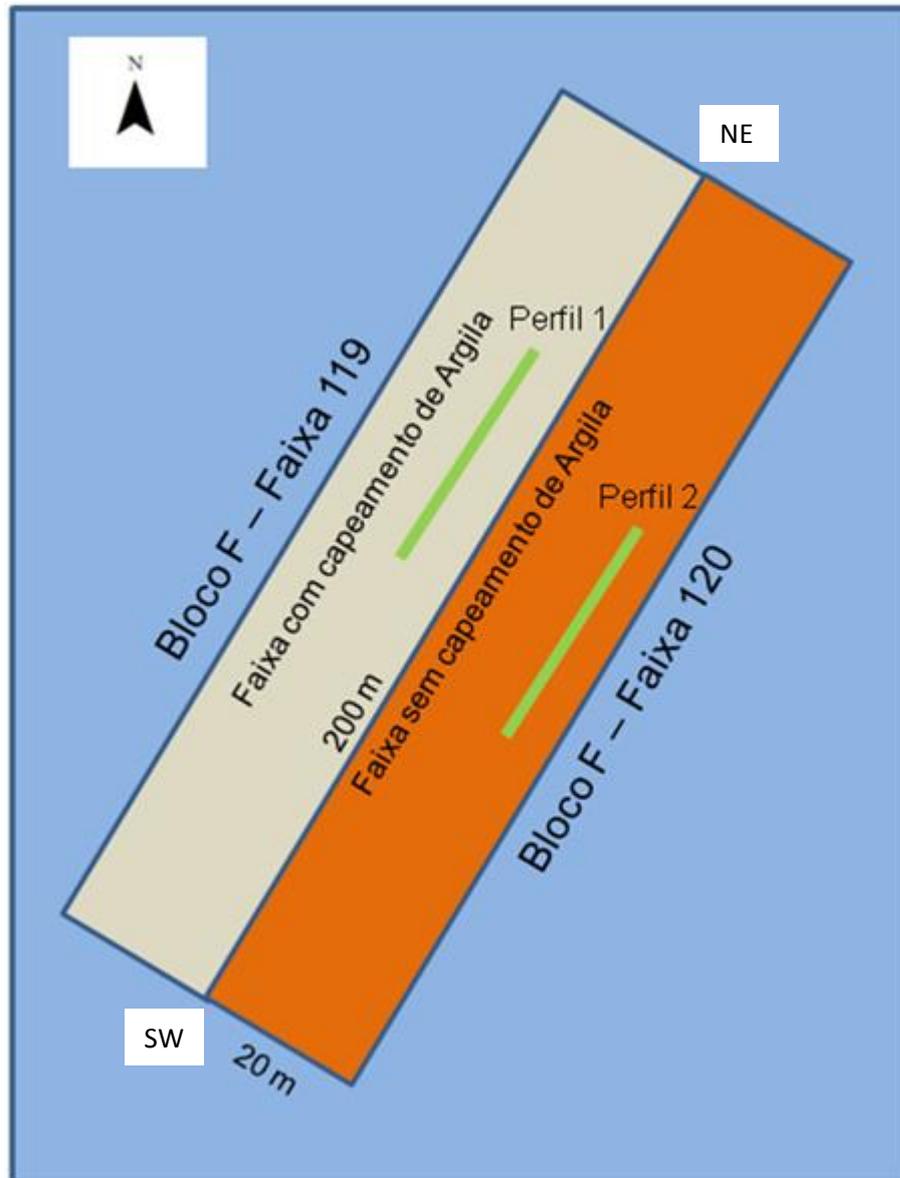


Figura 6.1 – Desenho esquemático de posicionamento dos perfis 1 e 2.

O perfil 1 mostrado na figura 6.2 indica que, realizando medidas de GPR sobre o espesso capeamento argiloso, é inviável alcançar a zona mineralizada com a antena de 200 MHz, pois a condutividade elétrica da argila atenuou a onda do GPR antes que fosse alcançada a mineralização. Esse perfil mostrou apenas pequenas hipérbolas no intervalo de 0 a 10 m que podem estar relacionados à presença de pequenos corpos e outras pequenas reflexões nos intervalos entre 20 e 25 m, e entre 45 e 50 m que podem estar associadas a concreções ferruginosas bastante presentes na área (Figura 6.3). Optamos, então, por realizar um perfil, com a mesma antena, e também de 50 m na direção Nordeste-Sudoeste, em um

local sem a presença do capeamento de argila. Neste perfil, mostrado na figura 6.4, observamos refletores que caracterizam interfaces que podem estar relacionadas à sequência de camadas mostradas na figura 3.4 da seção 3.2. Em sequência, podemos relacionar as camadas na seguinte ordem: Bauxita cristalizada, Zona Bauxita cristalizada-Amorfa, Bauxita amorfa e Argila variegada.

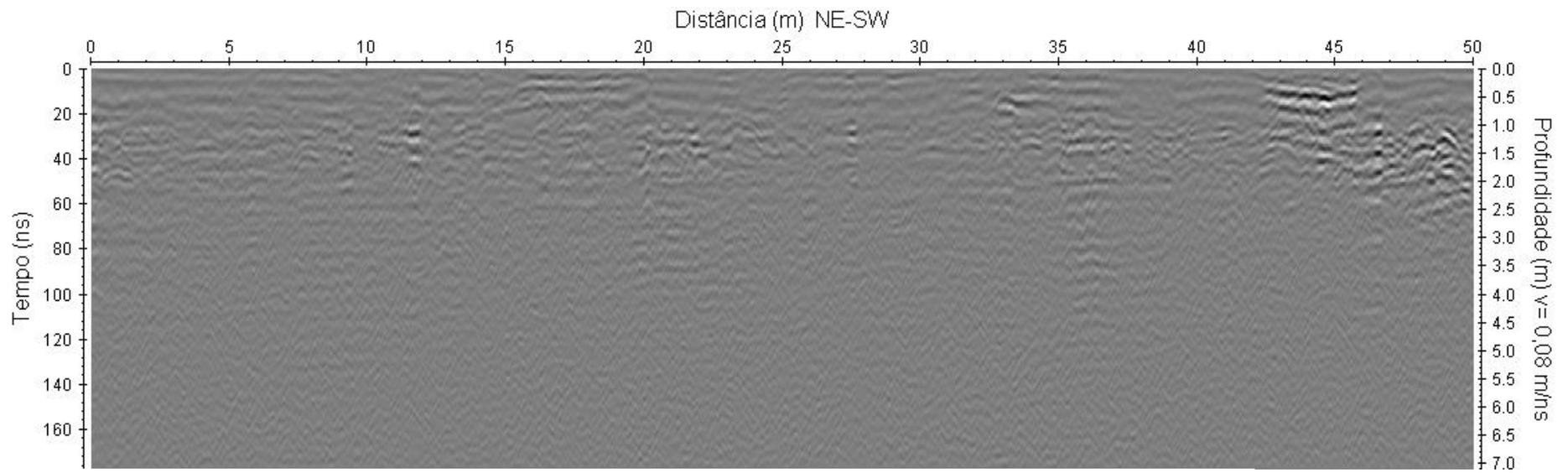


Figura 6.2 – Perfil 1 processado realizado sobre o capeamento de Argila de Belterra com uma antena de 200 MHz.

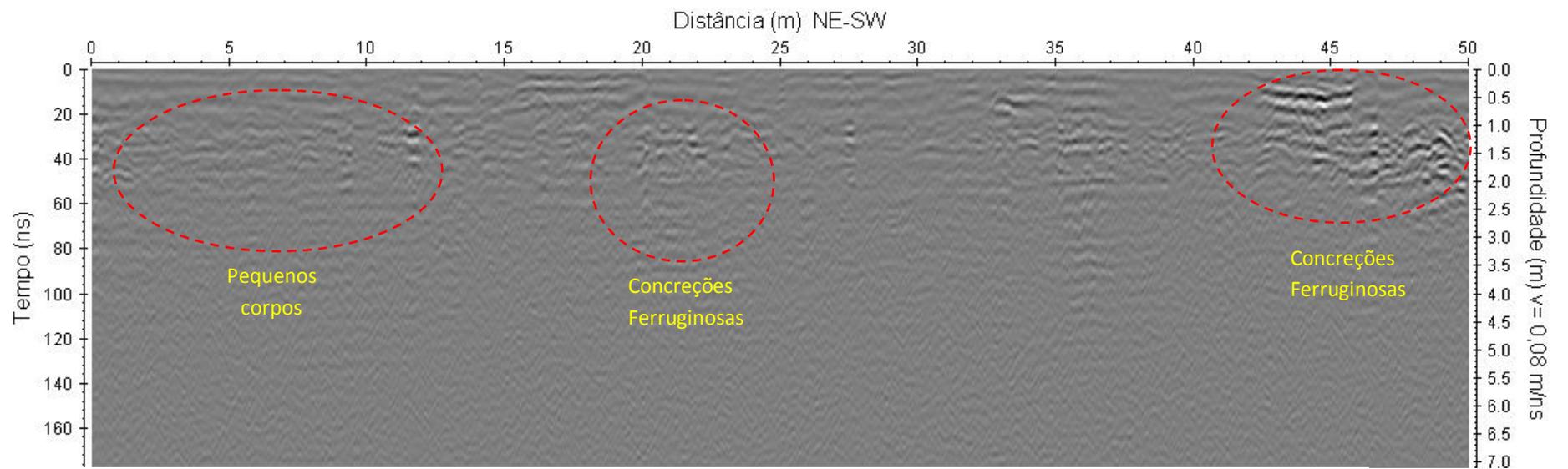


Figura 6.3 – Perfil 1 processado e interpretado realizado sobre o capeamento de Argila de Belterra com uma antena de 200 MHz.

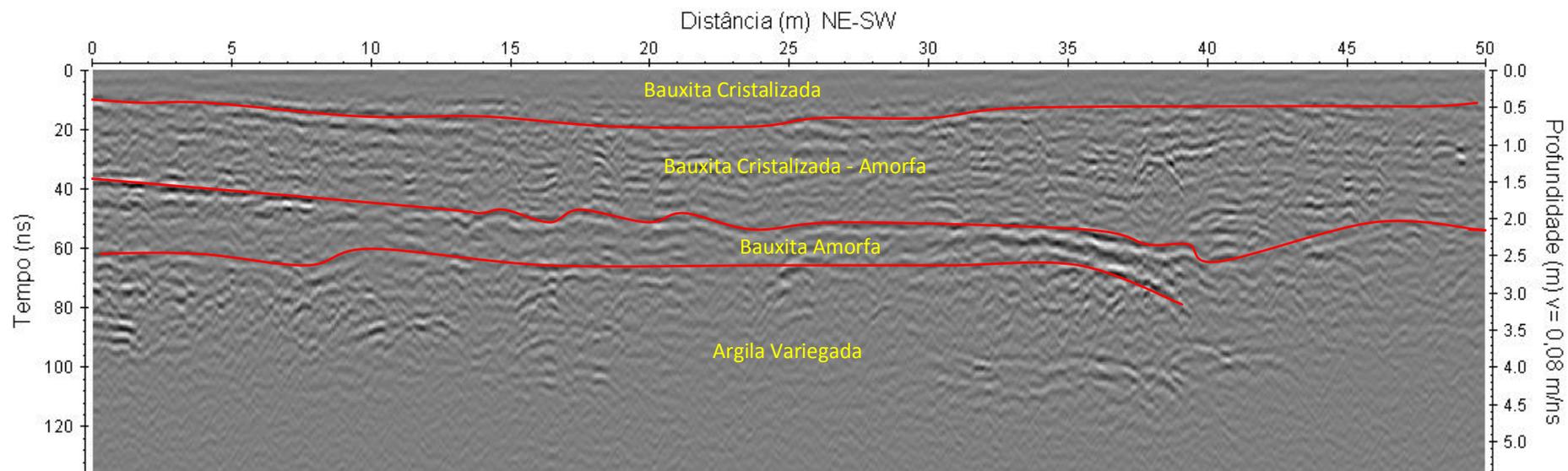


Figura 6.4 – Perfil 2 processado e interpretado realizado sobre a zona mineralizada com uma antena de 200 MHz.

