



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Calvin Cesar Ferreira

**Trabalho Final de Curso
(Bacharelado em Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
2019



UFRJ

Calvin Cesar Ferreira

**PERFILAGEM GEOFÍSICA EM FUROS DE SONDA NO ENTORNO DE
CAVIDADES FERRÍFERAS, CARAJÁS-PA.**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Marco Antonio da Silva Braga -
UFRJ

Coorientadora: Maria Filipa Perez da Gama -
UFRJ

Rio de Janeiro

2019

Ferreira, Calvin Cesar

Perfilagem geofísica em furos de sonda no entorno de cavidades ferríferas, Carajás-PA/ Calvin Cesar Ferreira. -- 2019.

x, 77 f. : il. ; 31 cm.

Orientador: Marco Antonio da Silva Braga

Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Graduação em Geologia, 2019.

1. Geologia. 2. IGEO – Trabalho final de Curso. I. Braga, Marco Antonio da Silva. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Perfilagem geofísica em furos de sonda no entorno de cavidades ferríferas, Carajás-PA.

Calvin Cesar Ferreira

**PERFILAGEM GEOFÍSICA EM FUROS DE SONDA NO ENTORNO DE
CAVIDADES FERRÍFERAS, CARAJÁS-PA**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Marco Antonio da Silva Braga - UFRJ

Coorientador: Maria Filipa Perez da Gama- UFRJ

Trabalho Aprovado. Rio de Janeiro, 28 de maio de 2018:

Marco Antonio Braga

(Depto. de Geologia/IGEO/UFRJ)

Atlas Vasconcelos Correa Neto

(Depto. de Geologia/IGEO/UFRJ)

Marcelo Roberto Barbosa

(Vale S.A.)

Rio de Janeiro

2019

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais, Gladstone e Jandira, por investir na minha formação profissional e educação como cidadão. Ainda, aos meus irmãos (Caio, Marina e Melina) e meus pais, pelo suporte e pela fé em minha capacidade de construir este trabalho.

Sou grato a professora Kátia Mansur, por proporcionar minha primeira oportunidade como bolsista de pesquisa científica e extensão no projeto Geoparque Costões e Lagunas. Também aos colegas Daniel West, Tainá Paiva e tantos outros. Foi um período de aprendizado em Geologia, bem como sobre valores de ética e respeito no trabalho. Sei que as pessoas que conheci enquanto membro do projeto são colegas de profissão, mas também amigos pessoais.

Aos colegas do Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada (CPGA), pela estrutura física, pelo intercâmbio de experiências acadêmicas, profissionais e suporte na elaboração do presente trabalho. Os conselhos e ensinamentos aqui transmitidos serão levados adiante tanto em minha caminhada profissional quanto pessoal. Da equipe, agradeço em especial ao meu orientador, Marco Antonio da Silva Braga, e minha coorientadora, Maria Filipa Perez da Gama, pela oportunidade acadêmica e pela confiança em minha competência para realização deste trabalho.

A Vale S.A. pelo fomento à pesquisa ao financiar este projeto e por permitir a publicação destes dados.

Ao corpo docente e servidores do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Agradeço pelo conhecimento técnico, pelas longas conversas sobre vida profissional, pelo espaço físico, pelo suporte e pelas viagens de campo. Afinal de contas, foram muitos dias e horas em trânsito pelas estradas e longe de casa.

Aos amigos do “Showzins”, Caroline Almeida, turma dos “amigos do migué” (Gabriela Lopes, Gisele Rhis, Giovanni Picco, Felipe de Castro e Camilla Rodrigues) e demais amigos de graduação. Pelos showzinhos, churrasquinhos, madrugadas de músicas, conversas para reclamar da vida, pelas risadas e parceria em campo, pelas montagens incríveis no *photoshop*, pelos milagrosos resumos em véspera de prova e pela companhia nos lanches com esfiha em uma tarde ou outra.

Posso afirmar com toda a convicção de que houveram momentos difíceis no âmbito pessoal e acadêmico durante estes cinco anos de graduação. Mas, felizmente pude contar com a ajuda de todos vocês. Encerro minha trajetória na graduação com mais fé no meu potencial, gratidão aos que estiveram comigo e um desejo ainda maior por novos desafios profissionais.

Resumo

A cavidade N4E-0026 está localizada no complexo mineiro N4EN, na Serra dos Carajás – Estado do Pará. O empreendimento, sob responsabilidade da VALE, produz minério de ferro através da lavra e hematititos gerados pelo enriquecimento em ferro de formações ferríferas bandadas. Junto às rochas enriquecidas em ferro, na região de Carajás, ocorrem cavidades naturais subterrâneas. Estas estruturas foram desenvolvidas através de processos de dissolução de jaspilitos e hematititos. Comumente o teto das cavidades é sustentado pela canga, ou crosta laterítica, rocha gerada a partir do intemperismo do jaspilito e hematitito, bem como de rochas básicas também presentes na região. Tal aspecto se repete em boa parte das cavidades naturais de Carajás. De acordo com a legislação brasileira, as cavidades são patrimônio da União. Logo, há normas e restrições quanto ao uso e ocupação do solo de sítios que hospedam este atributo espeleológico. Para a mineração, o licenciamento em localidades assim está condicionado com a realização de pesquisa interdisciplinar, conforme explícito nas normas IN-02/2009 MMA e IN-02/2017 MMA. Até que estes estudos sejam concluídos, deve-se manter uma distância de 250 metros entre a cavidade e a operação mineira. Há então a necessidade de investir em estudos que aumentem o grau de conhecimento sobre as cavernas, bem como a confiança entre os órgãos licenciadores e mineradores. Em N4EN, o principal risco à integridade física das cavernas está no manuseio de explosivos para desmonte na lavra. A região próxima da cavidade N4E-0026 já passou por investigações tradicionais, tais como ensaios geotécnicos e mapeamento geológico-geotécnico. Para complementar o que se conhece sobre a estabilidade litoestrutural da cavidade foram utilizados métodos geofísicos. Entre os métodos geofísicos, foram utilizados a eletrorresistividade, métodos eletromagnéticos e perfilagem geofísica. O presente trabalho gerou resultados após análise dos dados de perfilagem geofísica e teve como objetivo identificar propriedades físicas (radioatividade natural e densidade) das rochas através dos furos de sondagem, integrar conclusões obtidas pelos outros métodos geofísicos e avaliar o desempenho da perfilagem dentro da investigação espeleológica. A investigação através da perfilagem foi bem-sucedida, conseguindo: reconhecer os contrastes entre as rochas do perfil laterítico, traçar padrões geofísicos típicos para estas rochas. Tem potencial para gerar novos dados a fim de complementar outras técnicas de investigação. Diante deste cenário positivo, é interessante utilizar a perfilagem para investigar regiões que possuem cavidades.

Abstract

The cavity N4E-0026 belongs to N4EN mining complex in Serra dos Carajás – Pará State. The mining pit is owned by Vale S.A. and exploits iron ore from hematitites. These rocks were generated during banded iron formation (locally jaspilites) enrichment processes. Along with iron enriched rocks, Carajás region has natural subsurface cavities. These structures were developed through dissolution processes in jaspelites and hematitites. Commonly the cavities's ceiling is sustained by lateritic crust, a type of rock generated by weathering of lithotypes such as jaspelite, hematitite and basic rocks. This attribute can be observed in most of the natural caves in Carajás. According to Brazilian law, cavities belongs to the State. So, there are rules and restrictions about using the soil in sites who hosts this speleological feature. To mining industry, the licensing in such sites depends on performing an interdisciplinary research, as oriented in two documents signed by Ministry of the Environment: IN-02/2009 and IN-02/2017. Until the accomplishment of this condition, a distance of 250 m must be maintained the cavity and mining operations. Therefore, there is a demand to invest research in order to increase knowledge about caves, as well as increase conficende between environmental authorities and mining companies. In N4EN the greatest risk to cavities physical integrity is in manipulation of explosives in the mining pit. The region nearby cavity N4E-0026 has already been investigated by traditional techniques, such as: geomechanical tests and geological-geotechnical mapping. In order to complement these studies about caves lithostructural stability, a combination of geophysical techniques was performed. The geophysical methods chosen in investigation were electrical method, electromagnetic method and well logging. This paper produced results after analysis of well logging data and its aim is: to identify instabilities accused by well logging, integrate conclusions obtained by other methods e evaluate the performance of well logging in speleological investigation. The performance of well logging technique succeeded in: recognizing contrasts between lithotypes from lateritic profile and delineate geophysical patterns for these rocks. It has potential to bring more information in order to complement other investigation techniques. Before such positive results, it is interesting to utilize well logging applied to research in sites who hosts cavities.

Lista de figuras

- Figura 1** - Gráfico com a participação de substâncias metálicas na produção mineral do país. Fonte: ANM, 2018. 1
- Figura 2** - Imagem de satélite, com a localização da cavidade N4E-0026. Fonte, Worldview, 2017. 3
- Figura 3** - Imagem de satélite da Serra dos Carajás, dividida em Serra Norte e Serra Sul. Retirado de: Barbosa, 2009. 4
- Figura 4** - A - Esquema ilustrando como funciona o efeito fotoelétrico; B - esquema ilustrando como funciona o efeito Compton; C - esquema ilustrando como funciona a interação produção de pares. Traduzido de: Serra, 1983. 8
- Figura 5** - Gráfico com a distribuição de ocorrência dos mecanismos de espalhamento da radiação gama, em função da energia da radiação gama versus número atômico (Z). Traduzido de: Ellis e Singer, 2007. 8
- Figura 6** - Esquema idealizando como funciona a aquisição de dados pela ferramenta gama-gama. 9
- Figura 7** - Ferramenta de perfilagem Slimline Densidade. Retirado de Weatherford, 2015. 10
- Figura 8** - Imagem de satélite da cava em N4EN, nas imediações da cavidade N4E 0026. Os pontos inscritos no quadrado representam a posição dos furos perfilados neste trabalho. As linhas em amarelo representam as seções geológicas. 12
- Figura 9** -- Interface dos dados brutos no software Microsoft Excel 2016. Em laranja: perfil caliper; em azul: perfil gama natural; em cinza: perfil gama-gama, com o valor de densidade corrigido. 13
- Figura 10** - software Oasis Montaj, com destaque para a ferramenta Striplog, utilizada para confeccionar os perfis integrados. 14
- Figura 11** -Exemplo de bancada encontrada em N4EN. Detalhar litologias..... 15
- Figura 12** - Exemplo de seção, ilustrando a diversidade litológica encontrada na face da bancada da mina onde foi executada a linha controle com aquisição dos dados de eletrorresistividade. Retirado de VALE, 2017 16

Figura 13 - Distribuição das províncias no Cráton Amazônico. Retirado de: Santos, 2003.....	18
Figura 14 - Mapa Geológico do Domínio Carajás. Adaptado de Tavares, 2015.	19
Figura 15 - Variedades de canga: A: crosta laterítica detrítica; B: crosta laterítica ferro-aluminosa. Adaptado de Barbosa, 2018.....	22
Figura 16 - Localização do depósito N4EN, distribuição das unidades geológicas e demais depósitos minerais da região. Adaptado de: Lobato, 2005 B.....	24
Figura 17 - Litotipos da Formação Carajás. A – Jaspilito com bandamento preservado; B – Jaspilito com bandamento alterado. Retirado de Pereira, 2009.....	25
Figura 18 - Corpos de hematita na região de N4EN. Em A, HD – hematita dura com estrutura laminar. Em B, HD – hematita dura com estrutura maciça. Adaptado de Pereira, 2009 e Silva <i>et al.</i> , 2014.....	25
Figura 19 - Modelo idealizado com as unidades de um perfil de alteração susceptível a gênese de uma cavidade, bem como as características de cada intervalo. Adaptado de Grimes e Spate, 2009.	28
Figura 20 - Síntese das etapas evolutivas da cobertura laterítica. Adaptado de Maurity e Kotschoubey, 1995.	29
Figura 21 - Padrões planimétricos observados nas cavernas de Carajás. Em A está representada uma câmara linear, B representa uma câmara irregular e C uma câmara mista. Adaptado de Dutra, 2013.	30
Figura 22 - Seção geológica construída durante o mapeamento de bancadas. Retirado de VALE, 2017.....	35
Figura 23 - Empilhamento com os litotipos que podem ser encontrados em cada intervalo, junto do valor mínimo para o índice Q (qualidade da rocha).	36
Figura 24 - Representação gráfica dos valores máximo e médio atingidos para o perfil gama natural em cada furo.	37
Figura 25 - Representação gráfica dos valores de máximo, mínimo e média atingidos para o perfil gama-gama em cada furo.....	38
Figura 26 - Representação gráfica dos valores de máximo, mínimo e média atingidos para o perfil caliper em cada furo.	39
Figura 27 - <i>Striplog</i> para do furo SN4-FD0069, com os três perfis integrados.	42
Figura 28 - <i>Striplog</i> para o furo SN4-FD0070, com os três perfis integrados.....	46

Figura 29 - Striplog para o furo SN4-FD00071, com os três perfis integrados. 50

Figura 30 - Comparação entre a seção elétrica interpretada e seção geológica feita durante o mapeamento de bancadas. 53

Figura 31 - Comparação entre a seção elétrica interpretada e a posição dos furos perfilados. 54

Figura 32 - Comparativo com a espessura das camadas segundo os dados de campo e padrões geofísicos. As curvas em roxo representam os padrões geofísicos. 57

Lista de Tabelas

- Tabela 1** - Síntese dos valores obtidos no perfil gama natural para os três furos. 37
- Tabela 2** - Síntese dos valores obtidos no perfil gama-gama para os três furos, após correções..... 38
- Tabela 3** - Síntese dos valores obtidos no perfil *caliper* para os três furos. 399
- Tabela 4** - Massa específica média para os hematititos. **Erro! Indicador não definido.**

Lista de Quadros

- Quadro 1** - Especificações técnicas da ferramenta Slimline Densidade. Traduzido de Weatherford, 2015..... 11
- Quadro 2** - Síntese dos procedimentos envolvidos em cada etapa de um estudo espeleológico. Retirado de: Ruckkys *et al.*, 2015 311
- Quadro 3** - Síntese do grau de relevância que pode ser dado para as cavidades. Retirado de: Ruckkys *et al.*, 2015..... 322
- Quadro 4** - Síntese das características geológicas e geomecânicas das fácies identificadas pelo mapeamento de bancada. 344
- Quadro 5** - Descrição do testemunho de sondagem, para o furo SN4-FD00069. 433
- Quadro 6** - Descrição do testemunho de sondagem, para o furo SN4-FD00070. 477
- Quadro 7** - Descrição do testemunho de sondagem, para o furo SN4-FD00071. 511

Sumário

1 Introdução	1
2 Localização e aspectos fisiográficos	3
3 Justificativa e objetivos	5
4 Descrição do método	6
4.1 Perfilagem Geofísica	6
4.2 Aquisição	10
4.3 Processamento e interpretação dos dados	13
5 Geologia Regional	17
5.1 Contexto geológico	17
5.2 Contexto estratigráfico	19
5.2.1 Mesoarqueano	20
5.2.2 Neoarqueano	20
5.2.3 Paleoproterozoico	21
5.2.4 Neoproterozoico	22
5.2.5 Mesozoico	22
5.2.6 Cenozoico	22
5.2.7 Contexto deposicional do Supergupo Itacaiúnas	23
5.3 Contexto estrutural	23
5.4 Comentários sobre a mineralização	24
6 Cavidades em Rochas Ferruginosas	27
6.1 Gênese e características gerais	27
6.2 Legislação	31
7 Resultados	34
7.1 Descrição das fácies identificadas pelo mapeamento de bancadas e ensaios geomecânicos	34

7.2 Análise dos perfis	37
7.2.1 Gama natural	37
7.2.2 Gama-gama	38
7.2.3 Caliper	39
7.3 Interpretação perfis integrados (<i>striplogs</i>)	40
7.3.1 Furo SN4-FD00069	40
7.3.2 Furo SN4-FD00070	44
7.3.3 Furo SN4-FD00071	48
7.4 Validação dos <i>striplogs</i>	52
8 Discussões	55
9 Conclusões	57
10 Referências	59

1 Introdução

A mineração caracteriza um setor estratégico na economia do país, em especial a produção de minério de ferro (figura 1). Atua gerando matéria prima para diversos segmentos da indústria. É essencial na fabricação de ligas metálicas, construção civil e indústria de fertilizantes, por exemplo. As localidades, em território nacional, que concentram a maior parte da produção de ferro são o Quadrilátero Ferrífero e a Província Mineral de Carajás.

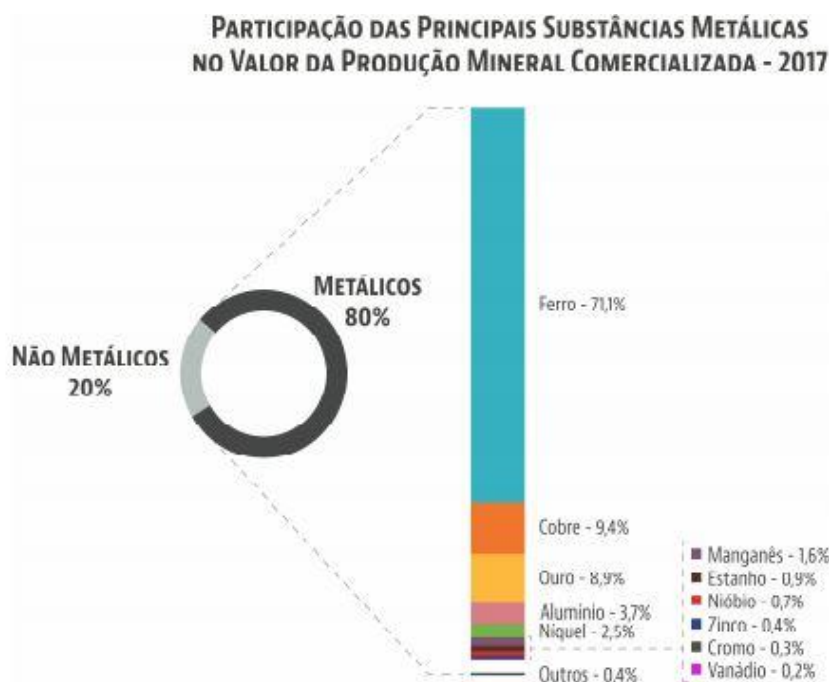


Figura 1 - Gráfico com a participação de substâncias metálicas na produção mineral do país.
Fonte: ANM, 2018.

O ferro em Carajás está hospedado em dois tipos de rochas, a saber: formações ferríferas bandadas, localmente chamadas de jaspilito, e hematítico. Ambas as litologias ocorrem na mina N4EN, sob responsabilidade da VALE. Opera a céu aberto e o uso de explosivos em processos de desmonte faz parte da rotina operacional. Este procedimento é essencial para a lavra, dentro da cadeia produtiva do minério de ferro.

Além da riqueza mineral, a região de Carajás destaca-se pela ocorrência de cavidades subterrâneas em rochas ferruginosas. Tradicionalmente, estudos espeleológicos afirmavam que o desenvolvimento de cavidades e demais feições cársticas era exclusivo de rochas carbonáticas. No entanto, o fator mais importante é a ocorrência de processos de dissolução. As cavidades são localidades com alto potencial para fomentar pesquisa científica interdisciplinar. Isto porque investigações espeleológicas envolvem profissionais como: geólogos, geógrafos, biólogos, arqueólogos e outros.

No entanto, a presença de cavidades próximas de empreendimentos mineiros pode tornar-se problemática, porque de acordo com a legislação nacional estas feições são patrimônio da União. E é vetada a prática de atividades que possam comprometer sua integridade, até que sejam cumpridas as orientações da IN-02/2009 MMA e IN-02/2017 MMA.

De acordo com critérios técnicos estabelecidos por essas normas, as cavidades são classificadas de acordo com seu grau de relevância. Assim, dependendo da relevância, a ocupação do solo em sítios que hospedem cavidades pode ser liberada ou não. Não havendo liberação, a legislação prevê medidas compensatórias e sanções legais caso a estrutura seja comprometida.

2 Localização e aspectos fisiográficos

O complexo mineiro de Carajás está localizado na Serra dos Carajás, Estado do Pará (figura 2), que forma um divisor de águas entre as bacias dos rios Tocantins-Araguaia (a leste) e Amazonas (a oeste). Territorialmente, engloba os municípios de: Marabá, Parauapebas, Eldorado dos Carajás e São Félix do Xingu (Teixeira e Lindenmayer, 2012). Seus limites são: a depressão de Rio Maria ao sul, a depressão de Bacajá ao norte, a depressão Goiana-Paraense a leste e a depressão do Xingu a oeste (Valentim e Olivito, 2011). A serra de Carajás apresenta-se compartimentada em Serra Sul e Serra Norte, onde se encontra a mina N4EN.

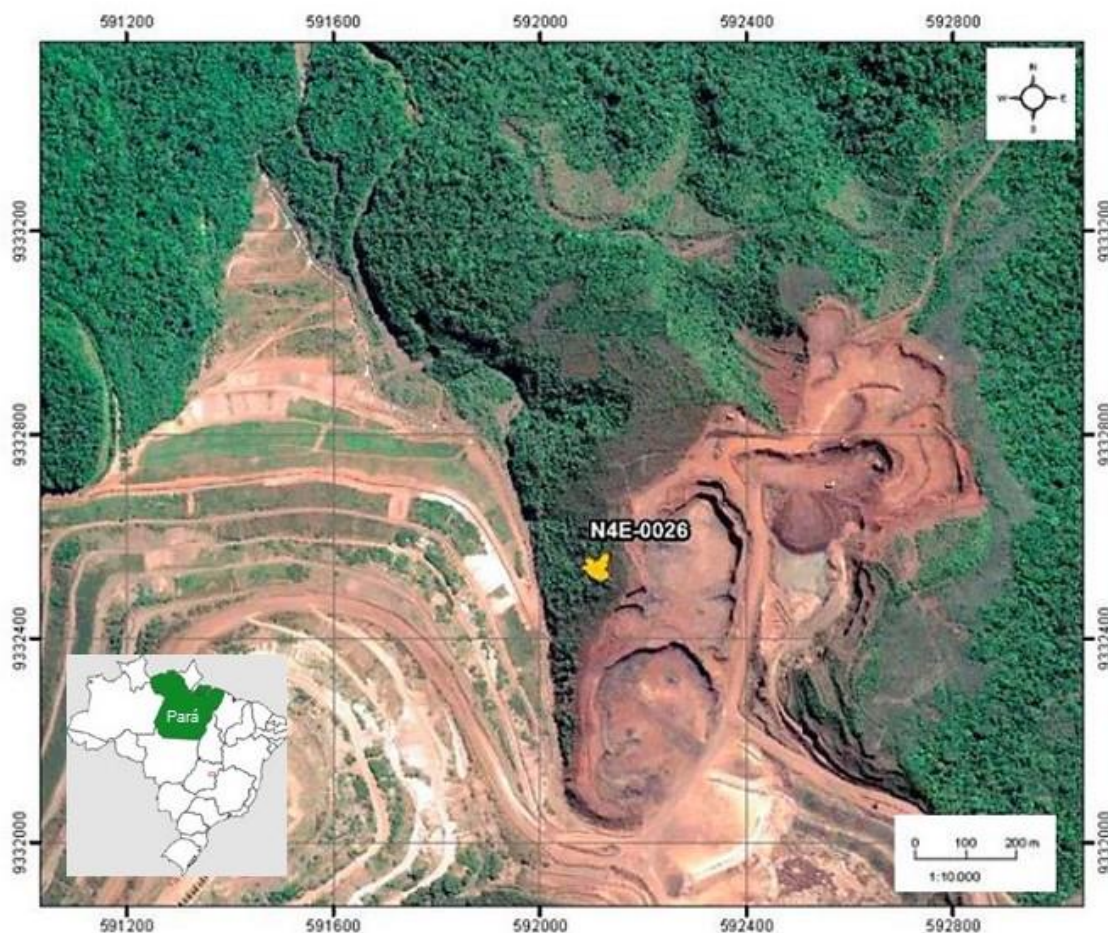


Figura 2 - Imagem de satélite, com a localização da cavidade N4E-0026. Fonte, Worldview, 2017.

O relevo de Serra Norte é marcado pelo alto grau de dissecação, gerando encostas abruptas e vales profundos (Valentim e Olivito, 2011), e é composto por 3 unidades geomorfológicas: sistemas de morros, regiões colinosas e serras (Araújo e Maia, 1991). O relevo de morros exibe feições que podem ser isoladas ou alinhadas, com média a alta declividade. Estas áreas atingem cotas de até 500 m, sustentadas por corpos de composição granitoide e gnáissica (Araújo e Maia, 1991). Os topos podem ter morfologia arredondada ou aplainada. O sistema colinoso tem as menores cotas topográficas, com máxima em 300 m e

mínima de 170 m (Araújo e Maia, 1991), e é marcado pela morfologia aplainada e declividade baixa.

As serras constituem áreas de maciço com extenso topo plano a ondulado, dando a morfologia de platô e com alta declividade (figura 3). Possuem cotas com amplitude média de 300 m ou por vezes ultrapassando 400 m, chegando a cotas reais de 700 m. Geralmente o litotipo que sustenta este relevo é canga laterítica ou formação ferrífera laterítica. Vale destacar que esta unidade hospeda cavernas e cavidades subterrâneas, intimamente associadas com a canga laterítica. Na área de N4EN, cavidades vêm sendo identificadas e investigadas, a fim de continuar a exploração de minério de ferro. A cavidade N4E-0026 está inserida na mina homônima e foi suprimida em fevereiro de 2018.

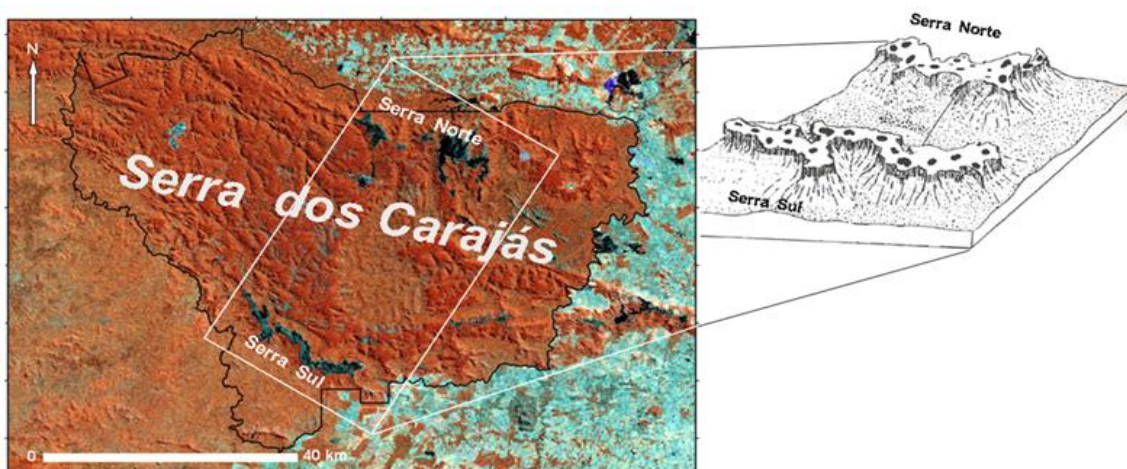


Figura 3 - Imagem de satélite da Serra dos Carajás, dividida em Serra Norte e Serra Sul. Retirado de: Barbosa, 2009.

As cidades mais próximas de N4EN são Parauapebas e Canaã dos Carajás, localizadas aproximadamente a 29 km e 61 km da mina, respectivamente. O acesso pode ser feito através de transporte aéreo (aeroporto de Parauapebas) ou pelas rodovias PA-275 e PA-160. Especialmente em Parauapebas, a atividade minerária ocupa posição de destaque na economia municipal e na história de sua construção.

3 Justificativa e objetivos

No complexo mineiro de Carajás o método de lavra é a céu aberto, que implica em desmonte com uso de explosivos. A cavidade N4E-0026, encontrava-se na mina de N4EN, sob responsabilidade da Vale.

Durante as atividades de pesquisa, exploração e exploração em Carajás, cavidades subterrâneas vêm continuamente sendo identificadas. Legalmente, cavidades são patrimônio da União, e, portanto, as localidades que possuem estas estruturas devem ser estudadas, antes que qualquer atividade se aproxime. A liberação está condicionada a realização de um estudo multidisciplinar a fim de classificar a relevância da cavidade.

A instrução normativa IN-02/2009 do MMA (Ministério do Meio Ambiente) define a metodologia para classificação do grau de relevância de cavidades. Além disso, dispõe sobre: áreas do conhecimento que devem ser contempladas, critérios para avaliação, sanções legais e medidas compensatórias. Para atender às exigências legais, iniciou-se o Projeto Cavidades, investindo em pesquisa com a finalidade de aprimorar o conhecimento sobre cavidades em rochas ferruginosas. Foram selecionadas cavidades para trabalhos de: geotecnia – através de sondagem, mapeamento de bancadas e ensaios *in situ* e *ex situ* – e geofísica rasa – métodos elétricos, eletromagnéticos (GPR-Ground Penetrating Radar) e perfilagem geofísica.

Esta pesquisa tem por objetivo a interpretação dos dados de perfilagem geofísica para caracterização petrofísica da região no entorno de cavidades ferríferas buscando correlacionar dados descritivos da sondagem e seus parâmetros geomecânicos. Assim, é esperado complementar pesquisas de avaliação da estabilidade estrutural das cavidades.

4 Descrição do método

4.1 Perfilagem Geofísica

A perfilagem geofísica consiste em um método de investigação direta, que conta com instrumentação diversa. É capaz de analisar o meio como um todo, desde corpos rochosos até estruturas geológicas e verificar a presença de fluidos (Chopra *et al.*, 2002) e torna possível a aquisição de mais de uma propriedade física simultaneamente. Na prática é realizada através de um furo de sondagem, tendo como produto um perfil vertical contínuo ao longo do próprio furo.

Historicamente a perfilagem começou estudando as propriedades elétricas dos meios em subsuperfície, direcionada à geologia do petróleo, por Marcel e Conrad Schlumberger, utilizando princípios de resistividade, a fim de investigar a porosidade de rochas reservatório (Chopra *et al.*, 2002). O método pode ser empregado na pesquisa, correlação e interpretação de furos de sondagem ou testemunhos de sondagem. É comum que seja combinado com outros métodos geofísicos.

Dependendo do objetivo da investigação, a instrumentação para perfilagem é variada. É possível trabalhar com as seguintes ferramentas: temperatura, *caliper*, gama natural, gama espectral, susceptibilidade magnética, perfil sônico, resistividade, GPR (radar de penetração), OTV/ATV (imageamento ótico e acústico), perfilagem de neutrons, densidade gama-gama e *gyro*. Geralmente as ferramentas de trabalho costumam ser de fácil transporte no campo e controladas por sistemas eletrônicos. Comparado com a sondagem pura, a aquisição de dados por perfilagem geofísica tem custo financeiro inferior (Telford, 1990).

As propriedades físicas ao longo de um perfil geofísico podem ser obtidas por métodos naturais ou induzidos por excitação do meio (Serra, 1983). Uma divisão alternativa para os métodos utilizados na perfilagem é: mecânicos, eletromagnéticos, nuclear e acústico (Telford, 1990). No presente trabalho, foram utilizados métodos mecânicos e métodos radioativos, regido pelo decaimento radioativo.

Decaimento radioativo é o processo pelo qual um elemento ou nuclídeo transforma-se espontaneamente em outro, atingindo a uma configuração energeticamente inferior comparado com o estado inicial (Ellis e Singer, 2007; Serra, 1983). As consequências dessa transformação são: geração de um novo elemento, emissão espontânea de uma ou mais partículas (alfa (α), beta (β) e gama (γ)) e produção de calor (Serra, 1983).

A taxa de variação do decaimento é uma propriedade constante, com valor definido para cada nuclídeo. Isto permite determinar a quantidade de nuclídeos radioativos antes e depois de um dado intervalo de tempo. É importante

esclarecer que é possível quantificar o número de núclídeos que sofrem decaimento, mas não é possível determinar qual núclídeo sofrerá decaimento. Isto decorre do fato que o decaimento radioativo é um fenômeno natural e de natureza aleatória (Serra, 1983). Matematicamente o decaimento radioativo é definido na expressão abaixo (Ellis e Singer, 2007):

$$N_p = N_i e^{-\lambda t}$$

N_p – número de partículas após o tempo *t*; *N_i* – número inicial de partículas;
λ – constante de proporcionalidade, relacionado ao tempo de meia vida do núclídeo; *t* – tempo.

Nos métodos radioativos, entre as partículas alfa (α), beta (β) e gama (γ), apenas a radiação gama se mostra eficiente para investigação em perfilagem (Ellis e Singer, 2007; Serra, 1983), marcada pela elevada quantidade de energia, baixo comprimento de onda eletromagnética e maior poder de penetração na matéria (Ellis e Singer, 2007; Serra, 1983).

Os elementos que mais produzem radiação gama de forma natural são: potássio (K), presente em uma grande variedade de rochas sedimentares, tório (Th), geralmente de rochas ígneas - e urânio (U), geralmente de rochas ígneas ou precipitado na forma de sais em depósitos sedimentares (Ellis e Singer, 2007; Serra, 1983). Para cada um destes elementos, há uma série de radioisótopos. Isto é, elementos produzidos a partir do decaimento radioativo.

A radiação gama pode interagir com a matéria através de 3 processos (figura 4): efeito fotoelétrico, efeito Compton ou espalhamento Compton e produção de pares (Ellis e Singer, 2007; Serra, 1983; Bassiouni e Rhea, 1994). O efeito fotoelétrico (figura 4A) representa a transferência total da energia de uma partícula gama para um elétron, não há remanescente da radiação gama inicial. No efeito Compton (figura 4B), a radiação gama interage com um ou mais elétrons e transfere uma parcela de energia. Ou seja, há uma fração remanescente da radiação inicial, porém com menor energia. O processo produção de pares (figura 4C) representa a interação da radiação gama com um núcleo atômico. Condicionada a um valor tão alto de energia de radiação, que os raios gama produzem o par elétron-pósitron.

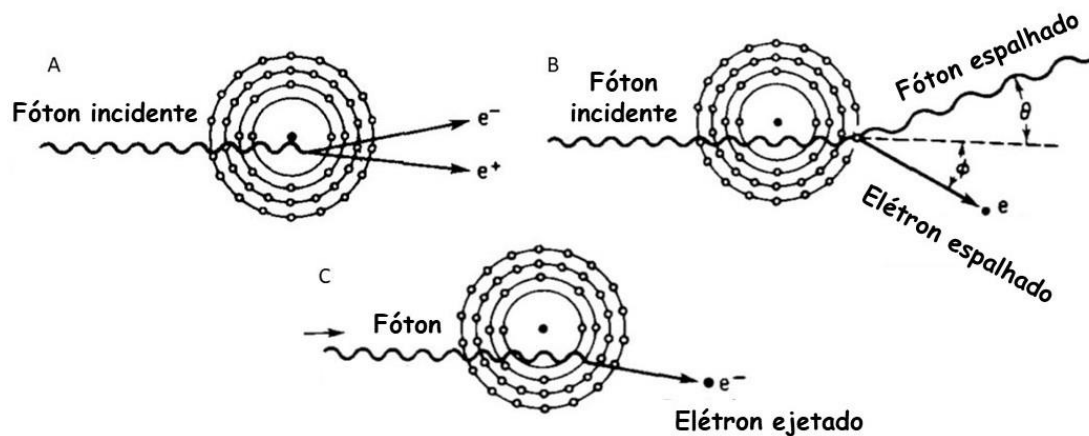


Figura 4 - A - Esquema ilustrando como funciona o efeito fotoelétrico; B - esquema ilustrando como funciona o efeito Compton; C - esquema ilustrando como funciona a interação produção de pares. Traduzido de: Serra, 1983.

Os fatores de controle que tornam este ou aquele processo de interação mais provável de acontecer são: o número atômico Z do material que vai interagir com a radiação e a quantidade de energia da radiação gama (Ellis e Singer, 2007). No SI (Sistema internacional de unidades), a intensidade de energia da radiação gama é medida em unidade de MeV - milhões de eletron volts. Geralmente o efeito fotoelétrico é comum sob baixas energias (<0.2 MeV) e o espalhamento de Compton é comum sob valores intermediários de energia, e a produção de pares ocorre sob valores da ordem de 10MeV, conforme ilustrado na figura 5.

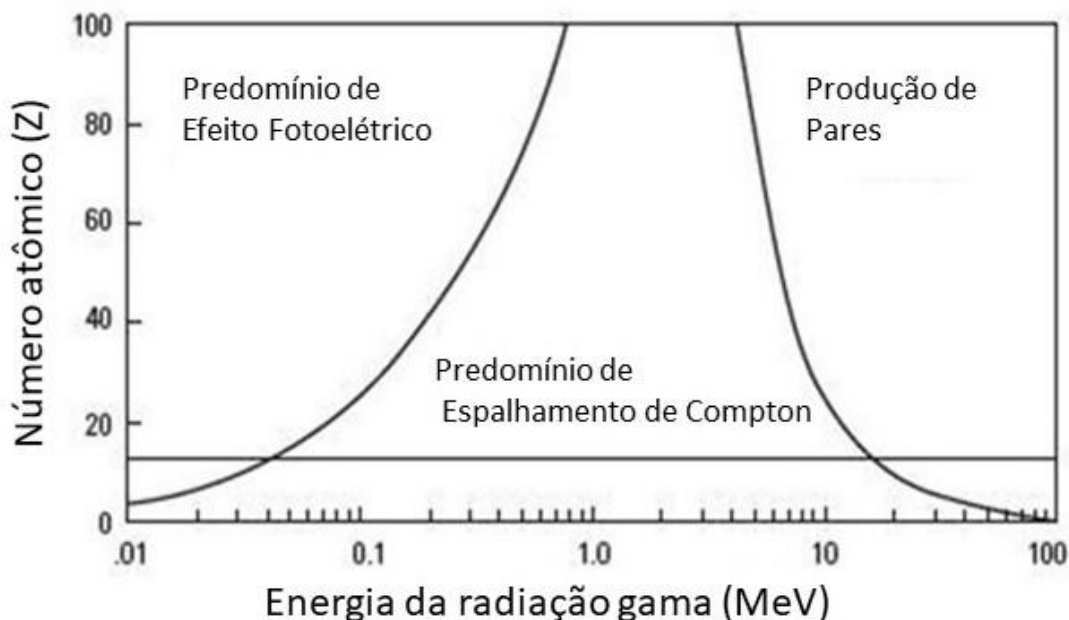


Figura 5 - Gráfico com a distribuição de ocorrência dos mecanismos de espalhamento da radiação gama, em função da energia da radiação gama versus número atômico (Z). Traduzido de: Ellis e Singer, 2007.

Neste trabalho serão utilizados os seguintes perfis geofísicos: gama natural, gama-gama e *caliper*. Gama natural tem como objetivo quantificar a radioatividade natural do alvo. Para aquisição de dados no perfil gama natural, não é necessário excitar o meio. A ferramenta de perfilagem desce ao longo do furo de sondagem e registra a quantidade de radiação gama emitida espontaneamente pelas rochas.

A perfilagem gama-gama é empregada para medir a densidade do alvo. Requer estímulo do meio, utilizando uma fonte radioativa de Césio 137. Na aquisição do perfil gama-gama, a fonte radioativa fica em um dispositivo de segurança acoplado na extremidade inferior da ferramenta de perfilagem (figura 6) e é composta por três peças: fonte de emissão de raios gama, sensor de espaçamento curto e um sensor de espaçamento longo (Ellis e Singer, 2007). Ambos os sensores recebem a radiação de resposta e a densidade é calculada a partir de um fator de correção aplicado à resposta de ambos os sensores.

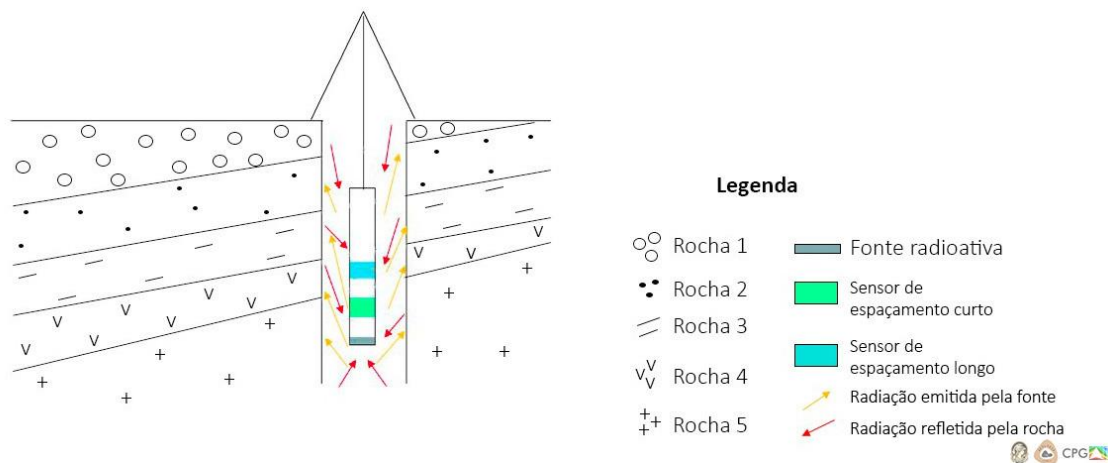


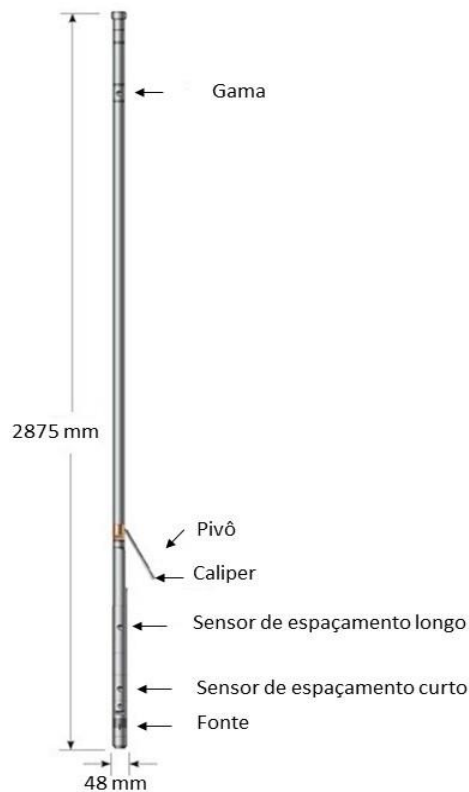
Figura 6 - Esquema idealizando como funciona a aquisição de dados pela ferramenta gama-gama.