Realizamos outras medidas de GPR e também medidas de Eletroresistividade no interior da mina de Bauxita. As medidas de Eletroresistividade foram realizadas sobre o capeamento de Argila de Belterra. Realizamos um imageamento elétrico e uma SEV cujas pseudoseções e curvas de resistividade serão mostradas mais adiante. Já as medidas de GPR foram realizadas sobre a zona mineralizada (sobre a camada de Bauxita cristalizada). Realizamos uma malha de perfis de GPR com uma antena bi-estática blindada de 400 MHz para gerar um modelo Quase 3D de alta resolução para verificarmos, em detalhes, parâmetros como profundidade, espessura e ondulações das camadas de Bauxita o que pode possuir grande utilidade em operações de mina. O modelo mostra detalhadamente o aspecto do topo e também da base das interfaces das camadas da zona mineralizada. Os perfis da malha foram realizados na direção Norte-Sul com comprimentos de 100 m e um espaçamento entre linhas de 2,5 m. A figura 6.5 mostra o esquema de posicionamento da malha de GPR e da linha de imageamento elétrico e da SEV.

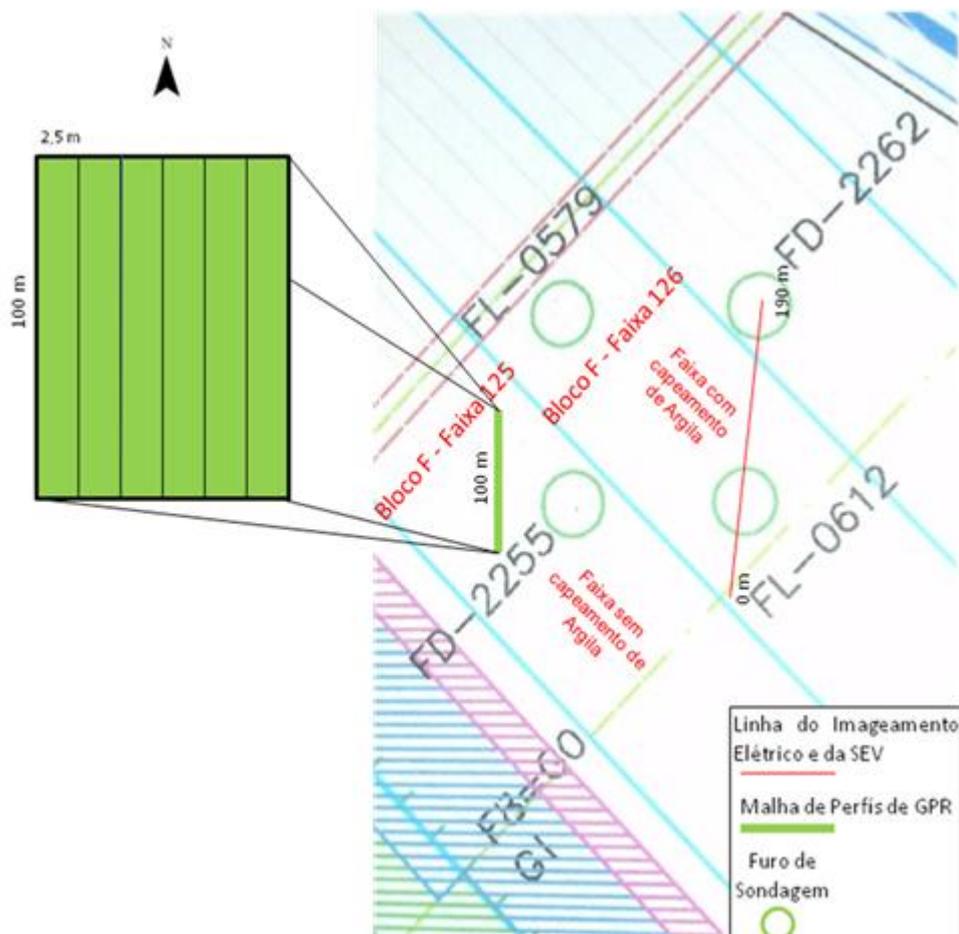


Figura 6.5 – Desenho esquemático de posicionamento da malha de GPR e das medidas de Resistividade.

A figura 6.6 mostra o perfil 3 processado e interpretado localizado no ponto mediano da malha de GPR a fim de mostrar o aspecto 2D das camadas de Bauxita. O perfil mostra fortes reflexões que provavelmente estão associadas às interfaces das camadas de Bauxita. Observam-se três interfaces. Verifica-se a seguinte sequência: Bauxita cristalizada, Bauxita cristalizada-amorfa, Bauxita amorfa e Bauxita laminar de fundo.

As figuras 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10 mostram com clareza o aspecto Quase 3D, em profundidade, do espalhamento da interface Bauxita cristalizada-Zona cristalizada-amorfa, camada de Bauxita amorfa, espalhamento da interface Bauxita amorfa-Bauxita laminar de fundo e o aspecto de final do espalhamento desta interface.

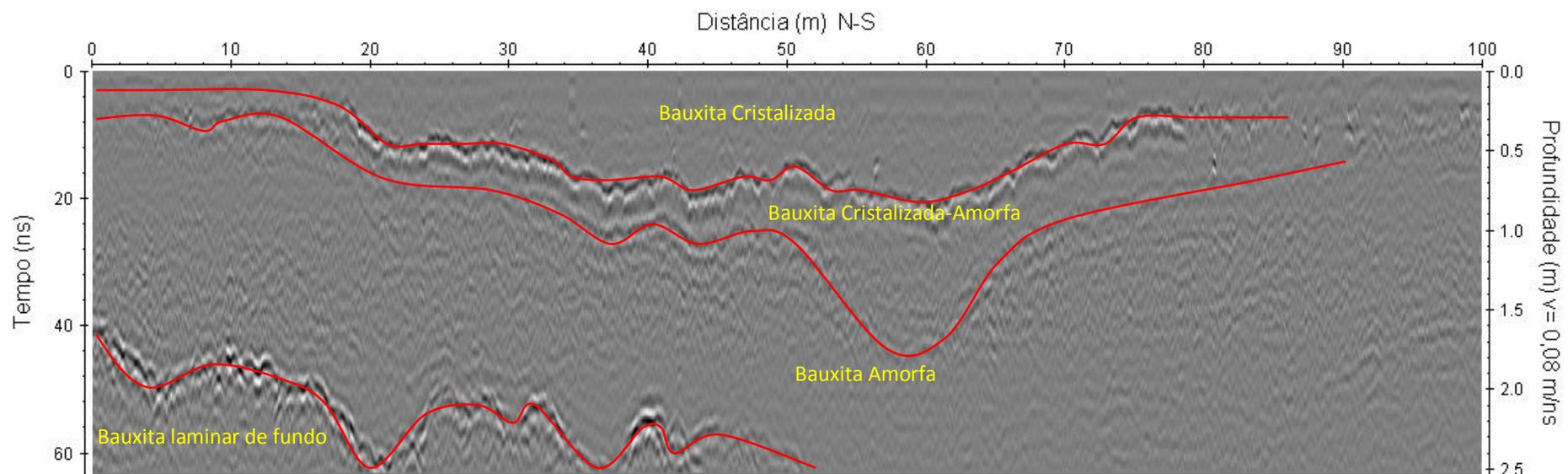


Figura 6.6 – Perfil 3 processado e interpretado realizado com a antena de 400 MHz sobre a zona mineralizada.

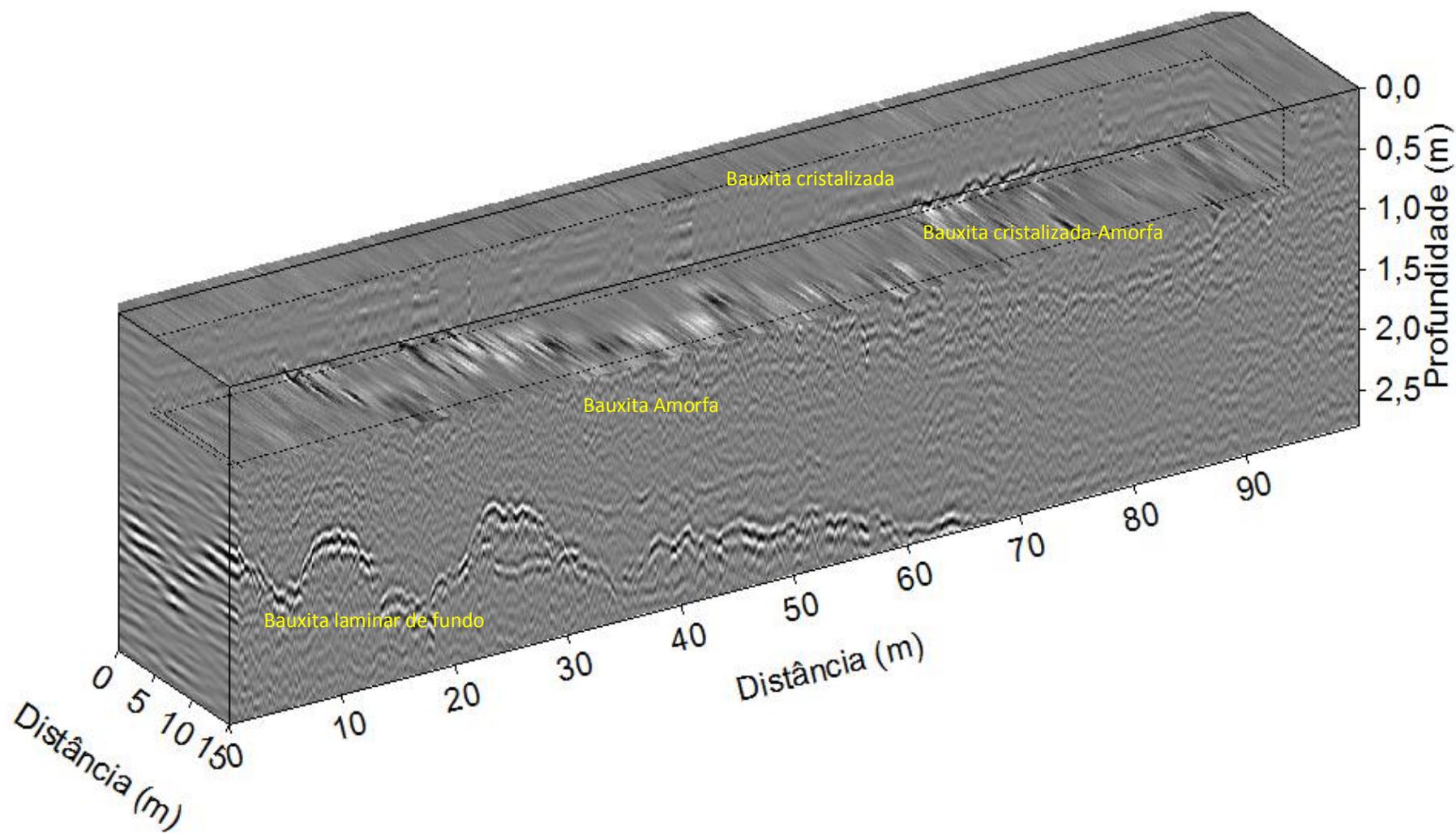


Figura 6.7 – Modelo Quase 3D elaborado com a malha de dados de GPR realizada com a antena de 400 MHz. Visualização do espalhamento da primeira interface.