Para registrar a radiação de resposta, o detector utilizado foi um cintilômetro. Consiste em um cristal de iodeto de sódio que interage com a radiação gama e emite luz visível. Esta luz é convertida em energia elétrica e fica registrada a quantidade de energia que retorna. A intensidade da radiação de resposta é inversamente proporcional à densidade do alvo (Serra, 1983). Combinados, gama natural e gama-gama podem ajudar na separação dos tipos litológicos presentes em cada intervalo dentro de um furo de sondagem.

A ferramenta *caliper* monitora o diâmetro do furo de sondagem. Essa ferramenta tem a finalidade de medir o diâmetro do furo ao longo de sua trajetória. Consiste em um pivô, análogo a um braço mecânico, acoplado na haste que desce junto da sonda (Serra, 1983). Para um bom funcionamento, este braço mecânico deve permanecer em contato direto com a parede do furo. Alterações no diâmetro do furo vão refletir-se em variações no quão esticado fica o pivô. Essa ferramenta é utilizada para reconhecimento de intervalos pouco coesos e zonas de descontinuidade (fraturas, fissuras ou cavidades).

4.2 Aquisição

A perfilagem geofísica foi executada em oito furos de sondagem dispostos em arranjo linear, nas imediações. Essa localidade foi selecionada porque anteriormente passou por aquisição de dados de resistividade elétrica, incluindo uma bancada de mina no seu entorno, denominada “linha controle”. Nesta mesma “linha controle” foi executado um mapeamento direto em sua face. Este conjunto contribuiu para melhora as correlações e interpretações pelos dois métodos (perfilagem geofísica nos furos de sondagem e eletrorresistividade na linha controle). Para tal, utilizou-se equipamento único chamado Slimline Densidade (figura 7), fabricado pela própria empresa responsável pela



aquisição. É capaz de medir: densidade gama-gama, gama natural e *caliper*. Suas especificações técnicas podem ser vistas no quadro 1. Junto à aquisição foram amostrados testemunhos de sondagem.

Figura 7 Ferramenta de perfilagem Slimline Densidade. Retirado de Weatherford, 2015.

Quadro 1 - Especificações técnicas da ferramenta Slimline Densidade. Traduzido de Weatherford, 2015.

Dados	Densidade, gama natural e caliper
Máxima velocidade de aquisição	9 m/min
Intervalo de aquisição	1.0 até 4.5 g/cm ³
Resolução vertical	150 mm
Acurácia	Densidade 0.025g/cm ³
Diâmetro externo máximo	48mm
Comprimento de aquisição	2875 mm
Peso	206,8 Kg
Máxima temperatura	70°C
Máxima pressão	3.0 Kpsi (20.7 MPa)
Diâmetro mínimo do furo	76 mm

Na prática, a haste de perfilagem desce ao longo do furo de sondagem por meio de cabos em um sistema mecanizado. Este sistema é utilizado para garantir que a ferramenta desça a uma velocidade constante. Simultaneamente as ferramentas (caliper, gama-gama e gama natural) fazem a aquisição dos dados. Ao término da perfilagem, a haste de perfilagem é içada através do mesmo sistema mecanizado. No total, foram perfilados 8 furos (figura 8).

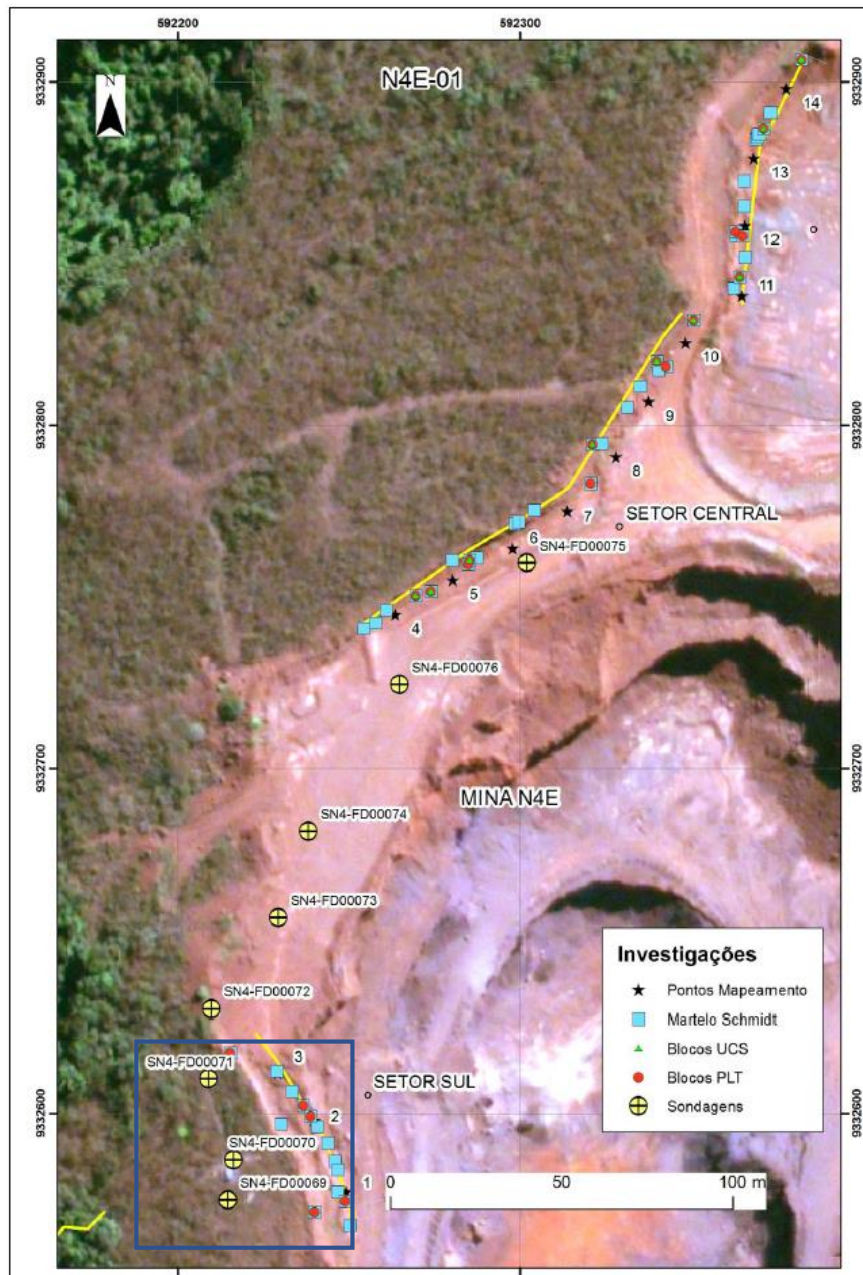
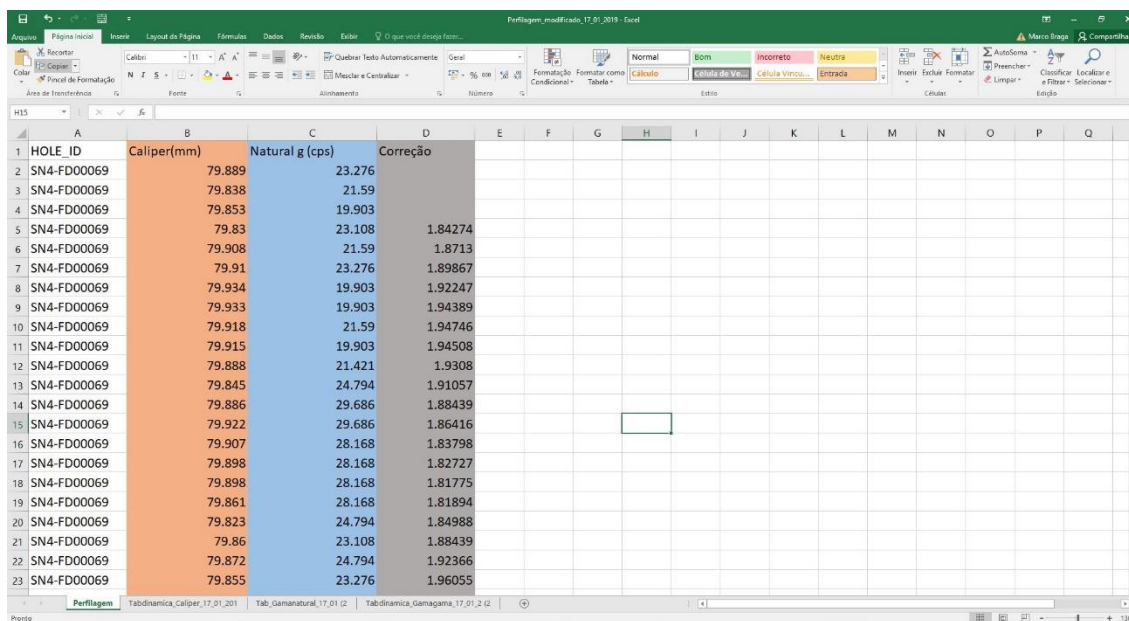


Figura 8 - Imagem de satélite da cava em N4EN, nas imediações da cavidade N4E 0026. Os pontos inscritos no quadrado representam a posição dos furos perfilados neste trabalho. As linhas em amarelo representam as seções geológicas.

Posteriormente os dados registrados foram analisados e foram selecionados 3 furos: SN4-FD00069, SN4-FD00070 e SN4-FD00071. Esses foram os furos escolhidos para esta pesquisa porque estão dispostos ao longo da linha de controle executada sobre a face de uma bancada da mina. Isso tornou possível a realização de uma comparação entre a interpretação dos dados obtidos pelos dois métodos.

4.3 Processamento e interpretação

O processamento e análise dos dados se deu nos softwares **Microsoft Excel 2016** e posteriormente **Oasis Montaj versão 9.4**, desenvolvido pela **Geosoft**. O primeiro torna possível uma compilação das informações (figura 9), bem como a confecção de representações gráficas e estatísticas a fim de identificar aspectos anômalos. O capítulo 7 (Resultados) traz mais detalhes sobre as ferramentas utilizadas.



HOLE_ID	Caliper(mm)	Natural g (cps)	Correção
SN4-FD00069	79.889	23.276	
SN4-FD00069	79.838	21.59	
SN4-FD00069	79.853	19.903	
SN4-FD00069	79.83	23.108	1.84274
SN4-FD00069	79.908	21.59	1.8713
SN4-FD00069	79.91	23.276	1.89867
SN4-FD00069	79.934	19.903	1.92247
SN4-FD00069	79.933	19.903	1.94389
SN4-FD00069	79.918	21.59	1.94746
SN4-FD00069	79.915	19.903	1.94508
SN4-FD00069	79.888	21.421	1.9308
SN4-FD00069	79.845	24.794	1.91057
SN4-FD00069	79.886	29.686	1.88439
SN4-FD00069	79.922	29.686	1.86416
SN4-FD00069	79.907	28.168	1.83798
SN4-FD00069	79.898	28.168	1.82727
SN4-FD00069	79.898	28.168	1.81775
SN4-FD00069	79.861	28.168	1.81894
SN4-FD00069	79.823	24.794	1.84988
SN4-FD00069	79.86	23.108	1.88439
SN4-FD00069	79.872	24.794	1.92366
SN4-FD00069	79.855	23.276	1.96055

Figura 9 -- Interface dos dados brutos no software Microsoft Excel 2016. Em laranja: perfil caliper; em azul: perfil gama natural; em cinza: perfil gama-gama, com o valor de densidade corrigido.

A plataforma **Oasis Montaj** (figura 10) é utilizada na interpretação de dados na exploração mineral e investigações geológicas em geral. Permite a integração de dados de geoquímica, mapeamento geológico e geofísica. Nesta segunda etapa foram gerados os perfis geofísicos integrados (gama natural, gama-gama e *caliper*) bem como plotagem 2D dos furos e descrição geológica dos testemunhos de sondagem.

The screenshot displays the Oasis Montaj software interface. The main window shows a data table with columns: SN4-FD0069, DH_From, DH_To, Caliper, Gama_natural, gama_densidade, DH_East, and DH_North. A context menu is open over the table, with 'Strip Log...' selected. The interface includes a Project Explorer on the left, a menu bar at the top, and a status bar at the bottom.

SN4-FD0069	DH_From	DH_To	Caliper	Gama_natural	gama_densidade	DH_East	DH_North
0.0	0.00	0.01	79.89	23.28	-999.00	592214.7	9332574.7
1.0	0.01	0.01	79.84	21.59	-999.00	592214.7	9332574.7
2.0	0.01	0.03	79.85	19.90	-999.00	592214.7	9332574.7
3.0	0.03	0.04	79.83	23.11	1.84	592214.7	9332574.7
4.0	0.04	0.04	79.91	21.59	1.87	592214.7	9332574.7
5.0	0.04	0.06	79.91	23.28	1.90	592214.7	9332574.7
6.0	0.06	0.07	79.93	19.90	1.92	592214.7	9332574.7
7.0	0.07	0.07	79.93	19.90	1.94	592214.7	9332574.7
8.0	0.07	0.09	79.92	21.59	1.95	592214.7	9332574.7
9.0	0.09	0.10	79.92	19.90	1.95	592214.7	9332574.7
10.0	0.10	0.10	79.89	21.42	1.93	592214.7	9332574.7
11.0	0.10	0.12	79.84	24.79	1.91	592214.7	9332574.7
12.0	0.12	0.13	79.89	25.69	1.88	592214.7	9332574.7
13.0	0.13	0.14	79.92	29.69	1.86	592214.7	9332574.7
14.0	0.14	0.14	79.91	28.17	1.84	592214.7	9332574.7
15.0	0.14	0.15	79.90	28.17	1.83	592214.7	9332574.7
16.0	0.15	0.17	79.90	28.17	1.82	592214.7	9332574.7
17.0	0.17	0.17	79.86	28.17	1.82	592214.7	9332574.7
18.0	0.17	0.18	79.82	24.79	1.85	592214.7	9332574.7
19.0	0.18	0.20	79.86	23.11	1.88	592214.7	9332574.7
20.0	0.20	0.20	79.87	24.79	1.92	592214.7	9332574.7
21.0	0.20	0.21	79.86	23.28	1.96	592214.7	9332574.7
22.0	0.21	0.23	79.88	19.90	2.02	592214.7	9332574.7
23.0	0.23	0.23	79.95	15.01	2.07	592214.7	9332574.7
24.0	0.23	0.24	79.89	15.01	2.13	592214.7	9332574.7
25.0	0.24	0.26	79.91	15.01	2.19	592214.7	9332574.7
26.0	0.26	0.27	80.00	13.32	2.25	592214.7	9332574.7
27.0	0.27	0.28	79.96	16.53	2.33	592214.7	9332574.7
28.0	0.28	0.28	79.91	18.05	2.41	592214.7	9332574.7
29.0	0.28	0.29	79.92	21.25	2.46	592214.7	9332574.7
30.0	0.29	0.30	79.86	22.94	2.52	592214.7	9332574.7
31.0	0.30	0.32	79.80	26.14	2.59	592214.7	9332574.7
32.0	0.32	0.33	79.91	24.46	2.65	592214.7	9332574.7

Figura 10 - software Oasis Montaj, com destaque para a ferramenta Striplog, utilizada para confeccionar os perfis integrados.

Concomitantemente com a campanha de perfilagem geofísica, foram feitos trabalhos adicionais: descrição de testemunhos de sondagem, mapeamento de bancadas nas imediações da mina N4EN e ensaios *in situ* e *ex situ* para obtenção parâmetros geomecânicos em perfis de intemperismo. A figura 11 mostra as litologias encontradas nas bancadas em N4EN em, e ilustra a dificuldade na separação visual das diferentes litologias, justificando a necessidade da combinação entre a perfilagem geofísica e os demais métodos. Enquanto. A figura 12 traz um exemplo da bancada mapeada, onde foi executada a aquisição de eletrorresistividade. Esses dados contribuíram com informações a respeito de características visuais, texturais e geomecânicas das rochas que ocorrem na cavidade N4E-0026 e imediações, contribuindo para a interpretação dos perfis geofísicos.



Figura 11 -Exemplo de bancada encontrada em N4EN. Detalhar litologias

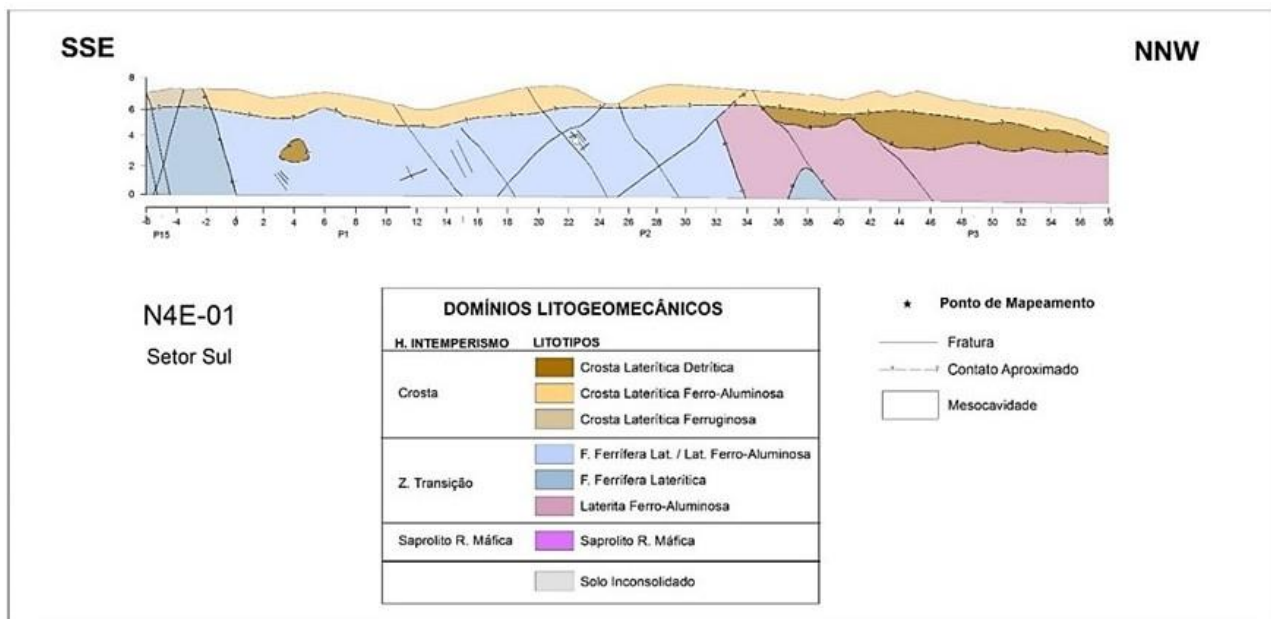


Figura 12 - Exemplo de seção, ilustrando a diversidade litológica encontrada na face da bancada da mina onde foi executada a linha controle com aquisição dos dados de eletrorresistividade. Retirado de VALE, 2017

5 Geologia Regional

5.1 Contexto geológico

Cráton pode ser definido como região da crosta continental, caracterizada por tornar-se tectonicamente estável por mais de 200 milhões de anos (Winge *et al.*, 2001). O Cráton Amazônico fica localizado na porção norte do território brasileiro. Esta massa continental formou-se entre o Arqueano e o Mesoproterozoico, sendo estabilizada em 1.0 Ga (Brito Neves e Cordani, 1991; Tavares, 2015).

O território do Cráton Amazônico é dividido em províncias (figura 13) tendo como critério análises de geocronologia pelos métodos U-Pb e Sm-Nd. São propostas 7 províncias: Amazônia Central, Carajás, Transamazonas, Tapajós-Parima, Rio Negro, Rondônia-Juruena e Sunsás (Santos, 2003). Aqui, cabe destacar a Província Carajás.

A Província Carajás fica localizada na porção leste do cráton Amazônico, onde predomina registro geológico de idade arqueana, segundo datações por U-Pb, em associação com rochas do proterozoico. A trama estrutural na região tem orientação WNW-ESE (Santos, 2003). Configura uma localidade com potencial mineral (Fe, Al, Cu, Au), justificando crescente interesse em investigações na área. Pode ser dividida em dois domínios, com base em diferenças na idade das rochas: Rio Maria – setor sul da província – e Carajás – setor norte da província.

O Domínio Rio Maria tem as rochas mais antigas, com idade mesoarqueana. Caracterizadas por terrenos TTG (tonalito-trondhjemito-granodiorito) e greenstone belt, formados em contexto de crescimento crustal (Santos, 2003). Já o Domínio Carajás, também chamado de Cinturão Itacaiúnas, possui rochas de idade neoarqueana. Entre os litotipos, têm-se rochas metavulcanossedimentares (Supergrupo Itacaiúnas), corpos magmáticos intrusivos e corpos magmáticos vulcânicos, formados sob processos de aglutinação e colisão continental (Tavares, 2015). A área de estudo está inserida no Domínio Carajás, dentro da Província Carajás, Cráton Amazônico.

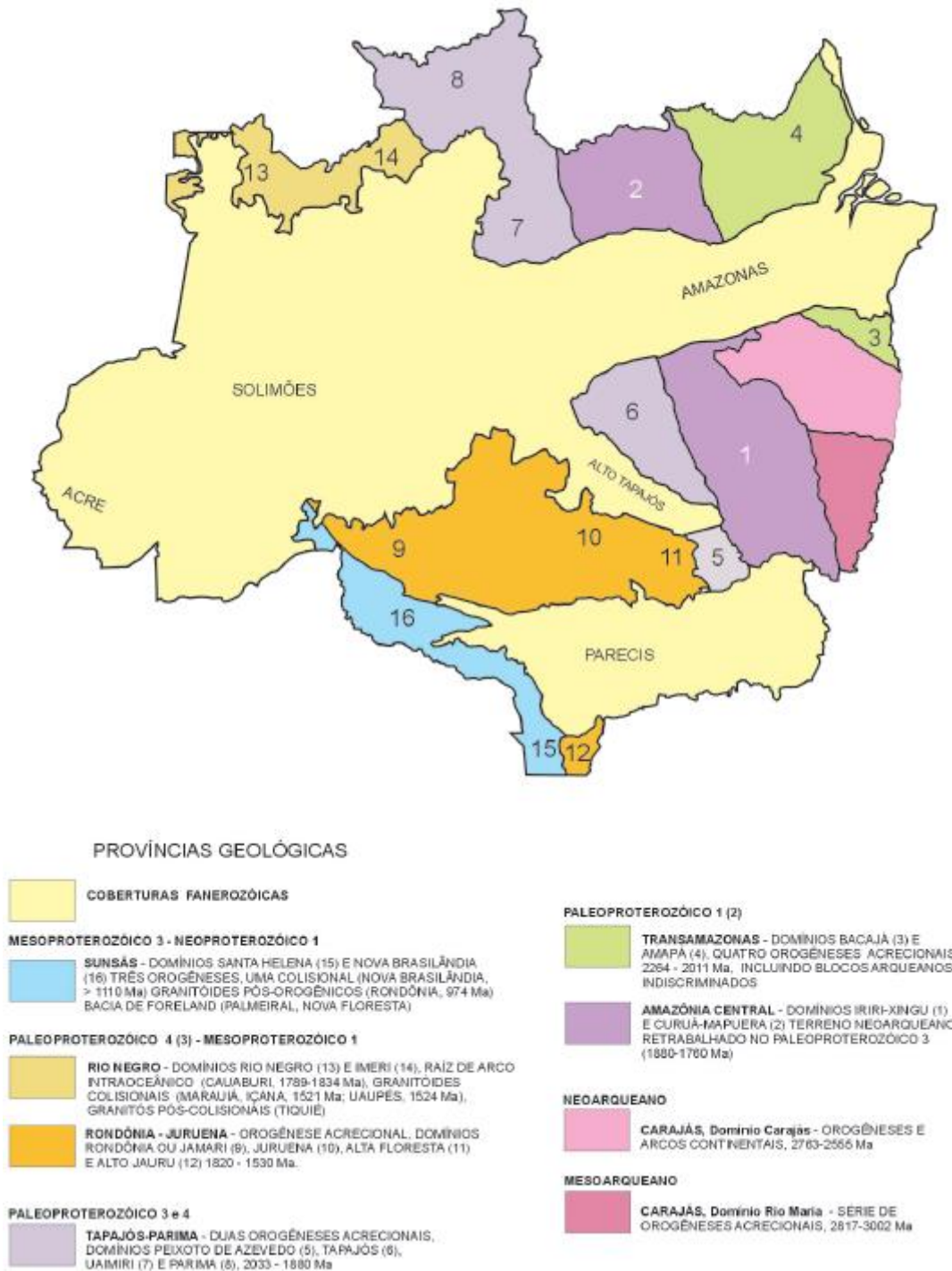


Figura 13 -Distribuição das províncias no Cráton Amazônico. Retirado de: Santos, 2003.

5.2 Contexto Estratigráfico

O empilhamento das unidades estratigráficas será apresentado por *time slice*. A distribuição das unidades pode ser observada na figura 14.

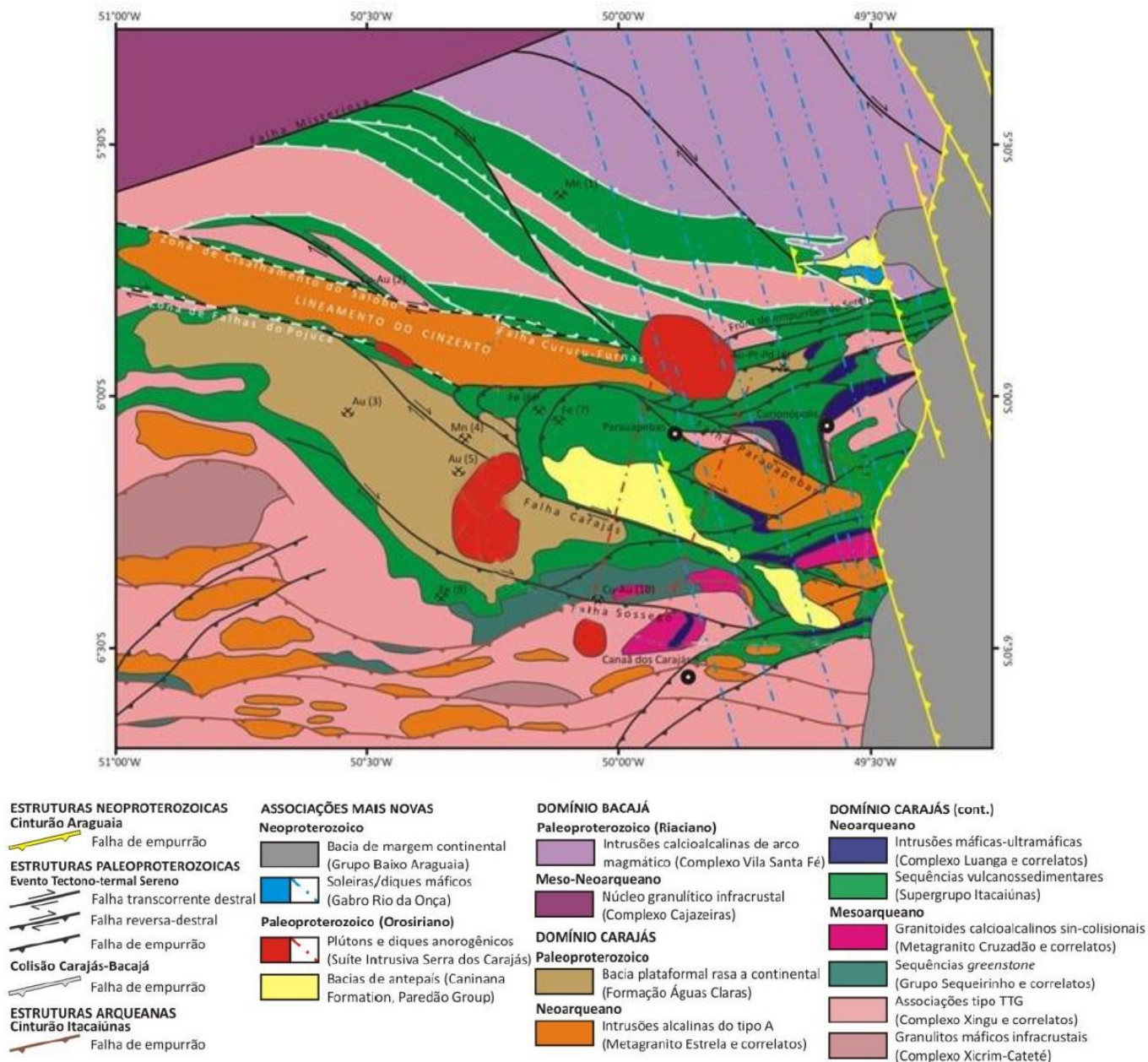


Figura 14 -Mapa Geológico do Domínio Carajás. Adaptado de Tavares, 2015.

5.2.1 Mesoarqueano

Complexo Xingu:

Representa o embasamento na região de Carajás (Tavares, 2015). Agrupa rochas ígneas e metamórficas. Composicionalmente são terrenos TTG's ou lascas de terrenos *greenstone* com ocorrência de formação ferrífera. Nas localidades de ocorrência desta unidade, o relevo é arrasado (Araújo e Maia, 1991). É comum encontrar afloramentos intensamente alterados por processos intempéricos, gerando espessos mantos regolíticos (Macambira 2003).

5.2.2 Neoarqueano

Supergrupo Itacaiúnas:

Depositado por cima do embasamento, engloba um conjunto de sequências metavulcanossedimentares, depositadas entre 2.76–2.73 Ga (DOCEGEO, 1988). Este trabalho pioneiro divide estas sequências em grupos: Salobo, Pojuca, Grão Pará, Igarapé Bahia e Buritirama. Outras divisões alternativas para a unidade Itacaiúnas são: Grupo Pojuca e Grupo Grão Pará (Macambira, 2003) ou Associação de base, Associação intermediária e Associação de topo (Tavares, 2015).

A base é composta por litotipos vulcanogênicos, relacionados a um evento de caráter bimodal ácido-básico. Na porção intermediária encontram-se pacotes de formação ferrífera bandada, folhelhos negros, formação manganesífera bandada, mármore e rochas calcissilicáticas (Tavares, 2015). A porção intermediária equivale ao Grupo Grão Pará (DOCEGEO, 1988; Macambira 2003). A relação de contato entre a associação basal e associação intermediária é gradacional. Na associação de topo, prevalecem litotipos sedimentares clásticos, com conglomerados e arenitos metamorfizados. O contato entre a associação intermediária e associação de topo é gradacional ou erosiva.

O grupo Grão Pará se divide em 4 formações: Parauapebas, Carajás, Igarapé Cigarra e Igarapé Boa Sorte (Macambira, 2003). Na Formação Carajás estão hospedados os corpos de jaspilito e hematita, alvo da exploração na mina N4EN. As localidades de ocorrência desta unidade têm relevo de platôs dissecados com encostas abruptas (Macambira, 2003) e é onde frequentemente se formaram as cavernas da região de Carajás.

Intrusões máficas e ultramáficas

Resultam de eventos ocorridos entre 2.76 e 2.74Ga, simultaneamente com a deposição da unidade Itacaiúnas. Marcados pelo caráter bimodal, análogo ao Supergrupo Itacaiúnas. Entre os principais representantes têm-se: complexo máfico-ultramáfico Luanga e o complexo máfico-ultramáfico Vermelho. O primeiro é representado por xistos, serpentinitos, metagabros, metanoritos e magnetitos. Já o segundo possui: metadunitos, metapiroxenitos, metagabros e anfíbolitos. (Tavares, 2015).

Granitóides subalcalinos

Corpos descontínuos gerados entre 2.76–2.70 Ga. Destacam-se: Granito Estrela, Igarapé Gelado e Serra do Rabo. É possível que estejam gnaissificados, por influência de processos tardios (Tavares, 2015). A exemplo dos complexos máfico-ultramáficos, ocorrem simultaneamente com a deposição do Supergrupo Itacaiúnas.

5.2.3 Paleoproterozoico

Formação Águas Claras

Nomenclatura atribuída por Araújo e Maia (1991). Esta formação é composta por rochas metassedimentares (metapelitos, metarenitos e metaconglomerados) em discordância com a unidade Itacaiúnas. Tem idade paleoproterozoica (Tavares, 2015). No entanto, outros autores (Macambira 2003; Araújo e Maia 1991) consideram que esta unidade seja de idade neoarqueana.

Grupo Paredão e Formação Caninana:

Nomenclatura dada por Pereira (2009). Constituídos por brechas sedimentares, conglomerados polimíticos, arenitos seixosos e arenitos mal selecionados (Tavares, 2015). Ambas têm idade orosiriana.

Suíte Serra dos Carajás:

Registra episódio de magmatismo intrusivo de natureza anorogênica. Entre os litotipos, há: granitos alcalinos tipo A e diques ácidos com orientação NNE-SSW a NE-SW. Dentro desta suíte, foi individualizado o Granito Cigano, como unidade mapeável. O evento que gerou estes corpos é cronocorrelato ao magmatismo Uatumã (Tavares,2015).

5.2.4 Neoproterozoico

Gabro Rio da Onça

Corpos intrusivos (soleiras e diques) de natureza máfica, com orientação NNW-SSE. Ocorrem na parte nordeste da Província Carajás. Geralmente deformados por zonas ultramiloníticas finas e anastomosadas (Tavares, 2015). A idade para os diques é de 0.75Ga, pelo método K-Ar (Paixão *et al.*, 2008).

5.2.5 Mesozoico:

Diabásio Rio Pajeú

Ocorrem como corpos discordantes (diques), tendendo a ter orientação semelhante aos corpos neoproterozoicos. São rochas mais finas e sem vestígios de deformação. A formação destes corpos é correlacionada com o magmatismo máfico jurássico-triássico que ocorre em outras porções do norte do Brasil (Tavares, 2015).

5.2.6 Cenozoico

Cobertura laterítica:

Depósitos formados a partir de processos de alteração *in situ* e retrabalhamento físico-químico dos produtos de intemperismo das formações ferríferas do Grupo Grão Pará. Localmente podem ser chamados de canga e podem ser de natureza detrítica ou química. Têm composição ferruginosa ou ferro-aluminosa (figura 15). O desenvolvimento dessas crostas foi condicionado principalmente por variações climáticas (Kotschoubey e Lemos, 1985; Maurity e Kotschoubey, 1995; Souza e Kotschoubey, 1991; Kotschoubey, 1989). Do ponto de vista textural, ora se assemelham com uma brecha ora se assemelham com um conglomerado. Externamente formam um manto espesso e resistente, devido à cimentação por óxido de ferro.

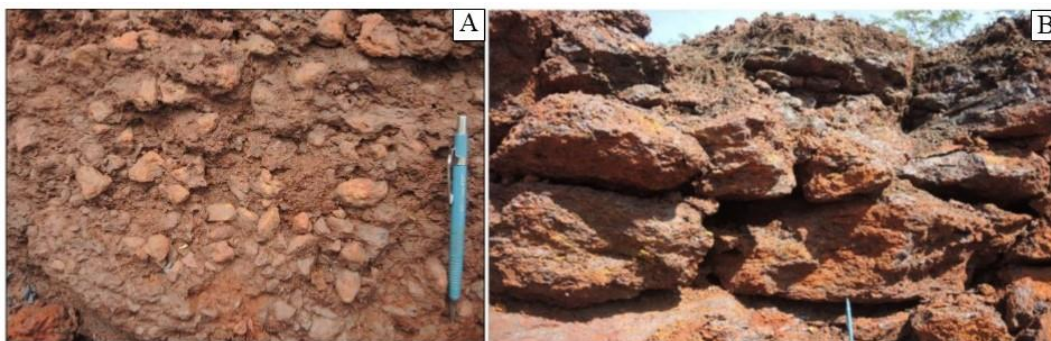


Figura 15 -Variedades de canga: A: crosta laterítica detrítica; B: crosta laterítica ferro-aluminosa. Adaptado de Barbosa, 2018.

5.2.7 Contexto deposicional do Supergrupo Itacaiúnas

A deposição da unidade Itacaiúnas deu-se em ambiente marinho, porém é discutido se o contexto tectônico de abertura da bacia Grão Pará (Macambira, 2003) está relacionado a um rift intracontinental (Gibs *et al.*, 1986; DOCEGEO 1988; Macambira 2003; Tallarico *et al.*, 2005) ou a um arco magmático ativo (Meirelles e Dardene 1991; Lindenmayer *et al.*, 2001; Lobato *et al.*, 2005 A, B; Zucchetti 2007).

O grupo que defende o contexto de um rift intracontinental aponta para a existência de um substrato cristalino mesoarqueano sob a bacia. E este substrato interfere na assinatura geoquímica e isotópica dos litotipos gerados no magmatismo neoarqueano, herdando contaminação crustal e caráter bimodal. Por outro lado, aqueles que acreditam em um contexto de *back-arc* apontam para o fato de que as rochas ígneas da unidade Itacaiúnas têm características geoquímicas de rochas calcioalcalinas/shoshoníticas. Isto é sustentado pelo padrão de enriquecimento em elementos traços (Ba, U, Nb e Y) nos jaspilitos, somado a fraca anomalia positiva de Eu (entre 1,31 e 1,51), acentuado fracionamento de ETRL (terras raras leves), baixo conteúdo total de ETR (terras raras) e assinatura geoquímica de zona de subducção (Lobato *et al.*, 2005 A).

5.3 Contexto estrutural

A região da Província Carajás possui registro de estruturas com natureza dúctil e rúptil. A estrutura mais importante na Serra dos Carajás é a dobra de Carajás (Beisegel *et al.*, 1973), com eixo segundo a orientação WNW-ESSE. A Serra Sul de Carajás configura o sinformal da estrutura, enquanto a Serra Norte configura o antiformal (Rosière *et al.*, 2006). Em associação há um Cinturão de Cisalhamento (Araújo e Maia, 1991) de orientação E-W e ESSE-NNW, formado por dois sistemas transcorrentes: Carajás e Cinzento. Estes sistemas transcorrentes são responsáveis por gerar falhas subparalelas ao plano axial da dobra Carajás (Zucchetti, 2007).

Tavares 2015 construiu uma proposta alternativa, separando as estruturas em grupos de acordo com as unidades stratigráficas afetadas. Um grupo é restrito ao embasamento (D_{emb}), principalmente com a formação de tramas metamórficas de alto grau. Como representantes, têm-se: xistosidade, bandamento composicional e lineação de estiramento. Além disso, é comum encontrar dobramentos apertados a isoclinais. O outro grupo afeta a unidade Itacaiúnas, intrusões neoarqueanas e outros corpos mais jovens. Idealmente dividido em cinco fases de deformação (D1, D2, D3, D4 e D5).

D1 é o grupo de estruturas que representa a fase mais antiga, com orientação S-SW. Tem caráter dúctil, formando: foliação, lineação de estiramento, zonas de cisalhamento e dobras apertadas a isoclinais. O grupo D2 tem caráter dúctil e orientação N-NE. Possui as mesmas estruturas descritas em D1 e falhas de empurrão. A fase D3 têm orientação WNW-ESE e feições de caráter dúctil a dúctil-rúptil, gerando: foliação, lineação de estiramento, dobramentos e falhamentos. D4 contempla estruturas tipo rúptil. Marcado pela presença de sistemas de fraturas subverticais segundo as orientações ENE-WSW ou WNW-ESE, ocorrendo preferencialmente nas vizinhanças de antigas zonas de falhas. No grupo D5, há feições de caráter rúptil, segundo a orientação NNW-SSE. Caracterizado pela presença de falhamentos e sistemas de juntas (Tavares, 2015).

5.4 Comentários sobre a mineralização

Os depósitos de ferro da Província Mineral de Carajás distribuem-se ao longo da dobra de Carajás, contendo jaspilitos e corpos de hematita de alto teor, contornados por rochas máficas (Lobato *et al.*, 2005 A). A região de N4 possui dois corpos de minério principais: N4EN e N4W. Os dois corpos estão separados por uma falha de orientação aproximadamente N-S (Lobato *et al.*, 2005 A). Em planta, o corpo N4EN tem geometria semelhante a letra “J” (figura 16).

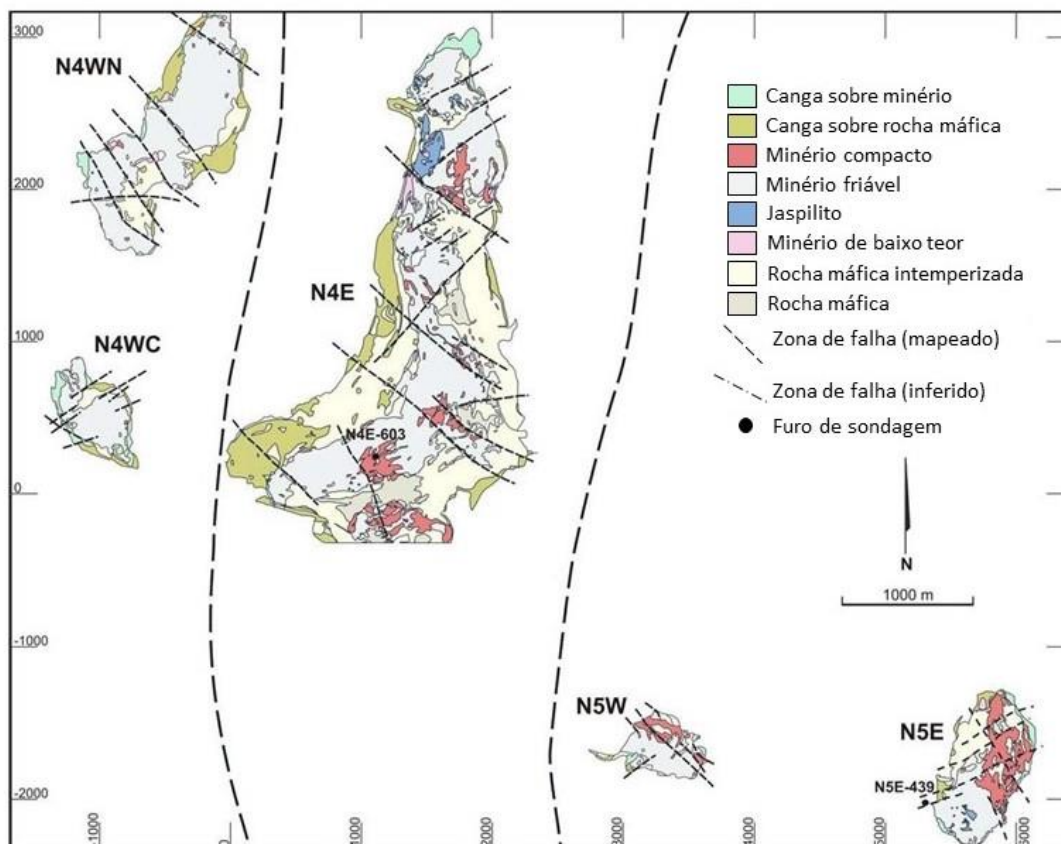


Figura 16 - Localização do depósito N4EN, distribuição das unidades geológicas e demais depósitos minerais da região. Adaptado de: Lobato, 2005 B.