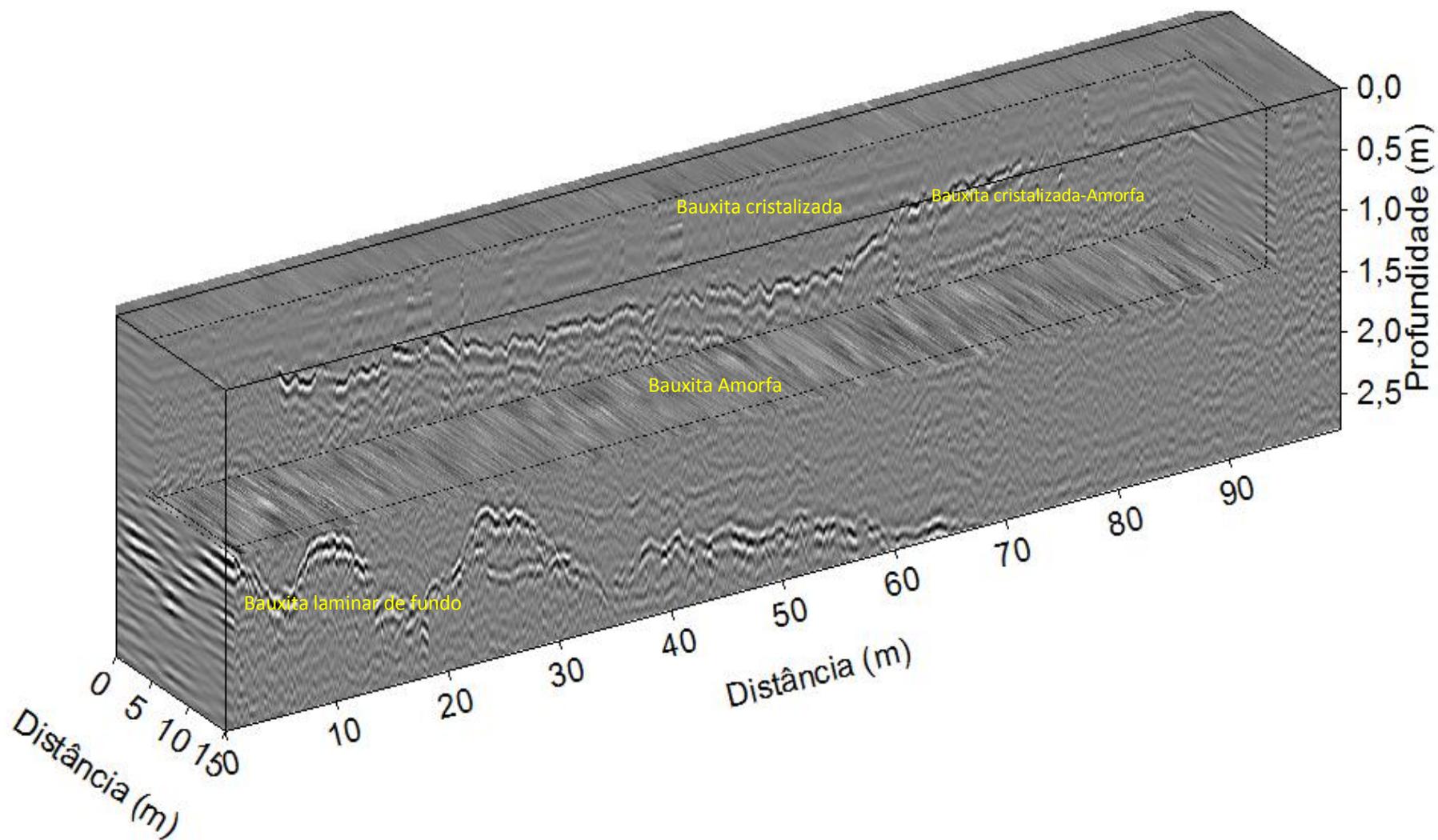


Figura 6.8 – Modelo Quase 3D elaborado com a malha de dados de GPR realizada com a antena de 400 MHz. Visualização intermediária entre as duas interfaces.

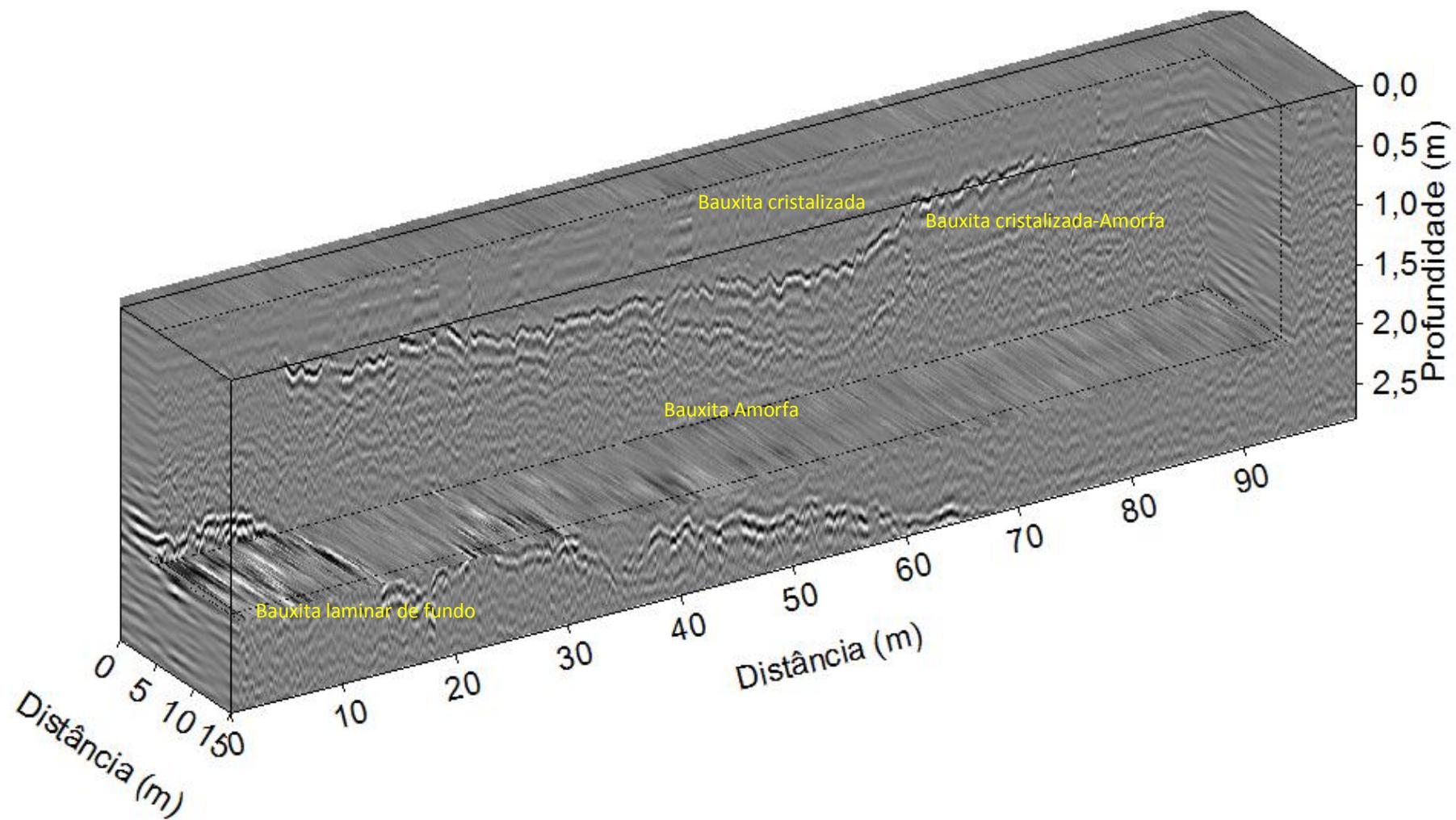


Figura 6.9 – Modelo Quase 3D elaborado com a malha de dados de GPR realizada com a antena de 400 MHz. Visualização do espalhamento da segunda interface.

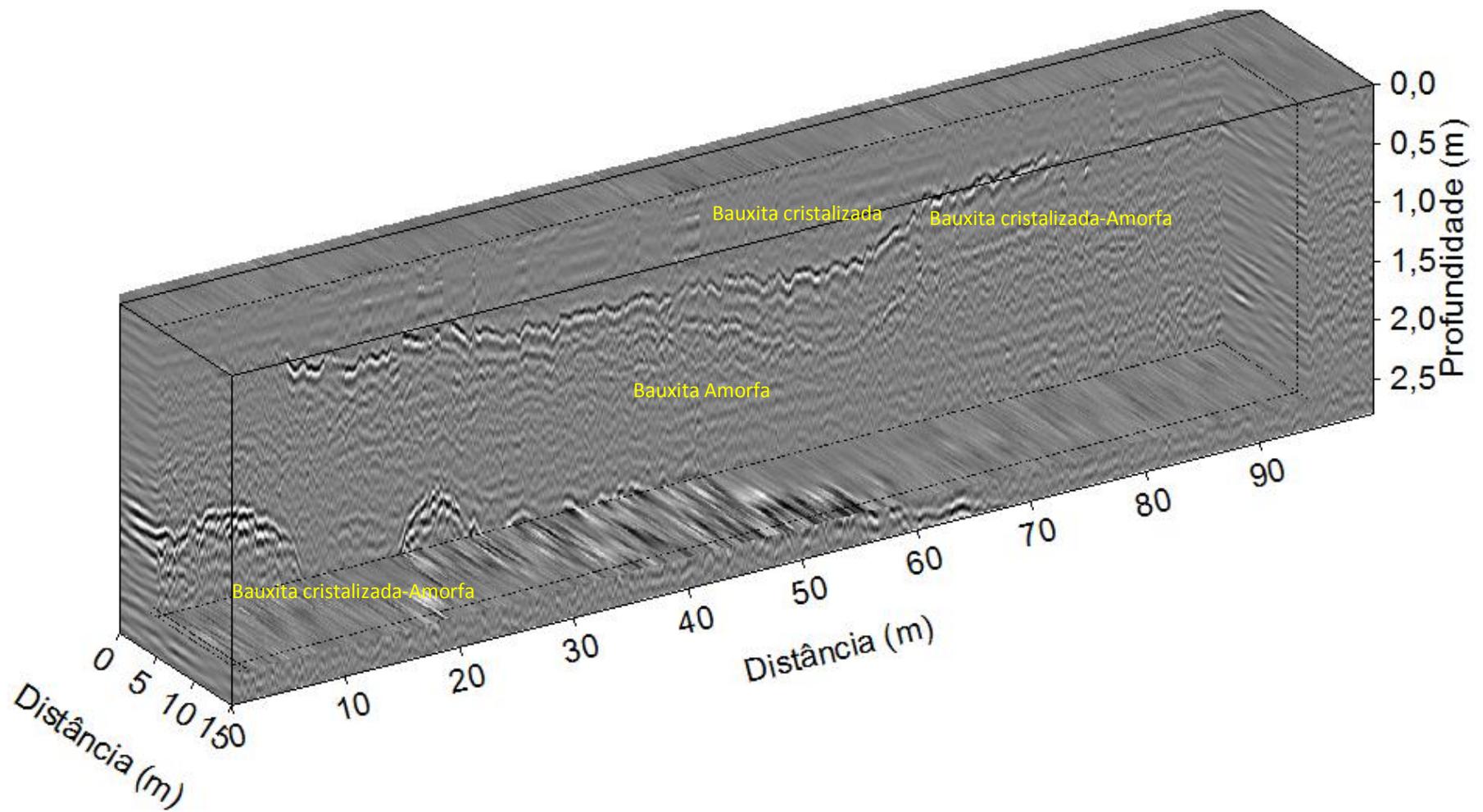


Figura 6.10 – Modelo Quase 3D elaborado com a malha de dados de GPR realizada com a antena de 400 MHz. Visualização do final da segunda interface.

Realizamos, também, perfis de GPR sobre cortes situados ao longo da rodovia PA 256 utilizando-se a antena bi-estática de 200 MHz. Foram realizados perfis sobre os cortes localizados nos quilômetros 16, 17 e 20. A sequência litológica do local situado ao redor da rodovia PA 256 se difere da sequência do interior da mina de Bauxita. Verificamos a presença de um capeamento argiloso medindo 1,5 m de espessura, certamente menos espesso do que o capeamento da mina. Para auxiliar a interpretação dos perfis realizados ao longo da rodovia, realizamos um perfil sobre o corte mais alto visto na rodovia (perfil de referência), localizado no Km 16, mostrado na figura 6.11. Segundo o geólogo Clóvis Maurity, a sequência litológica apresentada por este corte é composta por: Argila de Belterra, Laterita pisolítica, Bauxita nodular cristalizada, argila e Bauxita laminar de fundo.

O perfil 4 realizado sobre o corte localizado no Km 16, na direção Leste-Oeste, possui comprimento de 80 m. O perfil 5 foi realizado sobre o corte localizado no Km 17, na direção Noroeste-Sudeste com comprimento de 70 m e o perfil 6 foi realizado sobre o corte do Km 20, na direção Leste-Oeste e possui comprimento de 70 m. A figura 6.12 mostra o perfil 4 processado e interpretado que foi realizado sobre o corte do Km 16 da PA 256. Na profundidade de aproximadamente 1,5 m observamos uma reflexão que pode estar associada à interface entre a camada de Argila de Belterra (contendo pequenas concreções e pisólitos), e a Zona Laterita Pisolítica - Bauxita Nodular Cristalizada (que não aparece detalhada no radargrama), seguida de uma outra camada de Argila. Na profundidade de 2,5 m ocorrem duas fortes reflexões que estão associadas às estreitas faixas de Bauxita laminar de fundo, seguidas novamente de argila. A figura 6.13 mostra o perfil 5 processado e interpretado realizado sobre o corte localizado no Km 17. Nesse perfil visualizamos um refletor em forma de dobra que começa a uma profundidade de aproximadamente 1 m e atinge até os 2,5 m dessa profundidade que pode estar associado à dobra de Bauxita amorfa cristalizada, inserida numa camada de Argila de Belterra. A figura 6.14 mostra o perfil 6 processado e interpretado adquirido com uma medida feita sobre o corte localizado no Km 20. Esse perfil mostra fortes reflexões localizadas entre as profundidades de 1,5 m e 3 m que limitam as interfaces da camada de Argila de Belterra com a Laterita ferruginosa seguida de Bauxita amorfa cristalizada.

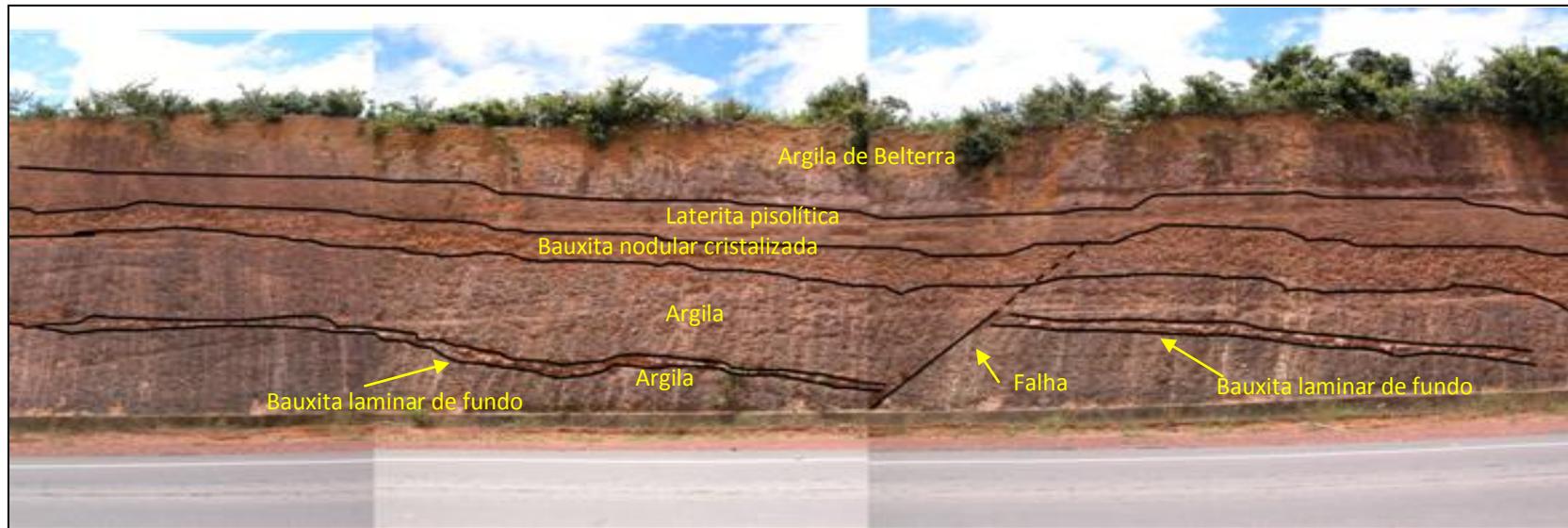


Figura 6.11 – Esquema do perfil litológico exposto no corte do Km 16 da PA 256 utilizado com referência para a interpretação dos demais perfis da estrada. Fornecida pelo Geólogo Clóvis Maurity.

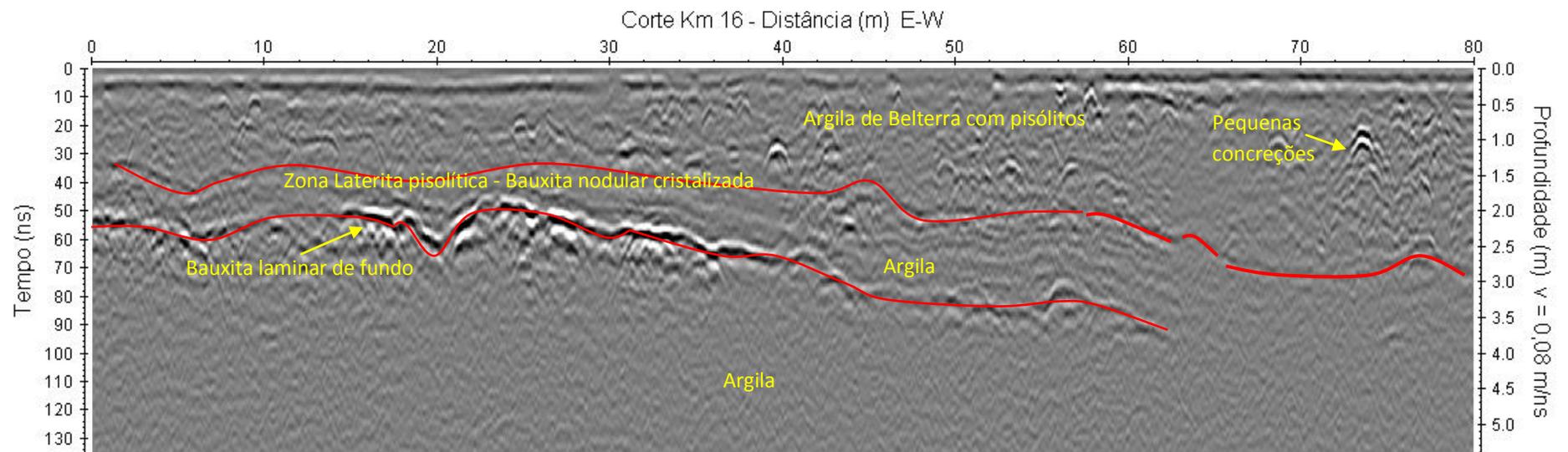


Figura 6.12 – Perfil 4 realizado com a antena de 200 MHz processado e interpretado.

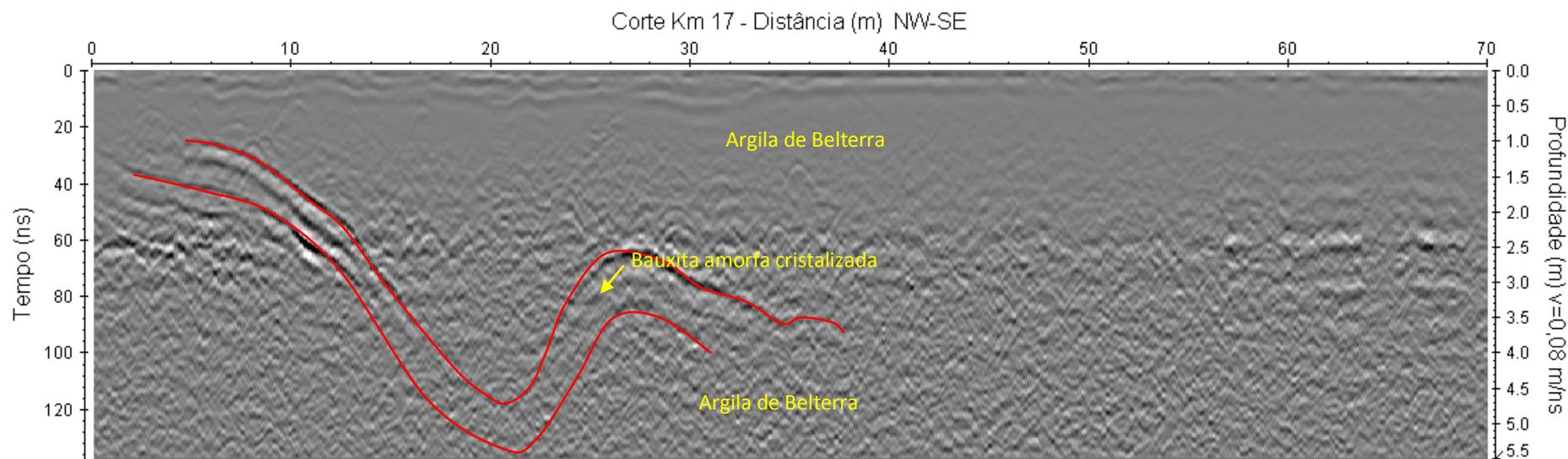


Figura 6.13 – Perfil 5 realizado com a antena de 200 MHz processado e interpretado.