Jaspilitos (figura 17) são rochas com alto teor de ferro (20% a 40%), caracterizadas por micro e mesobandamento onde intercalam-se bandas de jaspe (chert impregnado por hematita fina) e bandas de óxido de ferro. É possível que as bandas sejam ligeiramente onduladas ou retas (Pereira, 2009). Composto por: jaspe, chert, quartzo, óxidos de ferro (hematita e magnetita) e carbonato. Predomina granulação fina e com textura granoblástica. Têm estrutura venulada ou brechada. É comum que estejam alterados, em função de eventos hidrotermais (Lobato *et al.*, 2005 A; Lobato *et al.*, 2005 B).

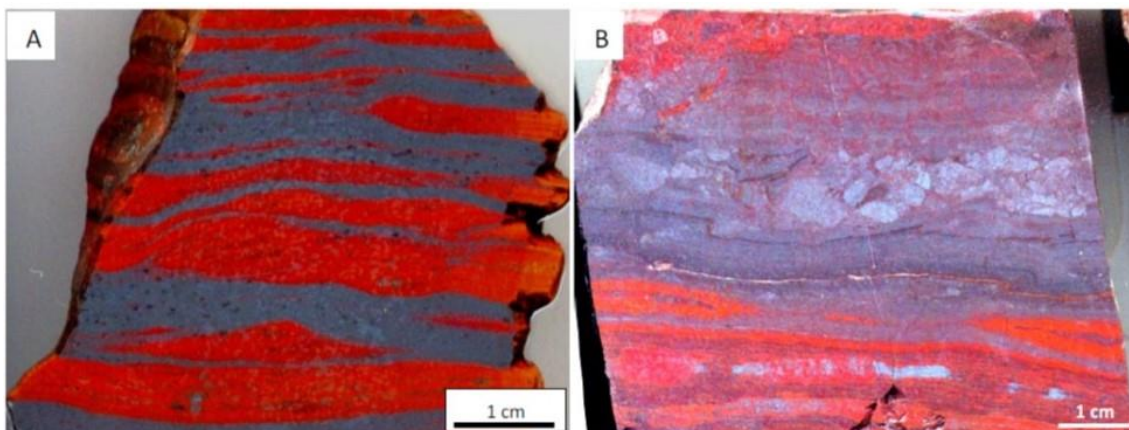


Figura 17 - Litotipos da Formação Carajás. A – Jaspilito com bandamento preservado; B – Jaspilito com bandamento alterado. Retirado de Pereira, 2009.

Além dos jaspilitos, N4EN possui corpos de hematita com alto teor. Ocorrem com duas variedades: hematita mole – HM e hematita dura – HD (figura 18 A e B). Esta é a terminologia utilizada na operação da mina N4EN. HM representa o minério friável, comumente pulverulento e de fácil desagregação, fracamente magnético e com alto teor de ferro (66 %).

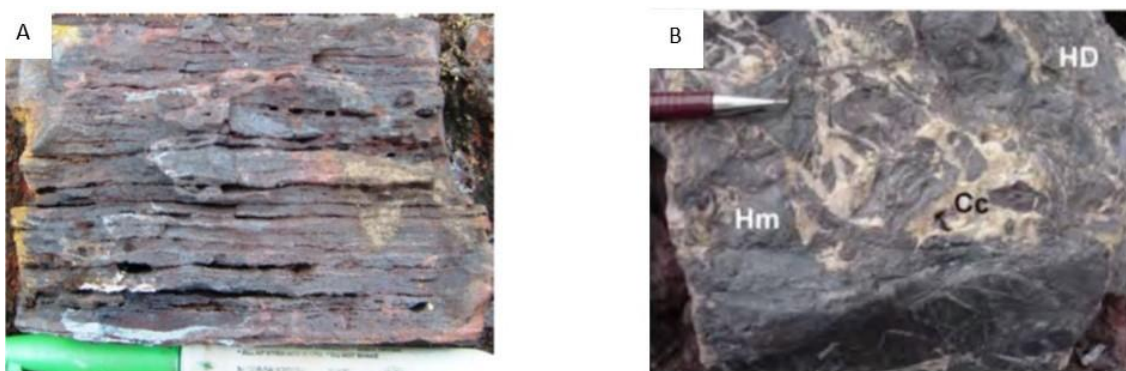


Figura 18 - Corpos de hematita na região de N4EN. Em A, HD – hematita dura com estrutura laminar. Em B, HD – hematita dura com estrutura maciça. Adaptado de Pereira, 2009 e Silva *et al.* 2014.

Por outro lado, HD configura o minério compacto, mais resistente mecanicamente e com teor de ferro entre 65 % e 69 %. De forma geral, há predomínio de HM, enquanto HD ocorre nas proximidades de grandes falhas (Lobato *et al.*, 2005 A). Petrograficamente, possui 5 variedades de hematita, individualizadas com base na textura: hematita microcristalina, hematita (micro) lamelar, hematita anédrica-subédrica e hematita euédrica-subédrica e hematita tabular (Lobato *et al.*, 2005 B). Para este trabalho, são importantes: jaspilitos, cobertura laterítica e os corpos vulcânicos neoarqueanos.

6 Cavernas em Rochas Ferruginosas

6.1 Gênese e características gerais

A região de Carajás possui características especiais do ponto de vista da Geologia Econômica, com seus depósitos minerais, e da Espeleologia. Historicamente, as menções a pesquisa espeleológica na região começam com Tolbert *et al.* (1971) e o Grupo Espeleológico Paraense. Estudos espeleológicos têm por finalidade a caracterização geológica, paleontológica, geoquímica e biológica de feições cársticas, isto inclui: dolinas, vales cegos, paredões, lapíás e cavernas (Winge *et al.*, 2001). Inicialmente esses estudos tinham viés principalmente acadêmico, mas este cenário mudou quando se constatou a ocorrência de cavernas naturais associadas a localidades que hospedam complexos mineiros.

Imaginava-se que cavernas e outras feições de carste só poderiam ser encontradas em rochas carbonáticas, atreladas a processos de dissolução das rochas. No entanto, o relevo cárstico pode se referir também a formação destas feições em rochas não carbonáticas (Piló, 2000). Isto ocorre na região do Quadrilátero Ferrífero e Carajás, em complexos mineiros onde a Vale explora ferro a partir das formações ferríferas e rochas associadas. Ambas as localidades exibem cavernas, formadas sob formação ferrífera ou cobertura laterítica (canga).

Em linhas gerais, para que uma caverna natural seja gerada em rocha ferruginosa é preciso que haja um perfil de alteração (Grimes e Spate, 2009), (figura 19). No caso da região de N4EN, em Carajás, este perfil de alteração desenvolve-se preferencialmente sobre as Formações Ferríferas da Formação Carajás, Grupo Grão-Pará. Os principais processos envolvidos na gênese de cavernas são: erosão em cabeceira de drenagem, erosão remontante, erosão por cachoeira, erosão nas margens de drenagens, erosão em bordas de lagoas, desabamentos, lixiviação, dissolução e biogênese. A maioria das cavernas ocorre na canga e no contato entre canga/rocha (Dutra, 2013).

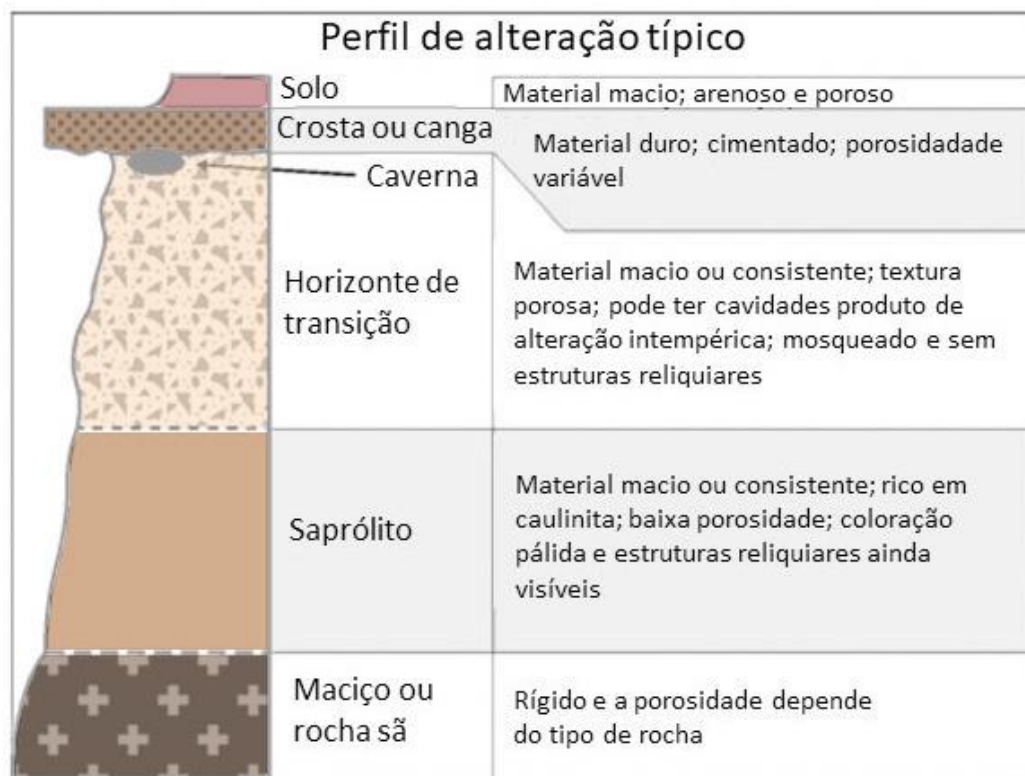
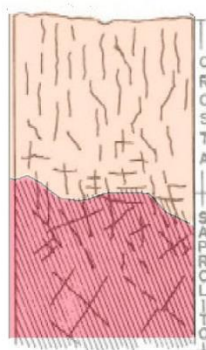


Figura 19 - Modelo idealizado com as unidades de um perfil de alteração susceptível a gênese de uma cavidade, bem como as características de cada intervalo.

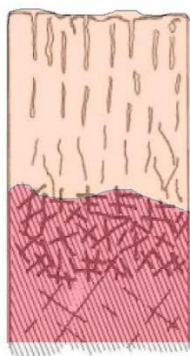
Adaptado de Grimes e Spate, 2009.

O perfil de alteração típico da região é dividido em três horizontes, do topo para a base: cobertura laterítica, horizonte de transição e horizonte saprolítico (Gonçalves *et al.*, 2011). Entre as litologias na cobertura laterítica têm-se: crosta laterítica detrítica, crosta laterítica ferro-aluminosa e crosta laterítica ferruginosa (VALE, 2017).

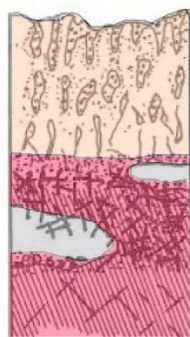
É comum que sejam cimentadas por hematita, goethita ou gibbsita (Maurity e Kotschoubey, 1995; VALE, 2017). Idealmente a evolução da canga laterítica de Carajás pode ser fragmentada em três etapas (Maurity e Kotschoubey, 1995), conforme ilustrado na figura 20. Essas etapas resultam da soma de variações climáticas, intemperismo, erosão, transporte de sedimentos, cimentação, dissolução química e redistribuição de íons de Fe e Al. O início da laterização na região da Amazônia ocorreu entre 65 e 70 Ma (Vasconcelos *et al.*, 1994).



Estágio 1: Percolação de soluções aquosas ao longo de fissuras e fraturas; desenvolvimento de um sistema reticulado de vazios e



Estágio 2: Preenchimento de fissuras e fraturas na interface crosta-saprólito por oxi-hidróxidos de Fe e Al.



Estágio 3: Desenvolvimento da zona de baixa densidade através da dissolução e da eluviação lateral da matriz argilosa. Colapso parcial desta zona e formação

Figura 20 - Síntese das etapas evolutivas da cobertura laterítica. Adaptado de Maurity e Kotschoubey, 1995.

O horizonte de transição representa uma região onde é possível encontrar fragmentos da cobertura laterítica e da rocha que compõe o saprólito. As litologias que integram este intervalo são: formação ferrífera laterítica e laterita ferro-aluminosa, podendo estar cimentadas por óxidos/hidróxidos de ferro. Localmente este horizonte pode apresentar zonas de baixa densidade (Gonçalves *et al.*, 2011), que configuram pontos preferenciais para a formação de cavidades devido a processos de dissolução (Maurity e Kotschoubey, 1995) – ver figura 20, estágio 3.

O horizonte basal é caracterizado pela presença de rochas vulcânicas do Grupo Grão Pará ou formação ferrífera. Raramente ainda apresenta alguma estrutura preservada, devido ao avançado estágio de intemperismo (VALE, 2017). A descrição completa dos litotipos presentes em cada segmento do perfil de alteração será feita no próximo capítulo.

As cavidades na região de Carajás têm vasta similaridade entre si. Ocorrem em áreas com aspectos fisiográficos semelhantes – em quebras do relevo: bordas de lagoas, cabeceiras, bordas de drenagens e bordas de platôs. Em termos de domínio geomorfológico, estão inseridas no Planalto Dissecado do Sul do Pará (Piló e Auler, 2009). A configuração climática e litotipos são igualmente semelhantes. (Valentim e Olivito, 2011). No interior das cavernas é possível encontrar a formação ferrífera, por vezes com o bandamento preservado, e canga detrítica cimentada, com fraturas e juntas (Piló e Auler, 2009).

Cavernas formadas entre a canga e a formação ferrífera geralmente têm pequenas dimensões, isto é, pequena projeção horizontal (Piló e Auler, 2009). As entradas estreitas nas bordas de canga refletem a atuação de processos erosivos (Dutra, 2013). A planimetria das câmaras varia entre irregulares ou retilíneas (figura 21), sendo possível que estejam interconectadas. Geralmente o padrão retilíneo segue uma direção preferencial condicionada por uma junta ou fratura (Piló e Auler, 2009).



Figura 21 - Padrões planimétricos observados nas cavernas de Carajás. Em A está representada uma câmara linear, B representa uma câmara irregular e C uma câmara mista. Adaptado de Dutra, 2013.

Do ponto de vista geomecânico, as cavidades concentram-se em zonas de discontinuidades tais como bandamento composicional e planos de fratura. Configuram facilitadores para a percolação de fluidos e os processos de dissolução descritos anteriormente. Segundo Piló e Auler (2009), algumas cavernas parecem não sofrer influência marcante do controle estrutural.

No entanto, Braga *et al.* (2017) realizaram uma avaliação da influência estrutural no desenvolvimento de cavernas na região da Serra Norte. Os autores concluíram que a presença de estruturas pode favorecer o desenvolvimento e a ampliação tanto de salões quanto galerias. Por isso, separaram as cavernas de Carajás em dois grupos: 1) cavidades formadas por acomodação de blocos, ligadas à porosidade e dissolução, sem controle estrutural evidente; 2) cavernas que apresentam alguma forma de controle estrutural (Braga *et al.*, 2017).

6.2 Legislação

Pelo Art.20º na Constituição de 1988, toda e qualquer cavidade natural subterrânea é patrimônio da União. Anteriormente legislou-se a fim de regulamentar e proteger as cavidades naturais subterrâneas. Os Decretos nº99.556 de 01/10/1990 e nº6640 de 07/11/2008 dispõem a respeito da proteção das cavidades subterrâneas, bem como punições legais. Já as instruções normativas IN-02/2009 MMA, IN-02/2017 MMA dispõem sobre a classificação da relevância das cavidades naturais subterrâneas. O quadro 2 elenca as etapas a serem cumpridas em um estudo espeleológico, que atenda à IN-02/2009.

Quadro 2 - Síntese dos procedimentos envolvidos em cada etapa de um estudo espeleológico.
Retirado de: Ruchkys *et al.* 2015

Etapas dos estudos espeleológicos		
<ul style="list-style-type: none"> Levantamento bibliográfico; Avaliação do potencial espeleológico e prospecção espeleológica; Topografia das cavernas; Estudos geoespeleológicos; Estudos socioeconômicos, históricos e culturais; Análise de relevância; Estudos para definição da área de influência das cavernas; Avaliação dos impactos, medidas mitigadoras, monitoramento e medidas compensatórias 	<ul style="list-style-type: none"> Monitoramento de sítios espeleológicos; Medidas para proteção de sítios espeleológicos; Manejo de sítios espeleológicos; Salvamento espeleológico; Detalhamento de medidas compensatórias 	<p>Aprovação de estudos específicos desenvolvidos na fase de instalação – medidas condicionantes e compensatórias poderão ter vigilância após a concessão da licença operacional, sendo necessário o estabelecimento de um cronograma de execução e acompanhamento do órgão ambiental</p>

Pesquisa e classificação são compromissos legais, a fim de obter o licenciamento ambiental em áreas com cavidades. Isto porque a atividade exploratória pode trazer impactos para a cavidade e sua área de influência. A IN-02/2009 orienta sobre a metodologia de trabalho, sistema de cadastramento de dados e descreve as precauções a serem tomadas.

Pela instrução normativa anterior, fica explícito que dados levantados em pesquisa espeleológica devem ser registrados na plataforma CANIE - Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas, sob tutela do ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - e CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. A cavidade N4E-0026, alvo deste estudo, consta cadastrada na plataforma CECAV¹. Através desta plataforma, é que se faz o registro do patrimônio espeleológico. Os graus de classificação, bem como características e medidas compensatórias previstas pela instrução normativa podem ser conferidos no Quadro 3.

Quadro 3 - Síntese do grau de relevância que pode ser dado para as cavidades. Retirado de: Ruckkys *et al.* 2015.

Grau de relevância	Atributos	Regime jurídico	Medida compensatória
Máximo	Gênese única ou rara; morfologia única; dimensões notáveis; espeleotemas únicos; isolamento geográfico; abrigo para população de animais em risco de extinção; habitat de troglóbio raro; relevância histórico-cultural ou religiosa	A cavidade natural e sua área de influência não podem ser objeto de impactos negativos irreversíveis, sendo que sua utilização deve fazer-se somente dentro de condições que assegurem sua integridade física e a manutenção do seu equilíbrio ecológico.	Não se aplica
Alto	Acentuada sob enfoque local ou regional; acentuada sob enfoque local e significativa sob enfoque regional.	Pode ser objeto de impactos negativos irreversíveis, mediante licenciamento ambiental.	Em caso de impacto negativo, o licenciamento ambiental exige medidas e ações para assegurar a preservação em caráter permanente de duas cavidades com igual grau de relevância bem como o mesmo tipo litológico. Será considerada uma cavidade testemunho.

¹ Link para acessar o cadastro da cavidade N4E-026 na plataforma CECAV : http://www.icmbio.gov.br/cecav/index.php?option=com_icmbio_canie&controller=caverna&itemPesq=true&sqCaverna=10590

Médio	Acentuada sob enfoque local e baixa sob enfoque regional; significativa sob enfoque local e regional	Pode ser objeto de impactos negativos irreversíveis, mediante licenciamento ambiental.	Em caso de impacto negativo, o empreendedor deve adotar assim como financiar medidas e ações que contribuam para a conservação e o uso adequado do patrimônio espeleológico brasileiro.
Baixo	Significativa sob enfoque local e baixa sob enfoque regional; baixa sob enfoque local e regional.	Pode ser objeto de impactos negativos irreversíveis, mediante licenciamento ambiental.	Em caso de impacto negativo, o empreendedor não estará obrigado a adotar medidas e ações para assegurar a preservação de outras cavidades naturais subterrâneas.

Piló e Auler (2009) relatam que as Serras Norte e Sul de Carajás, bem como Serras vizinhas possuem cavernas e cavidades subterrâneas. Cavernas na formação ferrífera e sob cobertura de canga já representam cerca de 20 % das cavernas oficialmente cadastradas no país. Em 2011, Valentim e Olivito aplicaram a metodologia da IN-02/2009 MMA a fim de propor a definição da Unidade Espeleológica Carajás, com base na seguinte definição da IN:

§ 3o Entende-se por unidade espeleológica a área com homogeneidade fisiográfica, geralmente associada à ocorrência de rochas solúveis, que pode congrega diversas formas do relevo cárstico e pseudocárstico tais como dolinas, sumidouros, ressurgências, vale cegos, lapiás e cavernas, delimitada por um conjunto de fatores ambientais específicos para a sua formação.

Como resultado foi definida a Unidade Espeleológica Carajás e dentro da mesma, são separadas áreas de enfoque local ou unidades geomorfológicas. Tais áreas foram fragmentadas de acordo com o conceito instituído pela IN:

unidade geomorfológica que apresente continuidade espacial, podendo abranger feições como serras, morrotes ou sistema cárstico, o que for mais restritivo em termos de área, desde que contemplada a área de influência da cavidade.