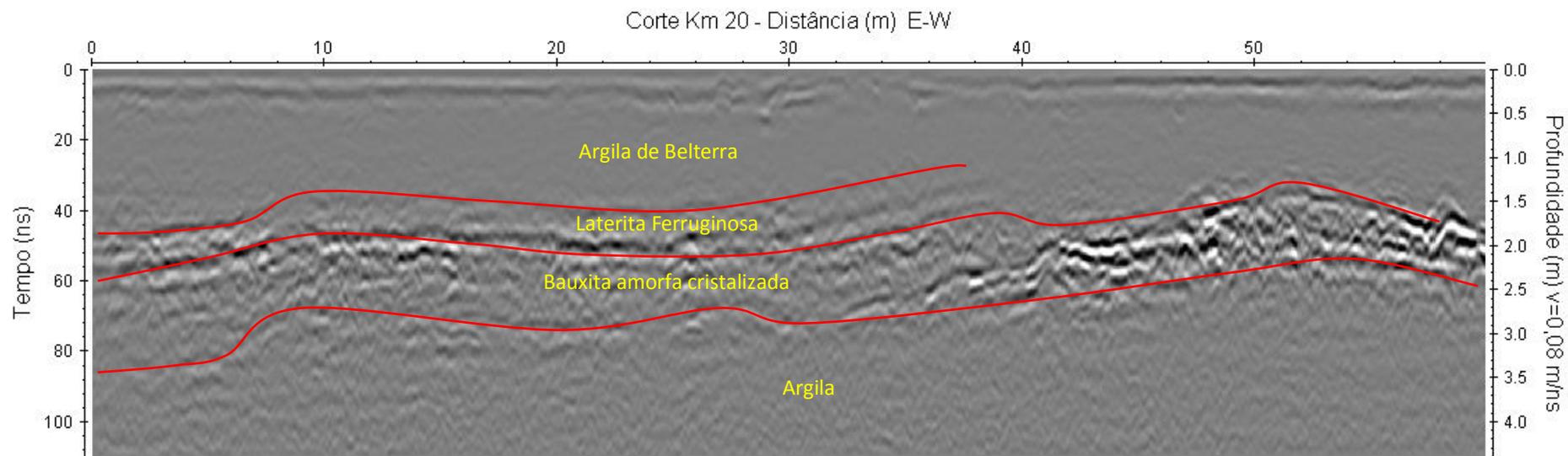


Figura 6.14 – Perfil 6 realizado com a antena de 200 MHz processado e interpretado.

## 6.2 ELETORRESISTIVIDADE NA MINA DE BAUXITA

Os levantamentos de GPR no interior da mina de Bauxita, sobre o capeamento de Argila de Belterra, cuja espessura chega à aproximadamente 12 m, não foram bem sucedidos devido à condutividade desse meio, o que provocou a atenuação da onda, não atingindo assim a zona mineralizada. Então optamos por realizar medidas de Eletorresistividade sobre essa camada argilosa. Realizamos um imageamento elétrico e uma Sondagem elétrica vertical (SEV) com o intuito de fazermos uma correlação dessas medidas com o perfil litológico da área mostrado na figura 3.4 da seção 3.2.

A figura 6.15 mostra pseudoseções de resistividade aparente. A seção do modelo inverso de resistividade aparente mostra regiões de baixa resistividade aparente numa profundidade de aproximadamente 7 m e até a marcação de 45 m, com valores entre 200 e 600 Ohm.m, que provavelmente está associada à condutividade do capeamento de Argila de Belterra. A partir da profundidade de aproximadamente 9 m esses valores de resistividade variam para cerca de 1000 Ohm.m à 4000 Ohm.m o que indica que o sinal começa à penetrar a zona mineralizada, que provavelmente indica ser a camada de Laterita Ferruginosa. Entre as profundidades de 10 m á 14 m os valores de resistividade variam mais ainda para cerca de 31000 Ohm.m à 84000 Ohm.m, o que indica ser a zona de minério de Bauxita. A figura 6.16 mostra a curva de resistividade aparente adquirida com a Sondagem Elétrica Vertical. Correlacionando a curva de resistividade aparente (à esquerda da figura), com o gráfico da profundidade em função da resistividade (à direita da figura) e com o modelo geológico de camadas, verifica-se que o valor de resistividade de aproximadamente 70 Ohm.m permanece constante até a profundidade cerca de 8 m, indicando o capeamento de Argila de Belterra. Após isso, o valor da resistividade sofre um acréscimo para cerca de 355 Ohm.m, indicando provavelmente a transição do capeamento de argila para a zona mineralizada. Após esta zona o valor de resistividade sofre um ligeiro decréscimo para cerca de 217 Ohm.m indicando, possivelmente, a presença de argila nessa zona mineralizada.

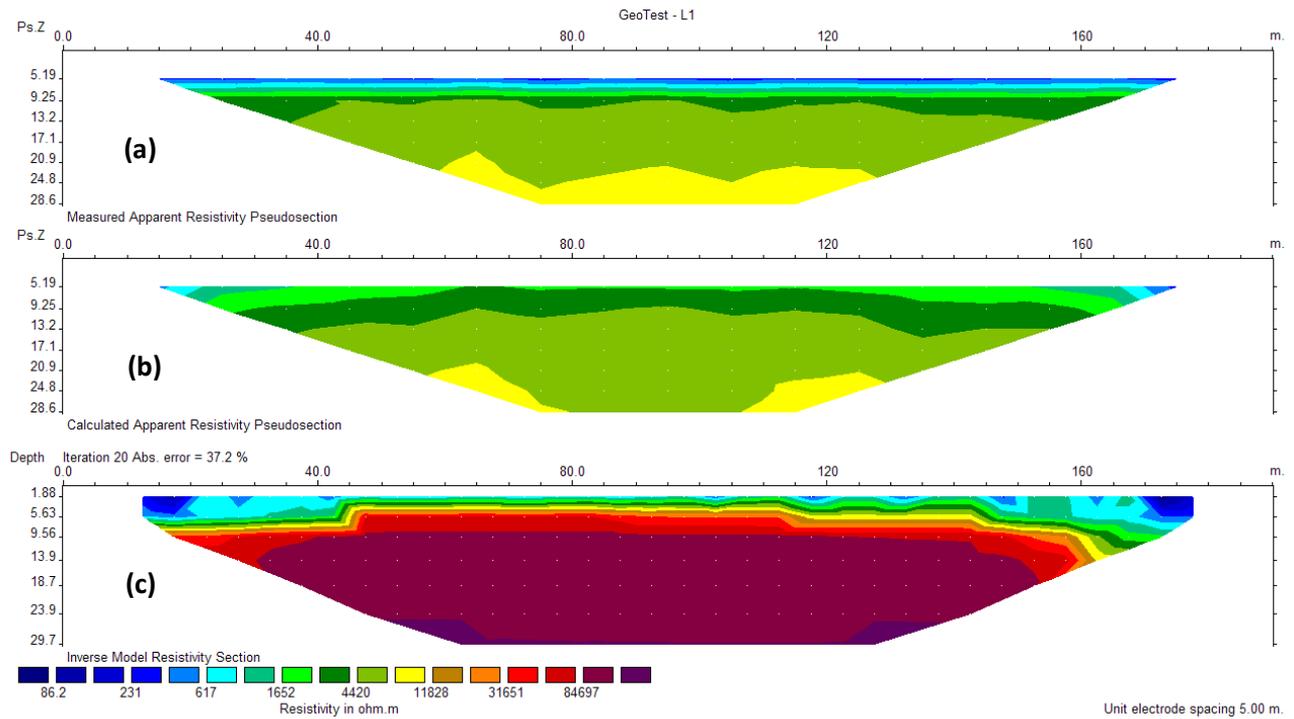


Figura 6.15 – Pseudoseção de resistividade aparente resultante do imageamento elétrico realizado sobre o capeamento de Argila de Belterra. (a) Pseudosecção de resistividade aparente medida. (b) Pseudosecção de resistividade aparente calculada. (c) Secção modelo inverso de resistividade aparente.

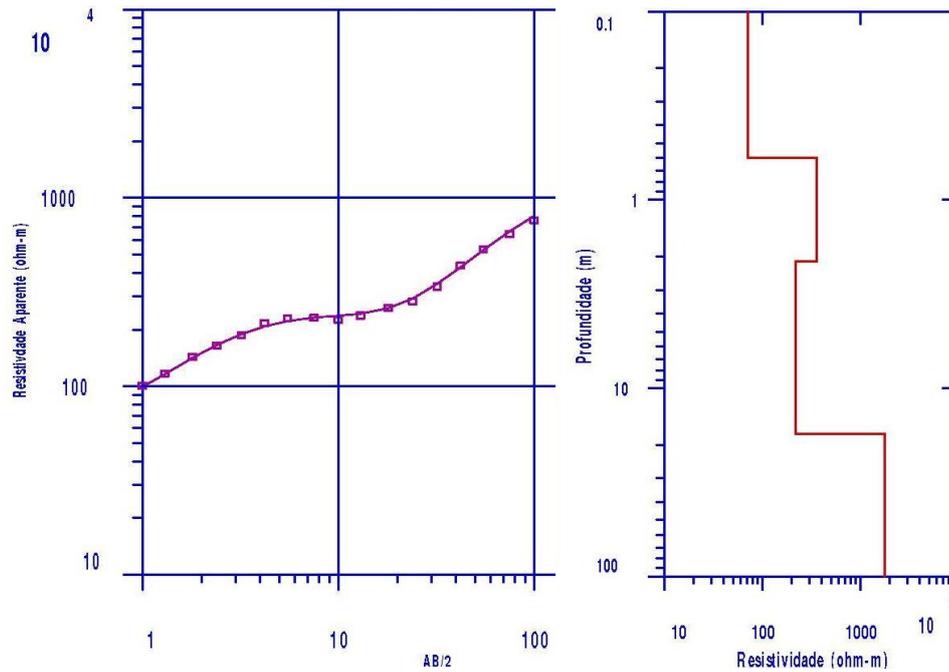


Figura 6.16 – Curva de resistividade aparente adquirida com a Sondagem Elétrica Vertical sobre o capeamento de Argila de Belterra. À direita, aspecto de variação de resistividade elétrica com a profundidade.

Tabela 6.1 - Modelo Geoelétrico de camadas.

L #	RESISTIVITY (ohm-m)	THICKNESS (meters)	ELEVATION (meters)
1	70.46	0.597	-0.597
2	355.1	1.52	-2.12
3	217.2	15.39	-17.51
4	1771.0		-17.51

### 6.3 GPR PARA GOETHITA

As medidas de GPR para mapear o depósito de Goethita foram realizadas no interior de uma fazenda localizada na BR-153, no trecho entre os Km 29 e Km 31, de Xambioá para Vanderlândia, Estado do Tocantins.

Antes de realizarmos as medidas de GPR, realizamos, previamente, testes em um local próximo à fazenda. Nesses testes realizamos uma antena bi-estática não-blindada de 80 MHz e outra bi-estática blindada de 200 MHz. O objetivo em realizarmos medidas com as antenas de 80 MHz e de 200 MHz foi verificarmos a espessura máxima da zona mineralizada e também comparar a resolução, na obtenção dos dados, para depois realizarmos medidas com maior segurança de que essa zona mineralizada fosse completamente mapeada e com uma boa resolução. Após os testes realizamos medidas no interior da fazenda com perfis de 100 m subsequentes numa linha na direção Norte-Sul paralelamente a uma cerca de arame.

Como citado na seção 3.4, a litologia da área investigada é formada por sedimentos recentes, Argilito siltoso, Ironstone oolítico (Goethita), Argilito siltoso contendo oxihidróxido de ferro e Conglomerado, seguidos de Xisto típico da Formação Xambioá e Quartizito da Formação Morro do Campo. Localmente a litologia da área é composta de camadas de Goethita seguida de Argilito Siltoso, que repousam sobre um embasamento de Granito que, na região, é comum o seu afloramento.

A figura 6.25 mostra o esquema de posicionamento dos perfis de GPR no interior da fazenda.



Figura 6.17 – Esquema de localização dos perfis de GPR no interior da fazenda após os testes.