No total foram definidas nove áreas de enfoque local: Serra Norte, Serra Sul, Serra da Bocaina, Serra do Rabo, Serra Leste, Serra do Cinzento, Aquiri, Serra de São Felix e Serra Arqueada. A cavidade N4E-0026 está inserida na unidade espeleológica Carajás, dentro da unidade geomorfológica Serra Norte.

7 Resultados

7.1 Descrição das fácies identificadas pelo mapeamento de bancada

Nesta pesquisa foram utilizados dados de perfilagem geofísica, ensaios geomecânicos e mapeamento de bancadas. Durante o mapeamento de bancadas foram confeccionadas seções geológicas e descrições dos perfis de intemperismo. Este conjunto de informações esclarece aspectos geológicos sobre horizontes intimamente ligados com a gênese de cavidades naturais subterrâneas. Foram feitas seções geológicas divididas em setores, com destaque para a seção 1 setor sul (figura 22). Nesta mesma figura, já são apontadas localidades com mesocavidades. Além disso, foram descritos um total de seis litotipos, listados no Quadro 4. Unindo a descrição dos litotipos e as seções geológicas de VALE (2017) é possível construir uma coluna estratigráfica ideal para reconhecimento dos perfis de alteração na região da mina N4EN – figura 24.

Quadro 4 - Síntese das características geológicas e geomecânicas das fácies identificadas pelo mapeamento de bancada.

Fácies identificadas pelo mapeamento de bancada e ensaios geomecânicos			
Litologia	Código	Características	Índice de resistência
Crosta laterítica detrítica	CLD	Aspecto de conglomerado maciço; apresenta matriz silto-arenosa; ocorrência localizada preenchendo vazios ou recobrando superfícies de fraturas; forma camadas pouco espessas	Muito branda a medianamente resistente
Crosta laterítica ferruginosa	CLF	Bandas cimentadas; aspecto brechóide; coloração cinza opaco; grau de alteração intermediário	Resistente a extremamente resistente
Crosta laterítica ferro-aluminosa	CLFA	Costuma ocorrer no topo da zona de crosta; aspecto laminado; textura endurecida; porosidade bem marcada; apresenta feições pisolíticas/pseudopisolíticas	Branda a muito resistente
Formação Ferrífera Laterítica	FFL	Coloração cinza; geralmente porosa e deformada; elevado grau de alteração; bandamento composicional pouco preservado	Branda a muito resistente
Laterita Ferro - Aluminosa	LFA	Textura endurecida; coloração variegada; estrutura laminar ou maciça; cimentado; pode apresentar poros vazios ou preenchidos por hidróxido de ferro	Branda a muito resistente
Saprólito de rocha máfica	SAPRM	Textura silto-argilosa; coloração púrpura; estrutura foliada ou maciça; elevado grau de alteração; presença de vazios	Muito branda a resistente

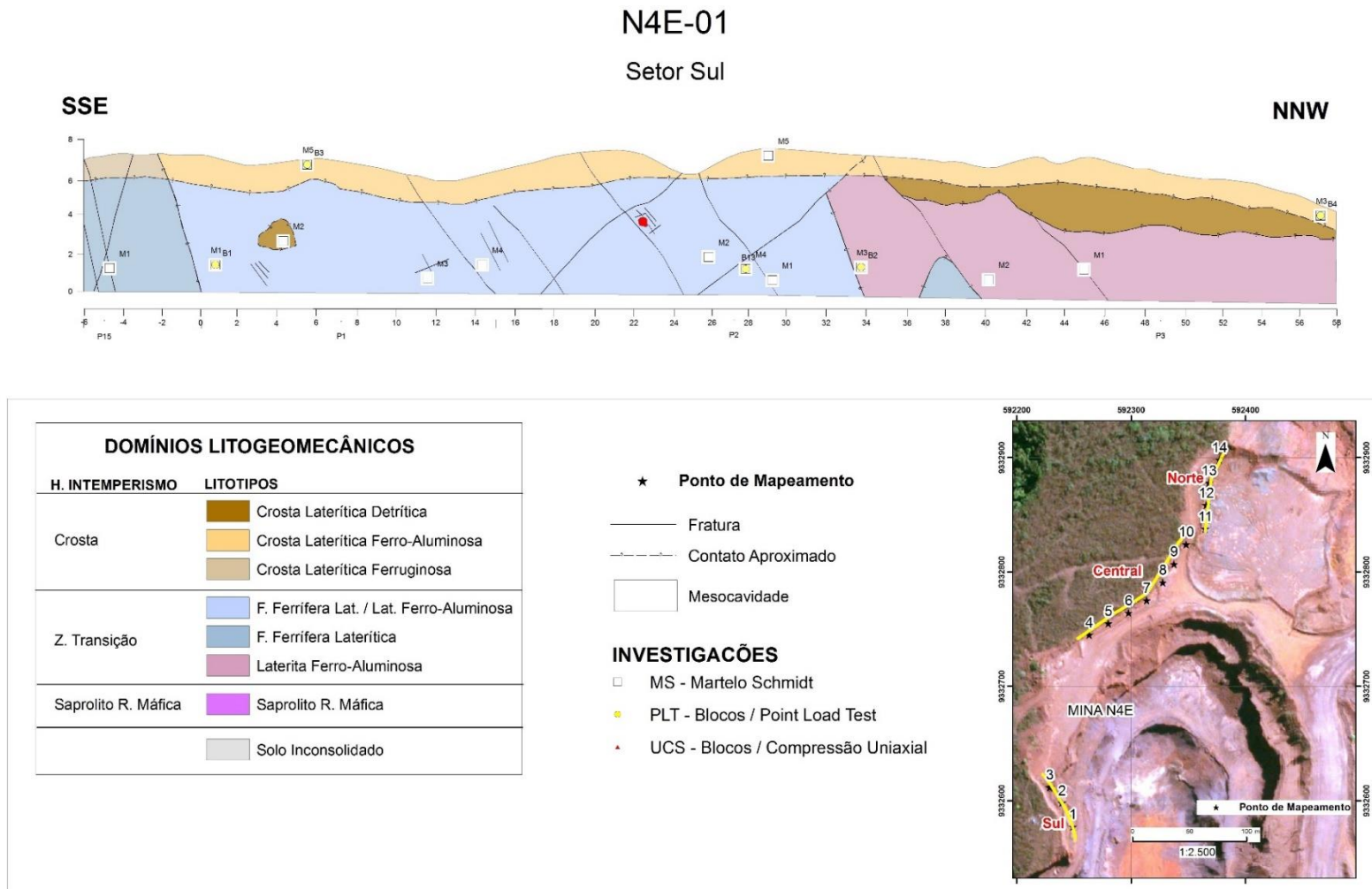


Figura 22 - Seção geológica construída durante o mapeamento de bancadas. Retirado de VALE, 2017.

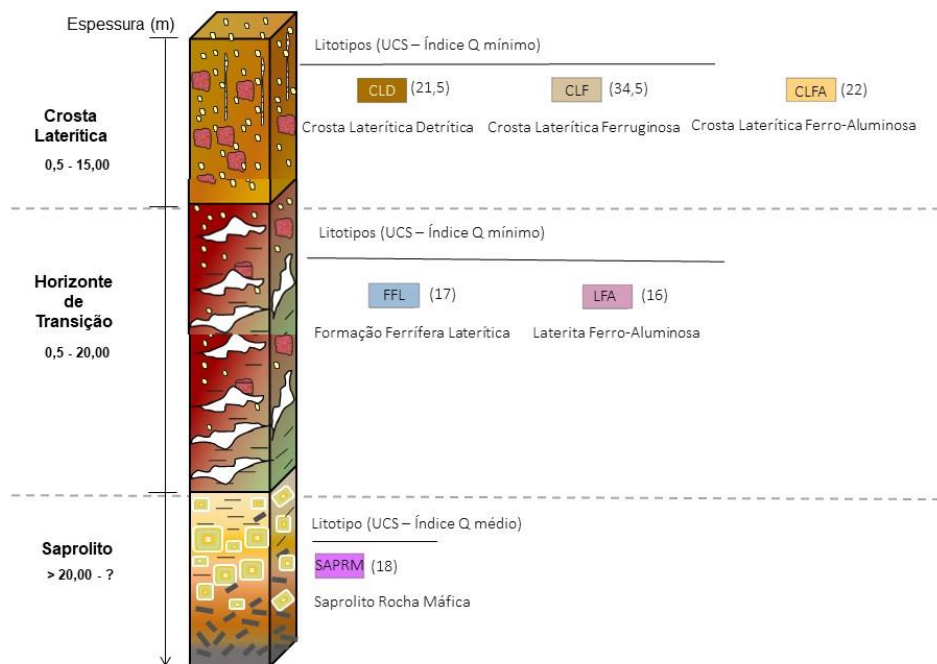


Figura 23 - Empilhamento com os litotipos que podem ser encontrados em cada intervalo, junto do valor mínimo para o índice Q (qualidade da rocha).

O empilhamento na figura 23 é um modelo no qual foram compiladas as observações em mais de uma localidade geográfica, ou seja, nem todas as bancadas apresentam necessariamente os seis litotipos descritos. É importante notar o contraste nos valores de Q, entre os três horizontes. O sistema Q é um número adimensional considerado como índice de dureza ou índice esclerométrico do material ensaiado, varia em escala linear de 10 a 100 e obtido com um instrumento portátil denominado esclerômetro de Schmidt. Quanto maior a resistência geomecânica da superfície ensaiada, maior o valor. Na porção superior do perfil, as três fácies possuem os valores de Q mais elevados. Destaca-se a CLF, com o maior valor do índice Q. Isto evidencia a elevada resistência mecânica da crosta laterítica, cimentada por óxi-hidróxidos de ferro.

Enquanto é igualmente importante notar o contraste do índice Q no horizonte de transição e no saprolito. No horizonte de transição estão os menores valores de Q, o que parece indicar uma zona de baixa densidade, região favorável para atuação dos processos de dissolução e início da espeleogênese. Logo, é de se esperar que entre todas as fácies, FFL e LFA possuam mais feições que comprovem a atuação dos processos de dissolução.

7.2 Análise dos perfis

Para compilar os dados de perfilagem geofísica, foi utilizada a ferramenta “tabela dinâmica”, do software Microsoft Excel 2016. Permitiu a realização do cálculo do valor máximo, mínimo e médio dos três perfis nos furos analisados.

7.2.1 Gama Natural:

Furo	Máx de gama Natural (cps)	Mín de gama Natural (cps)	Média de gama Natural (cps)
SN4-FD00069	48,745	0	10,618
SN4-FD00070	52,793	0	16,428
SN4-FD00071	75,395	0	14,994
Total Geral	75,395	0	12,909

Tabela 1 - Síntese dos valores obtidos no perfil gama natural para os três furos.

O perfil gama natural tem por finalidade medir a radioatividade natural do alvo. . O furo SN4-FD00071 apresenta o maior valor de máximo, entre todos os furos. Enquanto o furo SN4-FD00070 apresenta o maior valor médio, dentre os 3 furos. Analisando em conjunto a tabela 1 e figura 24, é possível constatar um *trend* de crescimento para o valor máximo, indo do furo SN4-FD00069 ao furo SN4-FD00071.

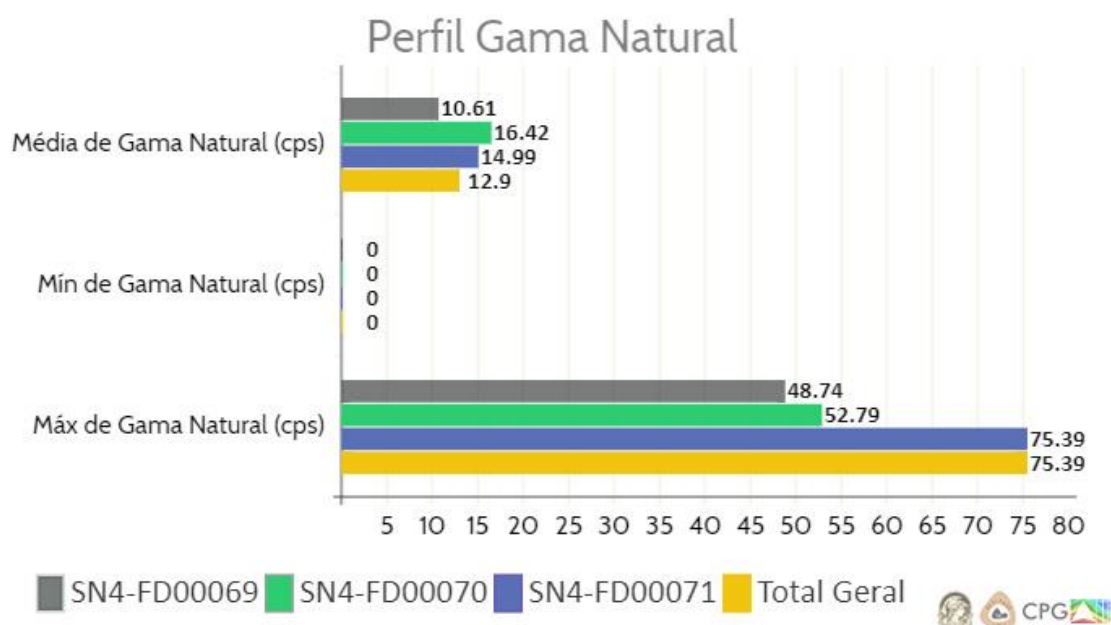


Figura 24 - Representação gráfica dos valores máximo e médio atingidos para o perfil gama natural em cada furo.

7.2.2 Gama-gama:

Furo	Máx de Densidade	Mín de Densidade	Média de Densidade
SN4-FD00069	3,511	1,817	2,903
SN4-FD00070	3,825	1,273	3,033
SN4-FD00071	3,459	1,611	2,815
Total Geral	3,825	1,273	2,912

Tabela 2 - Síntese dos valores obtidos no perfil gama-gama para os três furos, após correções.

A exemplo do perfil gama natural, foram feitos os cálculos de: valor máximo, valor mínimo e valor médio (tabela 2). Para todos os cálculos foram utilizados os valores de densidade corrigida. O maior valor máximo foi atingido no furo SN4-FD00070. Este mesmo furo apresenta o menor valor mínimo de densidade. E o furo SN4-FD00069 tem o maior valor mínimo. Em linhas gerais, a figura 25 permite observar que há uma leve flutuação para os valores máximos e mínimos da densidade.

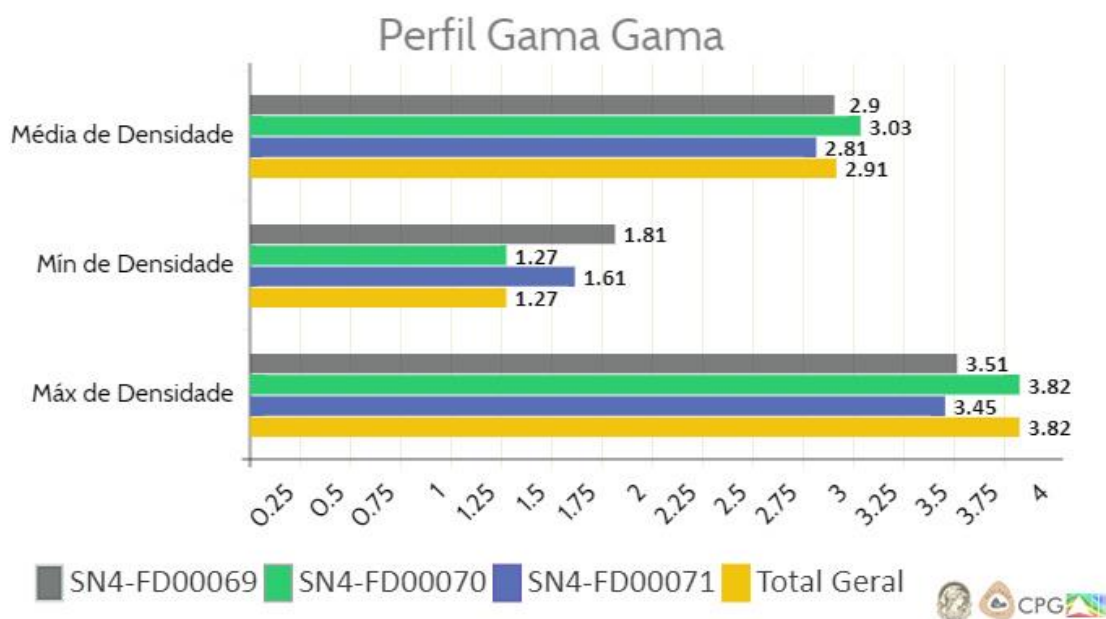


Figura 25 - Representação gráfica dos valores de máximo, mínimo e média atingidos para o perfil gama-gama em cada furo.

7.2.3 Caliper:

Furo	Máx de Caliper(mm)	Mín de Caliper(mm)	Média de Caliper(mm)
SN4-FD00069	80,186	78,804	79,490
SN4-FD00070	79,658	79,284	79,470
SN4-FD00071	81,030	79,154	79,786
Total Geral	81,030	78,804	79,553

Tabela 3 - Síntese dos valores obtidos no perfil *caliper* para os três furos.

A perfilagem com a ferramenta *caliper* tem o objetivo de monitorar o diâmetro do furo. A ferramenta utiliza um pivô que acompanha continuamente mudanças no diâmetro do furo. Para uma boa aquisição, o pivô deve estar em contato direto a parede do furo. O perfil *caliper* conta com estatísticas de valor máximo, valor mínimo e valor médio (tabela 3). No furo SN4-FD00071 tem-se o maior valor máximo. Enquanto no furo SN4-FD00070 atinge o menor valor máximo. Neste mesmo furo, têm-se o maior valor mínimo. Pela figura 26, fica exposto que os valores da ferramenta *caliper* têm uma leve flutuação para os valores máximo e mínimo.

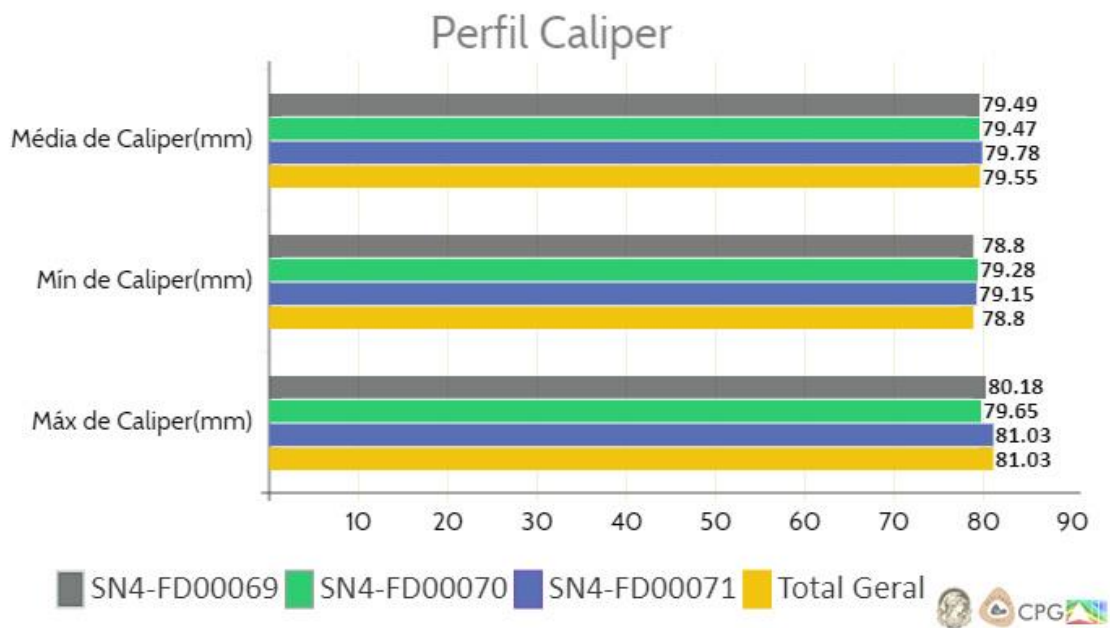


Figura 26 - Representação gráfica dos valores de máximo, mínimo e média atingidos para o perfil *caliper* em cada furo.

7.3 Interpretação dos perfis integrados (*striplogs*)

Esta etapa apresenta os resultados após a análise dos perfis integrados. A interpretação foi construída com base na descrição litológica dos três furos e o mapeamento geológico direto. Ao término, foram convencionados padrões geofísicos, segundo um critério visual.

7.3.1 Furo SN4-FD00069

O furo 069 tem cota inicial a 643,34 m. Representa a amostra que atinge a maior profundidade, total de 75 m. O *striplog* desse furo (figura 27) e descrição do testemunho de sondagem (quadro 5) apresentam três litotipos: canga, rocha máfica decomposta e hematitito friável. A disposição dos intervalos proposta pela descrição do testemunho de sondagem mostra algumas diferenças, quando comparadas com os dados geofísicos. A interpretação será construída de forma a analisar simultaneamente os perfis. São apresentados então 4 padrões para o furo:

Padrão I: inicia-se na superfície e se estende até aproximadamente 13 m. Pela descrição do testemunho de sondagem, neste intervalo o litotipo encontrado é a canga ou crosta. A canga é descrita como um material de estrutura maciça, hidratada e composta por argilominerais (quadro 5). No perfil gama natural predominam valores na faixa de 30 cps, com mínima de 3 cps e máxima de 45 cps, que representam a radioatividade natural do meio. A composição de argilominerais, que aumenta a oferta de K, U e Th, somada à proximidade da superfície e interação com fluidos esclarece a presença dos altos valores de gama natural.

No perfil gama-gama prevalecem valores de densidade acima de 2,5 g/cm³. A mínima obtida é de 1,9 g/cm³ enquanto a máxima chega a 3,5 g/cm³. Geralmente a canga é caracterizada pela elevada resistência mecânica, principalmente devido à cimentação, mas neste intervalo é descrita como: compacta, com porosidade média e cavidades de dissolução. O enriquecimento de ferro e a compactação acarretam em aumento da densidade. Por outro lado, a porosidade média e as cavidades de dissolução provocam redução do valor da densidade e portanto esses atributos justificam tamanha flutuação para os valores de densidade da canga. O quadro 5 sugere que o pacote de canga termine em aproximadamente 13 m.

Padrão II: situado entre aproximadamente 13 m e 24 m. O litotipo aqui presente é o hematitito friável. O perfil gama natural apresentou a menor variação, quando comparado com o padrão I. Tem radiação gama natural mínima de 1 cps e máxima de 25 cps. O hematitito friável é uma rocha formada a partir dos processos de alteração sobre os jaspilitos, tratando-se, portanto, de rochas que composicionalmente são empobrecidas em U, K e Th, o que é confirmado pela baixa intensidade de radiação no perfil gama natural.

A densidade no perfil gama-gama varia entre 2,1 g/cm³ e 3,5 g/cm³ com predomínio de valores acima de 2,5 g/cm³. Embora sejam valores altos, não são uniformes. Além do caráter friável, essa rocha tem porosidade média e as variações de densidade podem ser explicadas pela interação entre o caráter friável somado à porosidade e pela composição rica em ferro, que naturalmente eleva a densidade.

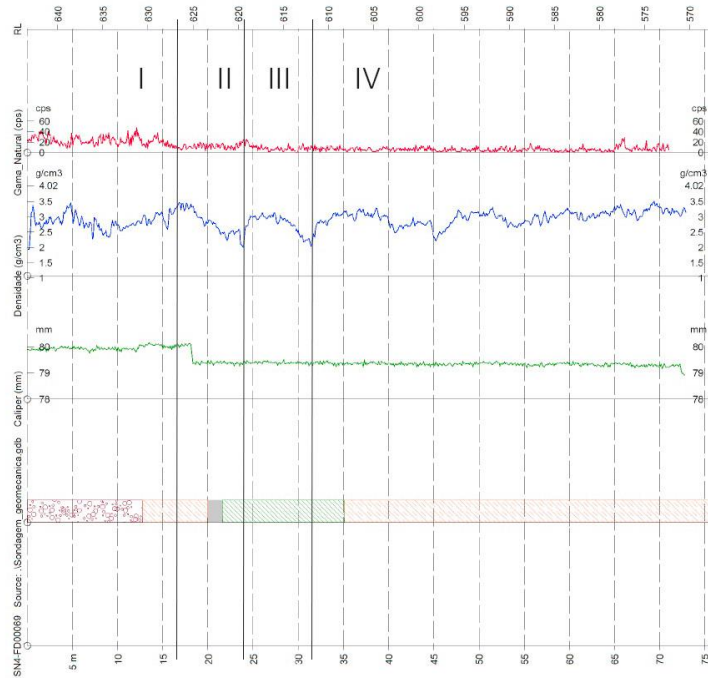
Padrão III: começa a aproximadamente 24 m e termina em 33 m e é composto de rocha máfica decomposta, de acordo com a descrição do testemunho de sondagem. No perfil gama natural observa-se pequena variação. O valor mínimo obtido é de 0 cps enquanto o valor máximo é de 21 cps. Possivelmente a composição máfica, somado ao grau de decomposição explique os baixos valores de radiação natural apontados neste perfil.

O perfil gama-gama mostra sutis variações na densidade – com mínima de 2,1 g/cm³ e máxima de 3,1 g/cm³. Teoricamente, corpos máficos tem como característica a elevada densidade. No entanto, trata-se de um pacote de rochas que se encontra muito alterado e foi descrito como friável e com baixa porosidade (quadro 5). Por outro lado, possui níveis de hematitito friável, resultando em um aumento da densidade. O topo deste intervalo está a 25 m enquanto a base está a 37 m.

Padrão IV: situado entre 33 m e 75m. Pela descrição do testemunho de sondagem, neste intervalo encontra-se o final do pacote de máfica decomposta e novo pacote de hematitito friável. No perfil gama natural há pequena variação. Apresenta 0 cps como valor mínimo e 25 cps como valor máximo. Composicionalmente rico em ferro, dada a presença de hematita e níveis de rocha máfica decomposta. Possivelmente empobrecido em U, K e Th. Portanto, com a baixa proporção destes 3 últimos elementos, é esperado que haja baixa intensidade na radiação do perfil gama natural.

O perfil gama-gama tende a ser mais uniforme. Atinge o pico de 3,5 g/cm³ de densidade e a mínima de 2,3 g/cm³. Assim como no padrão II, espera-se que hematititos sejam marcados pela elevada densidade. No entanto, os baixos valores de densidade podem ser explicados por conta da presença de níveis de máfica decomposta e o caráter friável (quadro 5). Este hematitito é o último pacote de rochas do perfil.

SN4-FD00069



Padrão	Gama natural Max (cps)	Gama natural Min (cps)
I	45	3
II	25	1
III	21	0
IV	25	0
Padrão	Gama-gama Max (g/cm³)	Gama-gama Min (g/cm³)
I	3,5	1,9
II	3,5	2,1
III	3,1	2,1
IV	3,5	2,3








-  Canga
-  Máfica decomposta
-  Hematitito friável
-  Sem recuperação
-  Caliper
-  Gama-gama
-  Gama natural



Figura 27 - Striplog para do furo SN4-FD00069, com os três perfis integrados.

Quadro 5 - Descrição do testemunho de sondagem, para o furo SN4-FD00069.

SN4-FD00069				
Litologia	Descrição	Minerais	Características Físicas	Observações
Canga	Material compacto, hidratado, de cor cinza avermelhado escuro, com estrutura maciça.	Goethita, hematita, argilominerais e martita.	Porosidade média, inexistente, contato inferior brusco.	CG (CM) ,com cavidades de dissolução (cm a mm) , com fragtos irregulares e de hm/mt. A partir de 5,30m predomina coloração avermelhada.
Hematitito Friável	Material friável, hidratado, de cor cinza alaranjado escuro, com estrutura maciça.	Hematita,goethita, martita e argilominerais	Porosidade média, inexistente, contato inferior não observado	Localmente, observa-se fragtos placoides de hematita, bem como, coloração laranja-avermelhado.
Sem recuperação				
Máfica Decomposta	Material friável, muito hidratado, de cor vermelho acinzentado escuro.	Argilominerais e hematita.	Porosidade baixa, inexistente, contato inferior gradacional.	Presença de níveis de HF e hidratada associada a MD.
Hematitito Friável	Material friável, hidratado, de cor cinza avermelhado escuro.	Hematita, argilominerais, martita e goethita.	Porosidade baixa, inexistente, contato inferior não observado.	HF com intercalações de MD

7.3.2 Furo SN4-FD00070

Segundo a campanha de sondagem geológica e perflagem geofísica, a cota inicial do furo é de 643,20 m. A máxima profundidade atingida é de 35 m. Pela descrição do testemunho de sondagem (quadro 6), conta com 3 litotipos: canga ou crosta laterítica, rocha máfica decomposta e hematitito friável ou hematita friável. A interpretação será feita de forma análoga ao furo SN4-FD00069.

Padrão I: inicia-se na superfície e se estende até aproximadamente 12 m. Na descrição, este intervalo é composto por canga detrítica (figura 28 e quadro 6). O perfil gama natural apresenta elevada variação. Atinge a máxima de 45 cps e a mínima de 5 cps, com predomínio de valores em torno de 30 cps. Tamaña variação pode ser explicada pela presença da matriz argilosa e o caráter muito hidratado (quadro 6), ou seja, possivelmente essa matriz argilosa fornece os altos valores para a radioatividade natural.

O perfil de densidade varia com grande amplitude. Predominam valores acima de 2,5 g/cm³. O pico de densidade é 3,8 g/cm³ enquanto a mínima é de 1,6 g/cm³. Esta canga é descrita como compacta (quadro 6). Resulta em aumento da resistência mecânica, bem como aumento da densidade. No entanto, o mesmo intervalo apresenta valores muito baixos para a densidade. Tais valores baixos são explicados por: presença de cavidades, elevado grau de fraturamento e alta porosidade (quadro 6). A descrição do testemunho aponta que o topo do pacote de canga está na superfície do terreno enquanto a base está a 12 m.

Padrão II: começa a 12 m e segue até aproximadamente 20 m. A descrição do testemunho de sondagem aponta que este intervalo corresponde a um pacote de hematitito friável. O perfil gama natural (figura 29) varia com pequena amplitude. Prevalece na faixa de 20 cps com máxima de 41 cps e mínima em 3 cps. De acordo com o quadro 6, este hematitito friável não possui argilominerais – possíveis fontes de K, U e Th, o que explica baixos valores de gama natural.

O perfil de densidade tem alta variação. Atinge a máxima densidade de 3,6 g/cm³ e a mínima de 1,5 g/cm³. Para um hematitito, é esperado que se obtenha altos valores de densidade – efeito da abundância de ferro em sua composição. Sugere-se que os valores menores apareçam por conta do alto grau de fraturamento e pela porosidade alta (quadro 6). Pela descrição do testemunho, este intervalo tem topo a 12m e base a 20 m.

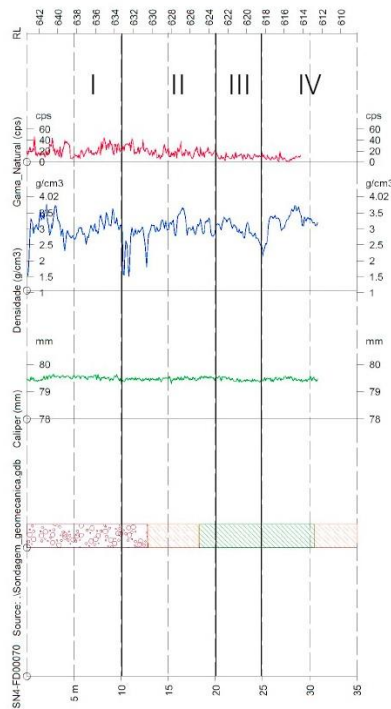
Padrão III: compreendido entre 20 m e aproximadamente 25 m. De acordo com a descrição do testemunho de sondagem, neste intervalo encontra-se o pacote de máfica decomposta. O perfil gama natural varia com pequenas amplitudes. A máxima é de 20 cps enquanto a mínima é de 0cps. Embora tenha argilominerais na composição, a radiação natural é baixa, de forma geral. Talvez o avançado

grau de alteração, o caráter hidratado e a presença de níveis de hematitito friável ratifiquem os baixos valores para emissão espontânea de radiação gama.

O perfil gama-gama varia com amplitude significativa. O pico de densidade atinge $3,7 \text{ g/cm}^3$ enquanto o mínimo valor é de $2,2 \text{ g/cm}^3$. É possível que esta rocha apresente densidade elevada por efeito da presença de níveis de hematitito friável e baixa porosidade (quadro 6). Mas um valor baixo como $2,2 \text{ g/cm}^3$ pode ser explicado por conta do caráter friável da rocha.

Padrão IV: inicia a 25m e segue até 35m. Pela descrição do testemunho de sondagem, neste intervalo há o contato entre a máfica decomposta e hematitito friável. Representa o final dos dados levantados ao longo dos perfis geofísicos. Há pouco sinal de resposta, tanto no perfil gama natural quanto no perfil gama-gama. Portanto, fica inviável tecer mais comentários sobre este padrão.

SN4-FD00070



Padrão	Gama natural Max (cps)	Gama natural Min (cps)
I	45	5
II	41	3
III	20	0

Padrão	Gama-gama Max (g/cm³)	Gama-gama Min (g/cm³)
I	3,8	1,6
II	3,6	1,5
III	3,7	2,2

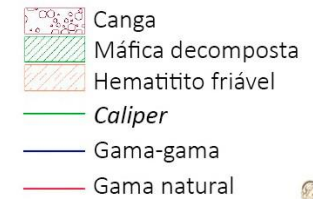


Figura 28 - Striplog para o furo SN4-FD00070, com os três perfis integrados.

Quadro 6 - Descrição do testemunho de sondagem, para o furo SN4-FD00070.

SN4-FD00070				
Litologia	Descrição	Minerais	Características Físicas	Observações
Canga	Material compacto, muito hidratado, de cor vermelho amarronzado escuro, com estrutura irregular.	Goethita, hematita, argilominerais e martita.	Grau de fraturamento alto, Porosidade alta, baixo, contato inferior gradacional.	Canga detrítica, matriz argilosa com fragmentos de agregados ferruginosos. Possui cavidades.
Hematitito Friável	Material friável, hidratado, de cor cinza amarronzado escuro, com estrutura laminada.	Hematita, magnetita e goethita.	Grau de fraturamento alto, Porosidade alta, granulometria do quartzo fina, médio, contato inferior brusco.	Hematitito contendo passagens de MD (sill).
Máfica Decomposta	Material friável, muito hidratado, de cor marrom escuro.	Argilominerais e hematita.	Porosidade baixa, baixo, contato inferior brusco.	Rocha vulcanica completamente alterada apresentando passagens de hematitito friável.
Hematitito Friável	Material friável, hidratado, de cor preto acinzentado escuro, com estrutura laminada.	Hematita, magnetita e óxidos de manganês.	Grau de fraturamento alto, Porosidade alta, granulometria do quartzo fina, médio.	

7.3.3 Furo SN4-FD00071

O furo SN4-FD00071 é o último a ser interpretado. A cota inicial é de 636,30 m e atinge uma profundidade de 35m. Composto por um total de três litologias (figura 29 e quadro 7): canga, hematitito friável e hematitito contaminado friável. Esta última litologia não fora descrita nos furos anteriores. A interpretação seguirá o mesmo modelo dos furos SN4-FD00069 e SN4-FD00070.

Padrão I: inicia na superfície e se prolonga até cerca de 5,5 m. Pela descrição do testemunho de sondagem, este intervalo tem o pacote de canga detrítica (quadro 7). O perfil gama natural varia com grande amplitude – tem pico em 75 cps e mínima em 10 cps. Valores tão altos de radioatividade natural estão ligados a presença de elementos com elevada emissão espontânea de radiação gama – K, U e Th. A provável fonte para estes elementos são os argilominerais presentes na composição da rocha.

O perfil gama-gama varia com significativa amplitude. A densidade atinge o pico de 3,3 g/cm³ e mínima de 1,6 g/cm³. Tal valor mínimo chama atenção por estar próximo da superfície. Pelo quadro 7, a canga neste intervalo é semi compacta, sem cavidades de dissolução e com alto grau de fraturamento. Possivelmente este último aspecto justifica os valores menores de densidade.

Padrão II: compreendido entre 5,5 m e 20 m. Representado no testemunho de sondagem pelo hematitito contaminado friável. No perfil gama natural a variação tem grande amplitude. O máximo valor de gama natural é de 43 cps, enquanto o valor mínimo é de aproximadamente 3 cps. Pela descrição do testemunho de sondagem, o hematitito contaminado friável é uma rocha que conta com argilominerais em sua composição, logo, é de se esperar que haja U, K e Th em sua composição e encontrar altos valores para o perfil gama natural.

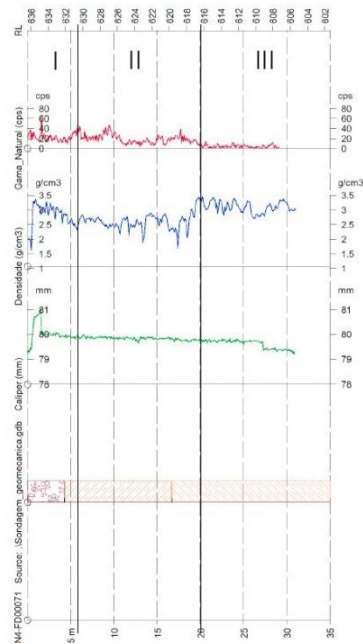
O perfil de densidade oscila com amplitude significativa. A máxima densidade é de 3,3 g/cm³ e a mínima é de 1,7 g/cm³. Tratando-se de um material friável, é plausível esperar baixos valores de densidade. Segundo a descrição do testemunho de sondagem (quadro 7), esta rocha tem alto grau de fraturamento e neste intervalo encontram-se níveis de rocha máfica decomposta. É factível que a combinação entre o carácter friável, o grau de fraturamento e o contraste litológico sejam responsáveis pelos baixos valores que podem ser observados no perfil. Em contraste, possivelmente os valores mais elevados são consequência da composição rica em hematita.

Padrão III: iniciado a 20 m e segue até 35 m, na parte final do furo, representado no testemunho de sondagem pelo hematitito friável. O perfil da gama natural

varia com amplitudes muito pequenas. Atinge o valor máximo de 18 cps enquanto o valor mínimo é de 0 cps. Predominam baixos valores de gama natural. É possível que isto seja justificado pela composição empobrecida em K, U e Th do hematítico.

O perfil gama-gama varia com pequena amplitude. A máxima densidade é de 3,4 g/cm³ enquanto a mínima é de 2,6 g/cm³. Possivelmente o alto grau de fraturamento explica os valores baixos. Além disso, pela descrição do testemunho de sondagem (quadro 7), há a ocorrência de um intervalo sem recuperação.

SN4-FD00071



Padrão	Gama natural Max (cps)	Gama natural Min (cps)
I	75	10
II	43	3
III	18	0
Padrão	Gama-gama Max (g/cm ³)	Gama-gama Min (g/cm ³)
I	3,3	1,6
II	3,3	1,7
III	3,4	2,6







 Canga
 Hematitito friável
 Hematitito contaminado friável
 Caliper
 Gama-gama
 Gama natural



Figura 29 - Striplog para o furo SN4-FD00071, com os três perfis integrados.

Quadro 7 - Descrição do testemunho de sondagem, para o furo SN4-FD00071.

SN4-FD00071				
Litologia	Descrição	Minerais	Características Físicas	Observações
Canga	Material semi-compacto, muito hidratado, de cor laranja amarronzado escuro, com estrutura irregular.	Limonita, goethita, argilominerais e magnetita.	Grau de fraturamento alto, porosidade alta, médio, contato inferior gradacional.	Canga Detrítica, matriz argilosa com fragmentos compactos ferruginosos (compostos por goethita, magnetita e hematita).
Hematitito Contaminado Friável	Material friável, muito hidratado, de cor marrom avermelhado escuro, com estrutura laminada.	Argilominerais, goethita, hematita e magnetita.	Grau de fraturamento alto, porosidade média, médio, contato inferior gradacional.	Hematitito contendo passagens de MD.
Hematitito Friável	Material friável, hidratado, de cor cinza amarronzado escuro, com estrutura laminada.	Hematita, magnetita, goethita e argilominerais.	Grau de fraturamento alto, porosidade alta, granulometria do quartzo fina, médio, contato inferior não observado.	Passagem SR de 30.85 a 32.15m.

7.4 Validação dos *striplogs*

O primeiro trabalho adicional à interpretação é exposto na seção 7.1, com as rochas descritas pelo mapeamento de bancadas. Estas informações foram aproveitadas por Barbosa (2018) ao trabalhar com dados de eletrorresistividade estudando rochas da mesma área. Na figura 30, encontra-se o produto final do autor citado, que propõe três zonas com contrastes de eletrorresistividade e correlaciona os litotipos associados às respectivas zonas.

Na porção mais superficial da seção elétrica, isto é, horizonte da crosta laterítica, predominam zonas de alta eletrorresistividade (ZAR), caracterizadas por valores de eletrorresistividade acima de 2718 ohm.m e representadas pelas variedades de canga (CLD, CLFA e CLF), enquanto no horizonte de transição ocorrem zonas de alta eletrorresistividade (representadas por CLD, FFL e LFA) e zonas de eletrorresistividade intermediária (ZIR), (representadas por LFA e FFL), com valores de resistividade entre 761 e 2718 ohm.m. Ocorrem também nesse horizonte algumas zonas de baixa resistividade (ZBR), com valores abaixo de 761 ohm.m.

A escolha dos furos SN4-FD00069, SN4-FD00070 e SN4-FD00071 foi baseada principalmente na proximidade entre a localização dos mesmos e da cavidade N4E-0026. Outro fator que levou a essa escolha foi a disponibilidade de conhecimento prévio acumulado para essa área. Em arranjo paralelo aos furos de sondagem, a seção elétrica citada anteriormente (figura 31) estava disponível e devido à sua proximidade com os furos de sondagem escolhidos, foi possível comparar os resultados da seção de eletrorresistividade com a perfilagem geofísica. A seção elétrica reafirma os contrastes litológicos também observados pela perfilagem geofísica.