Com a antena bi-estática não-blindada de 80 MHz e com uma janela de tempo de 500 ns, realizamos um perfil de 100 m na direção Norte-Sul, ao longo uma linha, passando sobre uma ponte de madeira que sob a qual passa um riacho. O perfil 7 processado mostrado na figura 6.18 mostra que a medida atingiu uma profundidade de 14 m e como era esperada, a resolução não foi bem satisfatória. Com esse perfil é possível visualizar a espessura máxima da zona mineralizada chegando a aproximadamente 5 m. Esse perfil mostra uma reflexão

entre as marcações de 25 m e 30 m que está associada à presença de uma ponte de madeira sobre a qual a antena passou. O perfil mostra ainda uma reflexão que provavelmente pode estar associada à interface entre a camada de Goethita e de um material condutivo que pode ser o Argilito Siltoso. Essa reflexão tem seu topo a uma profundidade de aproximadamente 1 m e estende-se até os 5 m de profundidade. Uma reflexão descontínua é visualizada a uma profundidade de aproximadamente 6 m estendendo-se até os 10 m que pode estar associada à interface Argilito Siltoso-Granito (Figura 6.19). Na sequência dos testes, realizamos mais dois perfis agora com a antena bi-estática blindada de 200 MHz com uma janela de tempo de 140 ns. O primeiro perfil com a antena de 200 MHz corresponde à repetição do perfil realizado com a antena de 80 MHz seguido de outro perfil de 100 m. O perfil 8 e o perfil 9 mostrados nas figuras 6.20 e 6.22, adquiridos com essa antena (de 200 MHz), exibem mais detalhadamente as reflexões visualizadas no perfil adquirido com a antena de 80 MHz, como era esperado. As medidas atingiram uma profundidade de 4 m e mostram com mais clareza a provável interface Goethita- Argilito Siltoso (Figuras 6.21 e 6.22).

Após os testes decidimos aumentar a janela de tempo para 150 ns para antena de 200 MHz, para as medidas realizadas no interior da fazenda, para que não houvessem riscos de perdas no imageamento da zona mineralizada. Os perfis 10 ao 14, foram realizados no interior da fazenda. A figura 6.23 mostra o perfil 10 processado e interpretado que possui uma forte reflexão que atinge uma profundidade de aproximadamente 5 m e que provavelmente está associada à Goethita. Entre as marcações de 50 m e 100 m, e numa profundidade que varia entre 1m e 4 m, observamos uma lente de material condutivo que pode estar associado ao Argilito Siltoso que se encontra após da camada de Goethita. O perfil 11 mostrado na figura 6.24 mostra uma forte reflexão que se inicia atingindo uma espessura de 4,5 m e que sofre um decréscimo atingindo, na marcação de 100 m, uma espessura de 1 m. Essa reflexão pode estar associada à camada de Goethita e, em sua base, encontra-se provavelmente uma camada de material condutivo que pode ser, também, o Argilito Siltoso. A figura 6.25 mostra o perfil 12 processado e interpretado que é sequência do perfil 11. Esse perfil mostra uma forte reflexão cuja espessura segue com 2,5 m até a marcação de 14 m e sofre um estreitamento para 1 m até a marcação de 44 m. Após essa marcação, a espessura vai aumentando até atingir 4,5 m na marcação dos 100 m. Essa reflexão pode estar associada à camada de Goethita e em sua base encontra-se uma camada provavelmente de material condutivo que pode ser, ainda, o Argilito Siltoso. Os perfis 13 e 14 processados e interpretados mostrados, respectivamente, nas figuras nas figuras 6.26 e 6.27, são consecutivos. Estes perfis exibem uma forte reflexão com espessura e profundidade de

aproximadamente 1 m. Essas reflexões, que podem estar associadas à Goethita, encontram-se entre duas camadas de material condutivo que indica ser, provavelmente, o Argilito Siltoso.

Um ponto bastante curioso e comum a todos os perfis relacionados ao mapeamento de camadas de Goethita é o fato de na provável camada de Argilito Siltoso apresentar um aspecto de atenuação da onda de radar. Isto pode estar relacionado ao fato de essa rocha apresentar, em sua composição, a argila que é um material condutivo, o que provoca atenuação dessa onda de radar.

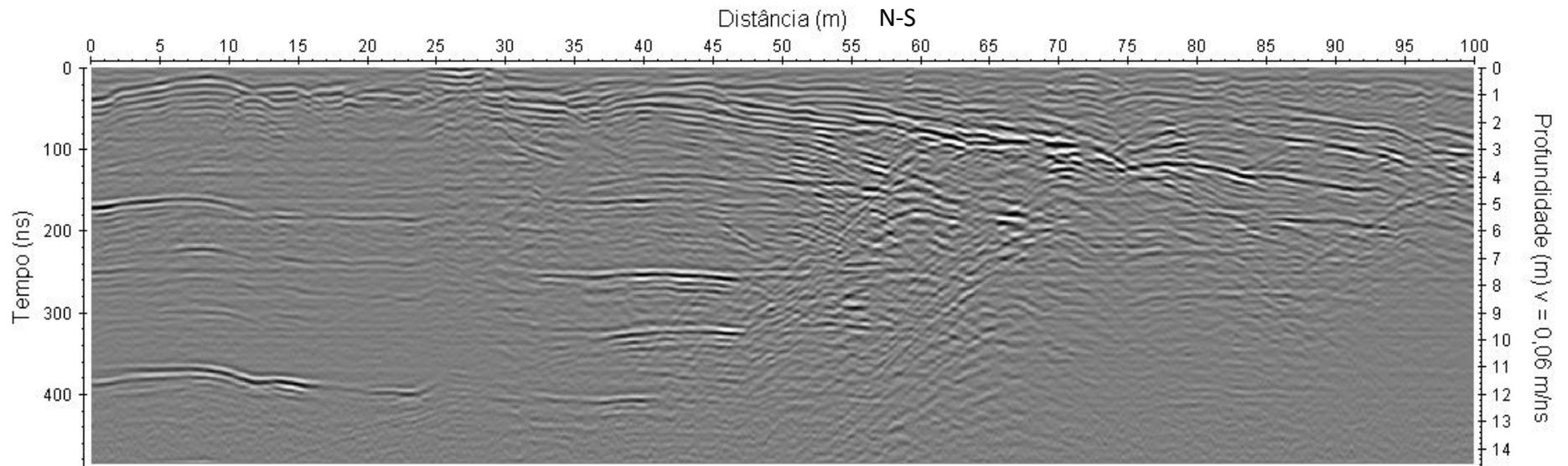


Figura 6.18 – Perfil 7 adquirido com a antena de 80 MHz processado.

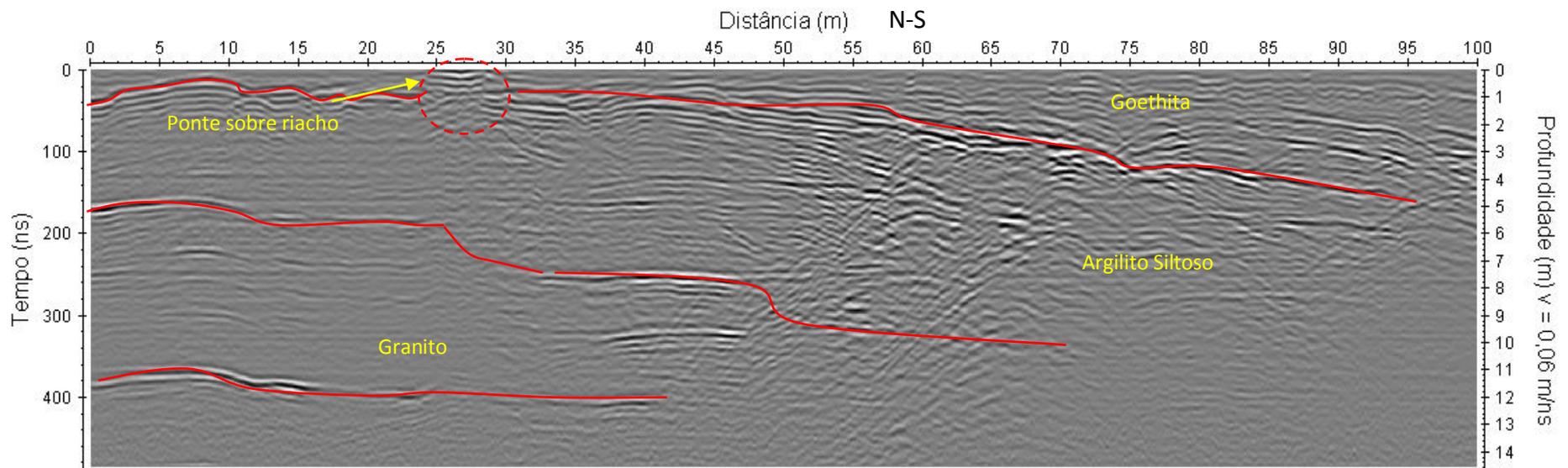


Figura 6.19 – Perfil 7 adquirido com a antena de 80 MHz processado e interpretado.

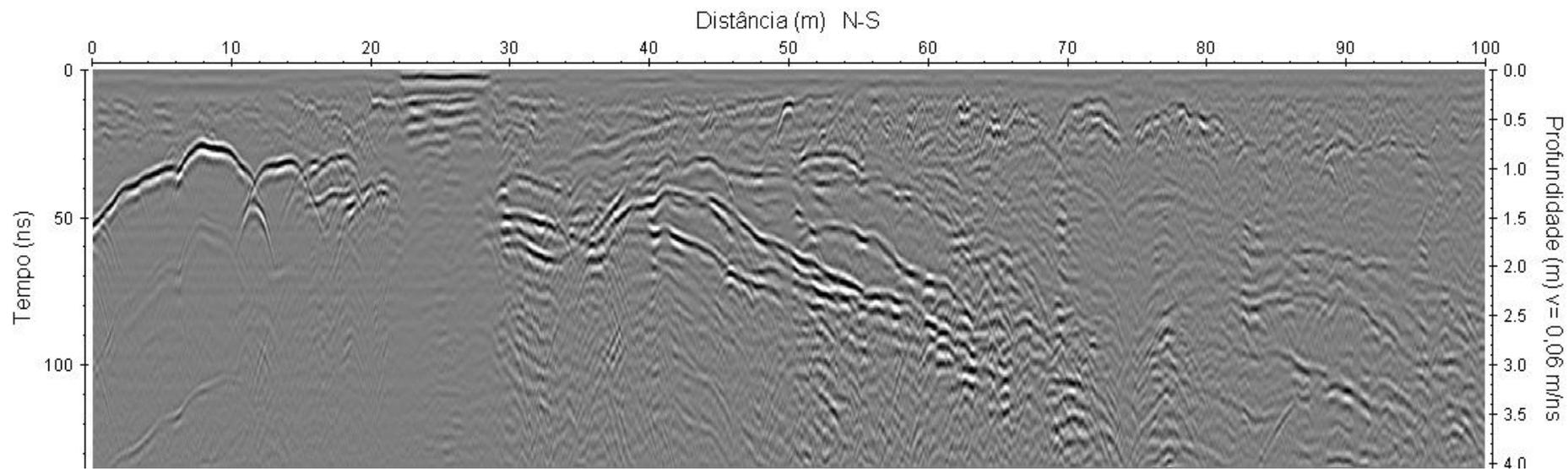


Figura 6.20 – Perfil 8 adquirido com a antena de 200 MHz processado.

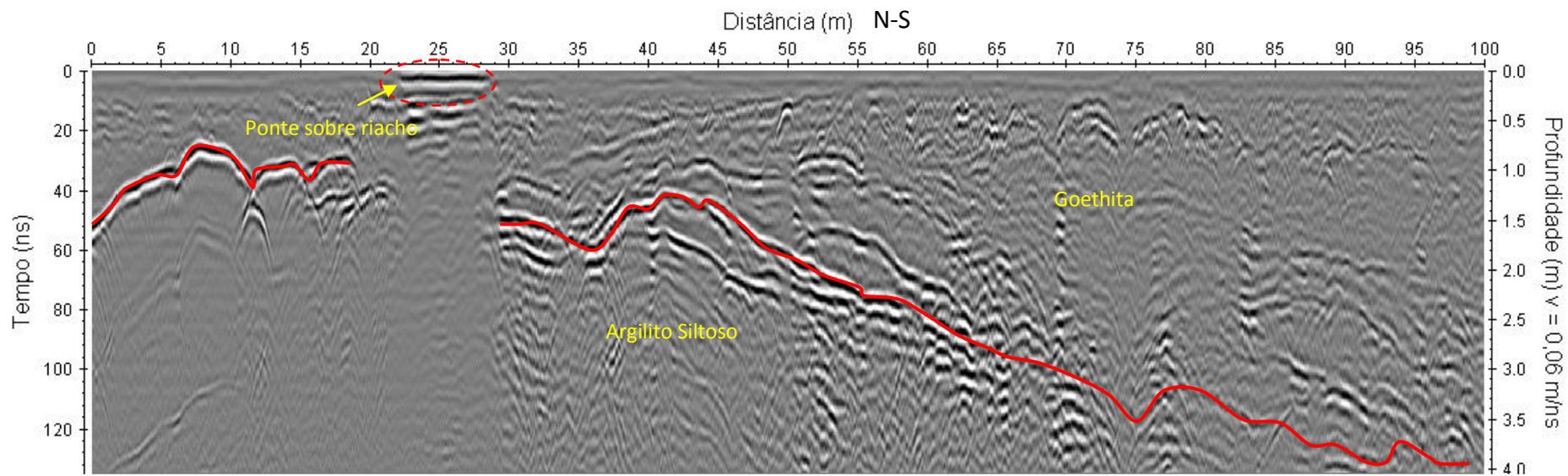


Figura 6.21 – Perfil 8 adquirido com a antena de 200 MHz processado e interpretado.

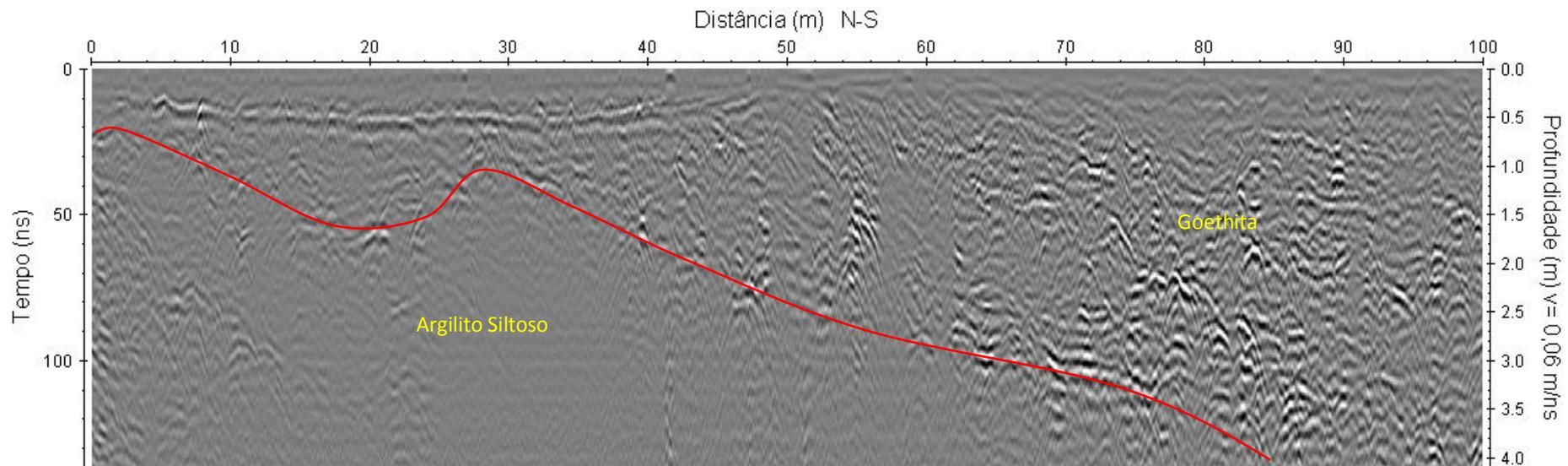


Figura 6.22 – Perfil 9 adquirido com a antena de 200 MHz processado e interpretado.

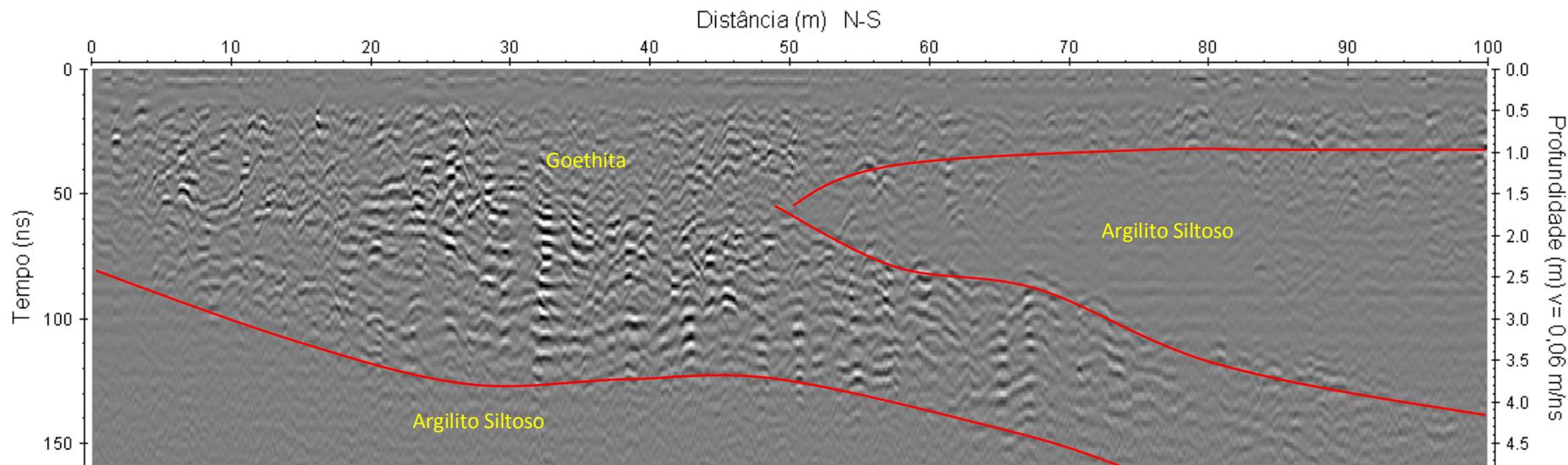


Figura 6.23 – Perfil 10 adquirido com a antena de 200 MHz processado e interpretado.

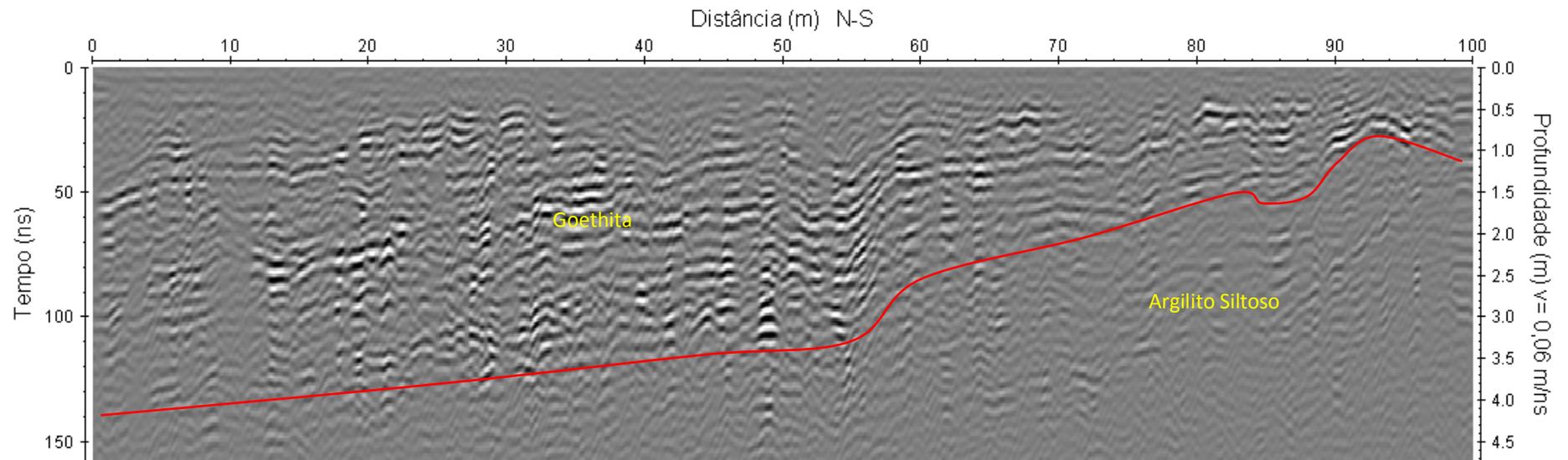


Figura 6.24 – Perfil 11 adquirido com a antena de 200 MHz processado e interpretado.

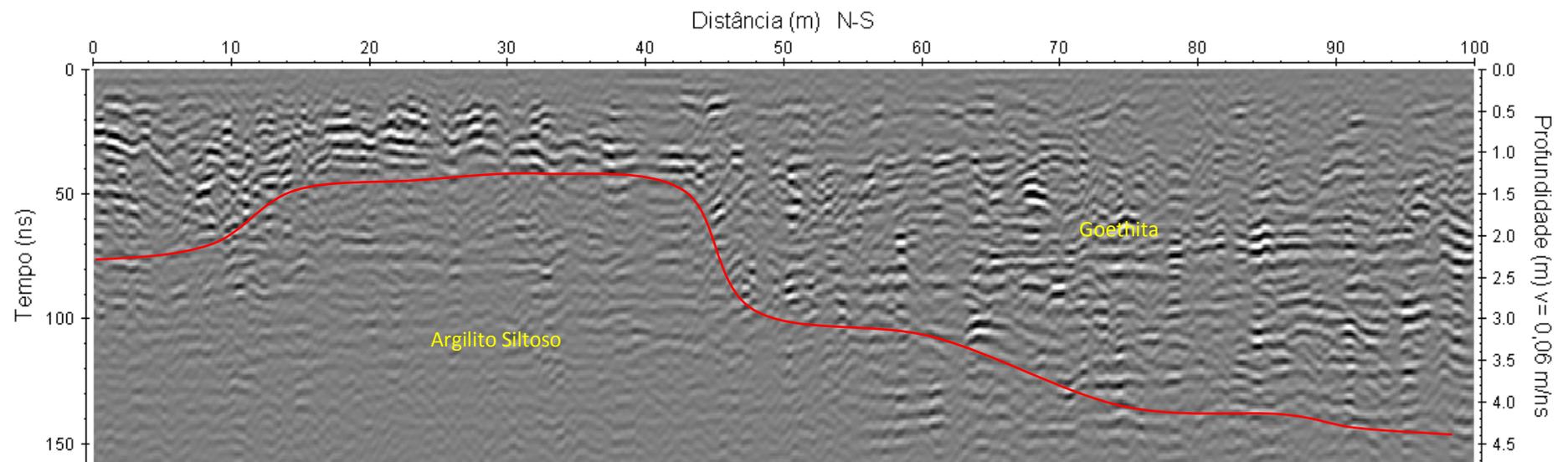


Figura 6.25 – Perfil 12 adquirido com a antena de 200 MHz processado e interpretado.

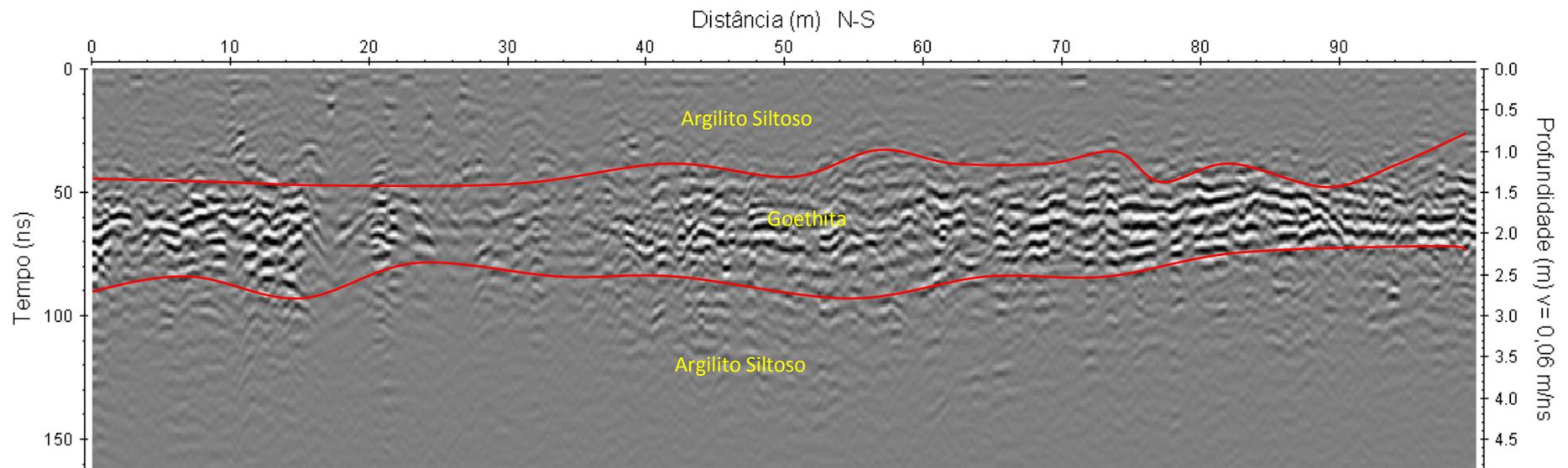


Figura 6.26 – Perfil 13 adquirido com a antena de 200 MHz processado e interpretado.

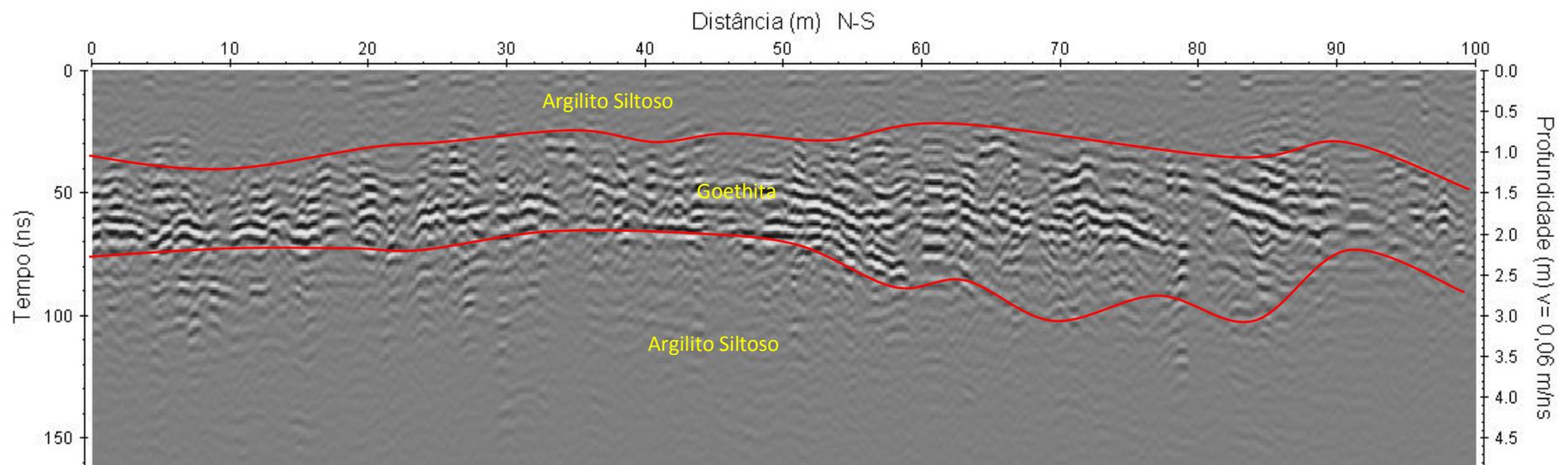


Figura 6.27 – Perfil 14 adquirido com a antena de 200 MHz processado e interpretado.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com a utilização do método GPR para o mapeamento de camadas em depósitos de Bauxita e de Goethita, foi obtida uma boa resposta no que diz respeito à profundidade alcançada e à caracterização de interfaces entre camadas. A aquisição de dados foi bem sucedida também em relação à rapidez e praticidade no levantamento de campo, uma vez que dispusemos de uma antena na qual já são acopladas a antena transmissora (Tx) e a receptora (Rx), desse modo, necessitando de um número mínimo de operadores.

Com a utilização da antena blindada de 200 MHz, na mina de Bauxita, não foi possível obter informações sobre a zona do minério no local onde havia capeamento argiloso de espessura aproximada de 12 m, devido à atenuação da onda eletromagnética transmitida pelo GPR. Já os levantamentos realizados sobre a zona mineralizada (sem o capeamento de argila) foram muito bem sucedidos tanto com a antena blindada de 200 MHz quanto com a antena de 400 MHz, no que diz respeito à caracterização de refletores que podem estar associados à interfaces entre camadas. As medidas realizadas sobre essa zona mineralizada foram muito importantes, pois tornaram possível a visualização, em detalhes, das ondulações das camadas o que possibilita a redução de perdas durante a lavra do minério.

As medidas de resistividade realizadas sobre o capeamento argiloso da mina de Bauxita mostraram variações nos valores de resistividade elétrica que caracterizaram a distinção do capeamento argiloso e da zona mineralizada. As pseudoseções de resistividade e a SEV não mostraram bons resultados em relação ao detalhamento de camadas da zona mineralizada. A aplicação do método GPR mostrou-se satisfatória no que diz respeito ao mapeamento das camadas que compõem o depósito de Bauxita. As camadas foram bem caracterizadas no radargrama, o que nos possibilitou estimar as espessuras e comprovar suas ondulações conforme as informações à priori, fornecidas por furos de sondagem. A correlação entre as seções de GPR obtidas e o perfil litológico da área estudada foi obtida satisfatoriamente. Os levantamentos realizados no interior da mina de Bauxita, e os levantamentos realizados nos cortes expostos ao longo da rodovia PA 256 tornaram possível a associação da sequência de camadas obtidas no radargrama com a do perfil litológico. Com os dados de GPR que obtivemos, concluímos que é possível a utilização desse método, para a prospecção mineral de Bauxita laterítica.

Com a utilização do método GPR no mapeamento de camadas em depósitos de Goethita, assim como no caso da Bauxita, foi obtida uma boa resposta no que diz respeito à profundidade alcançada e à caracterização de refletores que podem estar relacionadas às interfaces entre camadas. A aquisição de dados com a antena bi-estática não-blindada de 80 MHz foi bem sucedida em relação à profundidade alcançada o que permitiu a verificação da espessura máxima da zona mineralizada, porém em relação à resolução dos dados, o resultado não foi muito satisfatório, o que já era esperado. Já com a antena blindada bi-estática de 200 MHz, a aquisição de dados foi melhor sucedida em relação à resolução. Não houveram complicações nos levantamentos com o método GPR, pois a geologia dessa região é bastante favorável à utilização desse método, não havendo capeamento argiloso antecedendo a zona mineralizada. Os contrastes entre as camadas de Goethita e de Argilito Siltoso foram razoavelmente bem caracterizadas no radargrama, o que nos possibilitou estimar as suas espessuras. Com a utilização da antena blindada de 200 MHz, nos levantamentos realizados no interior da fazenda, não foi possível visualizar o embasamento de Granito. Já no local onde foram realizados testes com a antena de 80 MHz, foi possível a possível visualização desse embasamento. A utilização da antena blindada de 200 MHz foi suficiente na pesquisa, pois o interesse maior foi caracterizar a zona mineralizada de Goethita. Com os dados que obtivemos, concluímos que também é possível a utilização do método GPR, para a prospecção mineral de Goethita.

As medidas de GPR só se mostraram satisfatórias em regiões onde não havia capeamento espesso de argila. Seria interessante utilizar outros métodos para o mapeamento de camadas em depósitos de Bauxita e de Goethita, para que se pudesse verificar a viabilidade desses métodos para a prospecção desses minérios.

## REFERÊNCIAS

- AMARO, G. J. L. **Ironstones da base da Formação Pimenteiras, borda Noroeste da Bacia do Parnaíba, região Xambioá-Colinas do Tocantins**. 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 2011.
- 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. 256 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- Companhia de Produção e Recursos Minerais (CPRM). **Geologia e recursos minerais do estado do Pará**. Belém, Ministério de Minas e Energia, 2008. 328 p.
- DANIELS, D. J. **Surface penetrating radar**. Londres: The Institution of Electrical Engineers, 1996. 300 p.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, n. 37, p.531-551. 1989.
- EVANS, Anthony M. **Ore geology and industrial minerals** - an introduction. 3<sup>rd</sup>. Ed. New York : [s.n.]. Blackwell Science,1993. Capítulo 19, p. 262-264.
- GEOTOMO SOFTWARE. **Geoelectrical imaging 2D & 3D**. Disponível em: <[www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com)>. Acesso em: 20 jul. 2010.
- GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS, INC. (GSSI) **Manual do terraSIRch SIR system-3000**. North Salem, 2003. 71 p. [S.l.:s.n.]
- INDA JUNIOR., A. V. **Caracterização de goethita e hematita em solos poligenéticos**. 2002. 123 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo/UFRGS, Porto Alegre, 2002.
- JENSEN, M.L.; BATEMAN, A.M. **Economic mineral deposits**. 3rd. Ed. New York: John Wiley, 1979. Capítulo 19, p. 378-385.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. São Paulo: Oficina de textos, 2009. 438 p.
- KOTSCHOUBEY B.; CALAF J.M.C.; LOBATO A.C.C.; LEITE A.S. Azevedo C.H.D. Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, noroeste da bacia do Grajaú, nordeste do Pará/ oeste do Maranhão. In: MARINI O.J., QUEIROZ E.T., RAMOS B.V. (Eds.) **Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia**. Brasília, DNPMCT/ Mineral-ADIMB, p. 691-782. 2005.
- LUIZ, J. G.; SILVA, M. C. S. **Geofísica de prospecção**. Belém: Universidade Federal do Pará. Cejup, 1995. 311 p.
- LUIZ, J. G. **Notas de aulas sobre o método Georadar**. Belém: Universidade Federal do Pará, 1998. 8p.

McNEILL, J. D. **Electrical conductivity of soils and rocks. Geonics Limited**, [S.l.: s.n.], 1980. 22 p. (Technical Note TN-5).

VALETON, Ida. **Bauxites - developments in soil science I**. New York, 1972. 226 p., Capítulo I (p.1-2).

WARD, S.H.; HOHMANN, G.W. Electromagnetic theory for geophysical applications. In: NABIGHIAN, M.N. (Ed.) **Electromagnetic methods in applied geophysics -Theory**, p. 131-311, Society of Exploration Geophysics. 1987.