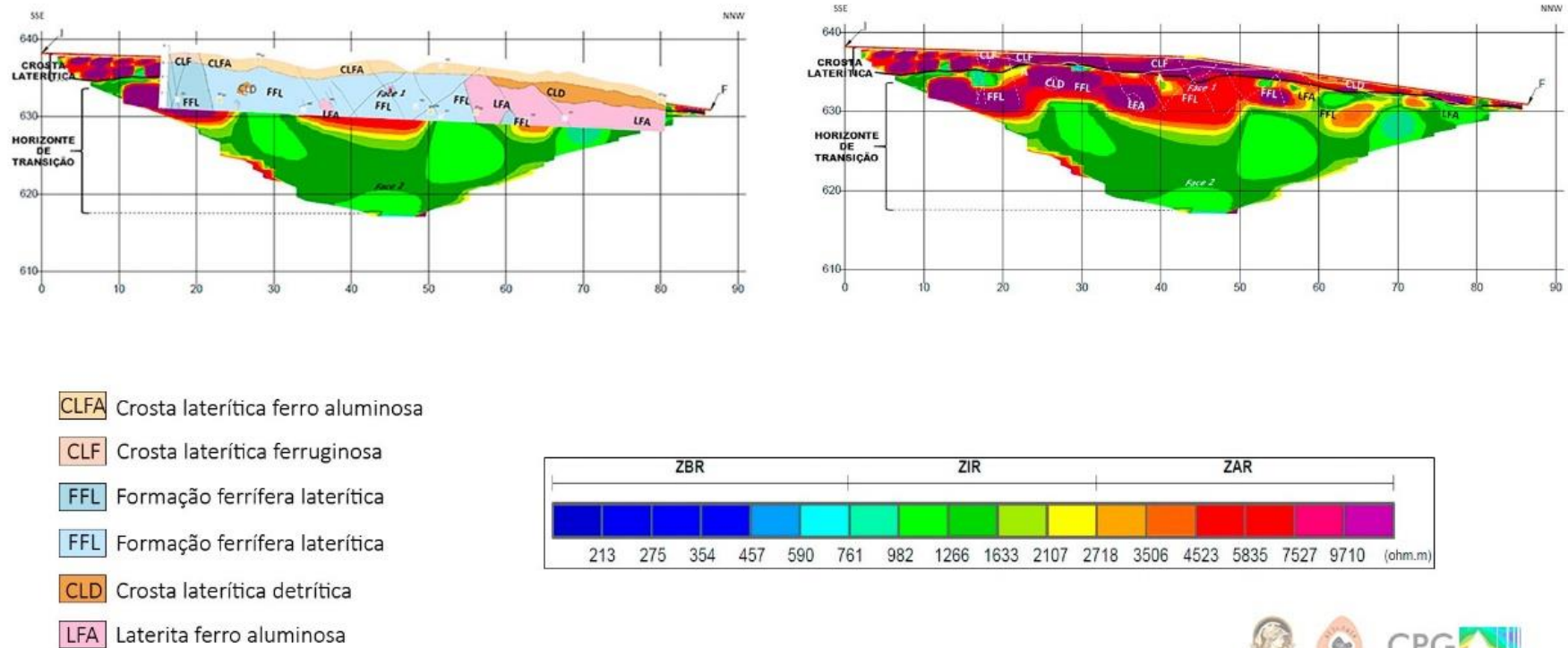


Figura 30 - Comparação entre a seção elétrica interpretada e seção geológica feita durante o mapeamento de bancadas.



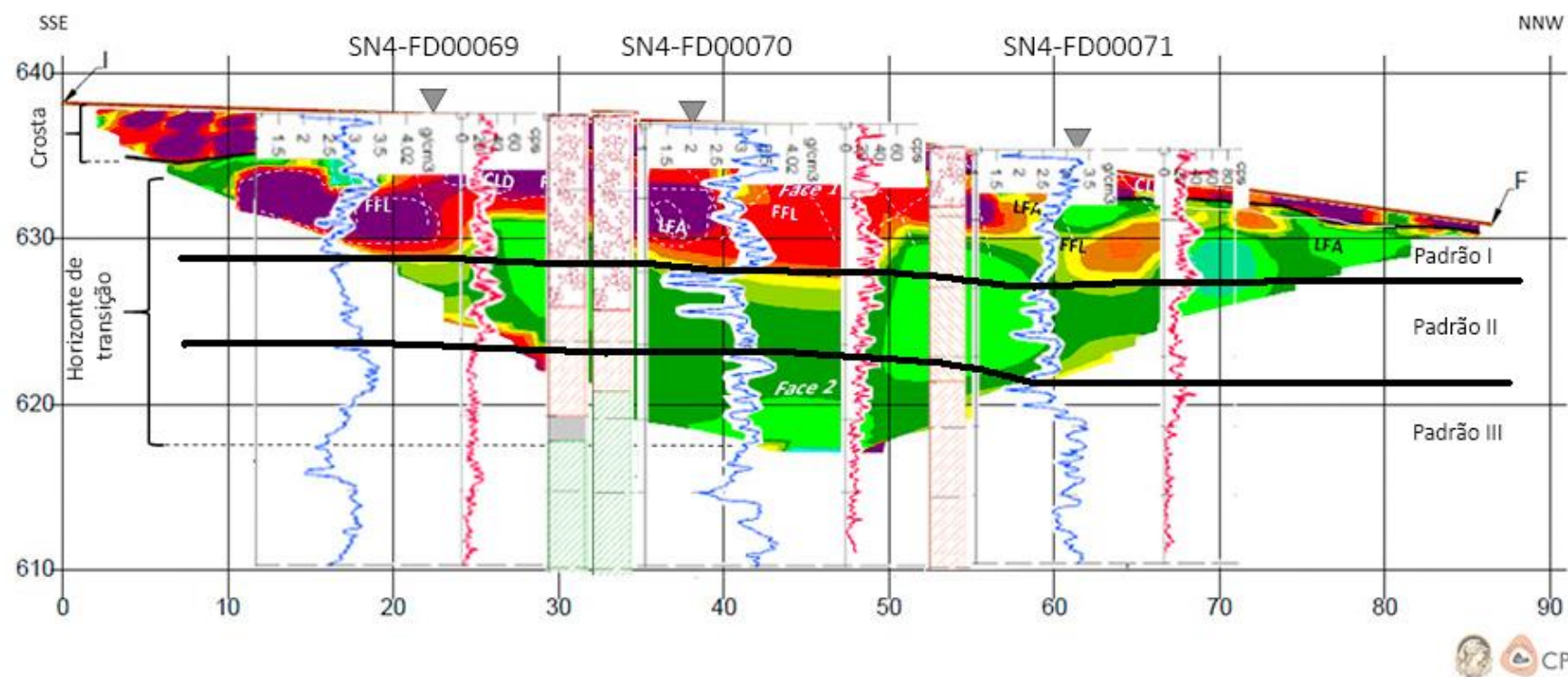


Figura 31 - Comparação entre a seção elétrica interpretada e a posição dos furos perfilados.

8 Discussões

Baseado no perfil gama-gama, pôde-se reconhecer tendências no comportamento da densidade nas rochas identificadas. A média de densidade nos hematititos apresenta um comportamento menos variado conforme indicado na tabela 4 (furo SN4-FD0069 – padrões II e IV; furo SN4-FD0070 – padrões II e III e furo SN4-FD0071 – padrão III), exceto no furo SN4-FD0071 – padrão II. Já os menores valores de densidade (entre 3,1 e 2,1 g/cm³ - padrão III furo SN4-FD0069 e entre 3,7 e 2,2 g/cm³ - padrão III furo SN4-FD0071), geralmente estão associados à rocha máfica decomposta (ver figuras 27, 28 e 29).

Massa específica média do hematitito (g/cm³)	
SN4-FD00069 (padrão II)	2,8
SN4-FD00069 (padrão IV)	2,9
SN4-FD00070 (padrão II)	3,2
SN4-FD00070 (padrão III)	3,4
SN4-FD00071 (padrão II)	2,3
SN4-FD00071 (padrão III)	2,9

Tabela 4 - Massa específica média para os hematititos.

Essa observação é correlacionável com a descrição desta rocha: muito alterada, fragmentada e sem cavidades de dissolução. Exceto nos casos onde há máfica decomposta com níveis de hematitito, têm-se pontos localizados onde a densidade é mais elevada.

Os valores mais elevados de densidade no perfil gama-gama estão associados aos padrões representados por litotipos ferruginosos. A canga deveria ser mais densa que os demais litotipos, na maioria dos casos. Mas em nenhum dos furos, a canga é a litologia mais densa. Tal ocorrido pode ser justificado com base no compilado das descrições (quadros 5, 6 e 7) de canga: altamente intemperizada, desagregada, porosa, fraturada e com presença de cavidades de dissolução. A interação entre estes fatores torna razoável a presença de pontos restritos com valores menores para a densidade.

As pequenas variações no perfil *caliper* permitem afirmar a qualidade das rochas e da campanha de sondagem. A presença de cavidades é constatada primeiramente pela descrição dos testemunhos de sondagem. Isto ocorre na canga, na descrição dos furos SN4-FD00069 e SN4-FD00070 (quadros 5 e 6, respectivamente). São descritas como cavidades de dissolução, com tamanhos variando de milímetros a centímetros.

A representação gráfica do furo SN4-FD00069 possui um intervalo sem recuperação. Possivelmente isto acusa a presença de uma cavidade de dissolução. Como evidência, têm-se uma brusca queda no valor da densidade no perfil gama-gama (ver figura 27), aproximadamente no final do padrão II.

Situação parecida pode ser observada no furo SN4-FD00071(figura 29). A descrição do intervalo (quadro 7) final indica a presença de um trecho sem recuperação, entre 30,85 m a 32,15 m, próximo da metade do padrão IV. De forma análoga, o perfil gama-gama (figura 29) mostra uma queda no valor da densidade. É possível que estas duas evidências estejam acusando cavidades, rochas fraturadas e rochas friáveis.

9 Conclusões

Individualmente, a perfilagem apresenta bons resultados. Os perfis gama-gama e gama natural foram mais relevantes para reconhecer contrastes e separar os padrões para interpretação.

Combinado com a sondagem mostraram-se como ferramentas úteis na caracterização das rochas ferruginosas. Isto é: reconhecer mudanças litológicas, descrever propriedades físicas das rochas e apontar possíveis zonas de fraqueza. Com isso, é possível deduzir que as zonas reconhecidas pela fragilidade estrutural coincidem com as zonas de baixa densidade, onde os processos de dissolução ocorrem com maior intensidade.

A representação gráfica dos testemunhos de sondagem (figuras 27, 28 e 29) é importante, mas é possível que haja divergência entre as relações de contato e espessura das rochas, a partir das descrições de diferentes geólogos, com as assinaturas expostas nos perfis geofísicos (figura 32). Por esta razão, nem sempre os padrões e intervalos sugeridos na interpretação respeitavam os limites litológicos observados nos testemunhos.

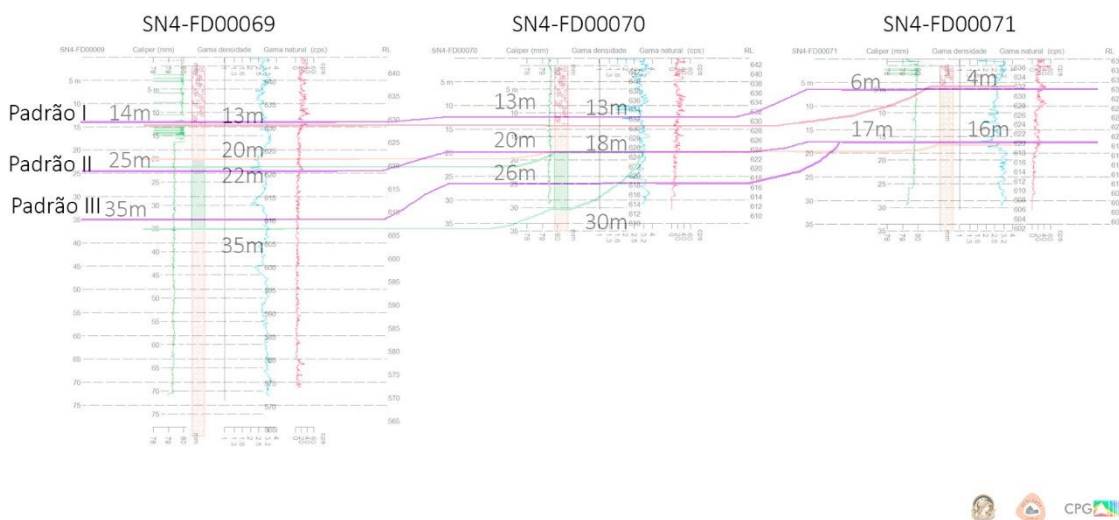


Figura 32 - Comparativo com a espessura das camadas segundo os dados de campo e padrões geofísicos. As curvas em roxo representam os padrões geofísicos.

Os resultados da perfilagem corroboram zonas de fraqueza estrutural já apontadas em dados de contraste de eletrorresistividade, trabalhados por Barbosa (2018). Segundo o mesmo autor, o tipo de contraste resistivo (ZBR x ZAR; ZBR x ZIR) entre as rochas é indicativo de instabilidade. Tal semelhança permitiu que fosse traçada uma correlação entre os perfis geofísicos e a linha de eletrorresistividade. No entanto, na seção aqui utilizada (figura 30) há apenas uma ocorrência de contraste entre ZAR x ZBR.

Outro fator igualmente importante apontado por Barbosa (2018) é o contraste angular. Isto é, uma mudança geométrica no padrão da assinatura elétrica da rocha. Por exemplo, sub-horizontal para sub-vertical. Geralmente esta situação é condicionada por: contato entre dois litotipos ou presença de descontinuidades (falhas, fraturas, microcavidades etc.). Somado aos contrastes de eletrorresistividade, é um possível indicador de instabilidade estrutural. Na referida seção (figura 30), é possível perceber que a presença do contraste angular predomina sobre o contraste resistivo. Provavelmente as zonas com contraste de eletrorresistividade e contraste angular, também são zonas com contraste de propriedades radioativas e de densidade.

Este tipo de informação complementa outras vertentes da investigação tais como análise litoestrutural e mapeamento geológico-geotécnico aplicado à investigação de cavernas. Isto é suficiente para afirmar a aplicabilidade da perfilagem geofísica no que diz respeito a identificação e reconhecimento de localidades com instabilidade estrutural e maior vulnerabilidade aos processos intempéricos.

A utilização da perfilagem no estudo de cavernas é uma iniciativa pioneira. Na literatura, as abordagens mais tradicionais envolvem uma combinação de métodos geofísicos (ex: Chalikakis *et al.*, 2011 e Putiska *et al.*, 2014). A pesquisa bibliográfica mostrou que na maioria dos casos, as cavidades estudadas foram desenvolvidas sob carste carbonático. Por isso, é provável que a perfilagem geofísica não apareça entre os métodos sugeridos. Quando testada em carste desenvolvido sob rochas ferruginosas, a perfilagem teve um desempenho bem-sucedido. Contudo, o método não é capaz de prospectar com precisão novos ambientes cavernosos no interior das rochas.

Esta metodologia utilizando um conjunto de métodos geofísicos para estudo e monitoramento de cavernas na região de Carajás é experimental. Foi realizada primeiramente na cavidade N4E-0026. Diante dos resultados positivos de todos os métodos, recomenda-se que quando possível a perfilagem geofísica seja também utilizada no estudo de outras cavidades e seus entornos.

10 Referências

ABREU, S. *et al.* 2016. Geologia e petrografia de formações ferríferas com ênfase na gênese de cavidades em Serra Norte, Carajás-PA. *Espeleo-tema*. v. 27, n1: 33-44.

ARAÚJO, O. J. B. de e MAIA, R. G. N. 1991. Serra dos Carajás, folha SB. 22-ZA, Estado do Pará. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

AULER, A. *et al.* 2014. Hypogene cave patterns in iron ore caves: Convergence of forms or processes? In: KLIMCHOUK, A. *et al.* *Hypogene cave morphologies*. Kart Waters Institute, Special Publication, p. 15-19.

BARBOSA, M. R. 2009. *Suscetibilidade de incêndios na Floresta Nacional de Carajás, PA: Integração de dados paleambientais e dados atuais por satélite à luz do geoprocessamento*. Programa de Pós-graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 109 p.

BARBOSA, M. R. 2018. *Geofísica Espelológica – Metodologia para aplicação de eletrorresistividade na investigação de instabilidade litorestrutural de teto em cavidades ferríferas. Caverna N4E-0026, mina N4E, Carajás, Pa, Brasil*. Programa de Pós-graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Relatório final de pesquisa de pós-doutorado, 92 p.

BASSIOUNI, Z. e RHEA Jr, J. 1994. *Theory, measurement, and interpretation of well logs*. Texas, Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers, 1994.

BEISIEGEL, V. D. R. *et al.* 1973. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. *In: Revista Brasileira de Geociências*, v. 3, n. 4, : 215-242.

BRAGA, A. A. J. *et al.* 2017. Influência estrutural sobre cavernas em formações ferríferas, Carajás-PA. *Revista Geonomos*, v. 25, n. 1: 24-39.

BRAGA, M. A. 2009. *Aplicação de Aerogradiometria Gravimétrica 3D-FTG na Prospecção de Minério de Ferro no Quadrilátero Ferrífero (MG) e Modelagem 2D e 3D para Estimativa de Massa do Depósito de Ferro de N1 em Carajás (PA)*.

Programa de Pós-graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 271 p.

Brasil. Agência Nacional de Mineração. 2018. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas / Coord. Geral Osvaldo Barbosa Ferreira Filho; Equipe Técnica por Marina Dalla Costa *et al.*; – Brasília: ANM, 34 p.

BRITO NEVES, B. B. e CORDANI, U. G. 1991. Tectonic evolution of South America during the late Proterozoic. *Precambrian Research*, v. 53, n. 1-2: 23-40.

CHALIKAKIS, K. *et al.* 2017. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*, v. 19, n. 6,: 1169-1180.

CHOPRA, P. *et al.* 2002. Geophysical well logging. *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration. CRCLEME Open File Report*, v. 144,: 105-115.

CUNHA JR, W. R. *et al.* 2007. Estudos espeleológicos na serra dos Carajás, município de Parauapebas-PA. *In: Anais do 29º Congresso Brasileiro de Espeleologia, Ouro Preto- MG*, p. 97-103.

DOCEGEO, Equipe-Distrito Amazonia; AMAZÔNIA, Distrito. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. *In: Província Mineral de Carajás–Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. Anexo do 35º Congresso Brasileiro de Geologia (Belém)*, p. 11-56.

DUTRA, G. M. 2013. Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro. *In: Anais do 32º Congresso Brasileiro de Espeleologia. Barreiras-BA*, p. 415-426.

ELLIS, D. V. e SINGER, J. M. 2017. *Well logging for earth scientists*. Dordrecht: Springer, 692 p.

GEOSOL, EQUIPE. 2013. Perfilagem Geofísica. Resumo Técnico. Disponível em:< http://www.geosol.com.br/wp-content/uploads/2013/05/resumo_tecnico_perfilagem.pdf >

GIBBS, A. K. *et al.* 1986. Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, n. 2: 201-211.

GONÇALVES, D. F. *et al.* 2011. Aspectos morfológicos de espeleotemas em feições pseudocársticas da região de Carajás-PA. *In: Anais do 31º Congresso Brasileiro de Espeleologia*, Ponta Grossa-PR, p.141-145.

GRIMES, K. G. e SPATE, A. 2008. Laterite karst. *ACKMA Journal*, v. 73,: 49-52.

HALLIDAY, D. *et al.* 2012. *Fundamentos de Física: Volume 4: Óptica e Física Moderna*. Rio de Janeiro, LTC. 9ª Edição. 420 p.

KOTSCHUBÉY, B. e LEMOS, V. P. 1985. Considerações sobre a origem e a gênese das bauxitas da Serra dos Carajás. *In: SIMP. GEOL. DA AMAZÔNIA*, v. 2, p. 48-61.

KOTSCHUBÉY, B. 1989. Preliminary study of aluminous laterites and bauxites from the Serra Norte (Carajas mineral province), Northern Brazil. *Travaux Comité Intern. Etude Bauxites*, v. 19, n. 22,: 95-103.

LINDENMAYER, Z. G. *et al.* 2001. Considerações sobre a origem das formações ferríferas da Formação Carajás, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 31, n. 1,: 21-28.

LOBATO, L. M. *et al.* 2005 A. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás-Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. *In: ADIMB/DNPM. Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília: DNPM-CT/MINERAL-ADIMB, p. 25-92.

LOBATO, L. M. *et al.* 2005 B. Hydrothermal origin for the iron mineralisation, Carajás province, Pará State, Brazil. *In: Iron Ore 2005 Proceedings*, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Perth, Australia Publication Series 8, p. 99-110.

MACAMBIRA, J. B. 2003. *O Ambiente Depositional Da Formação Carajás e Uma Proposta de Modelo Evolutivo Para a Bacia Grão Pará*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Estadual de Campinas, Tese de Doutorado, 217p.

MAURITY, C. W. e KOTSCHOUBEY, B. 1995. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1-Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. *Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi. Série Ciências da Terra*, v. 7, p. 331-362.

MEIRELLES, M. R. e DARDENNE, M. A. 1991. Vulcanismo basáltico de afinidade shoshonítica em ambiente de arco arqueano, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás-Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, n. 1, : 41-50.

PAIXÃO, M. A. P. *et al.* 2008. The Neoproterozoic Quatipuru ophiolite and the Araguaia fold belt, central-northern Brazil, compared with correlatives in NW Africa. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 294, n. 1, p. 297-318.

PEREIRA, R. M. P. 2009. *Geologia da região Sul da Serra Norte e características do minério de ferro do Depósito N8, Província Mineral Carajás*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 143 p.

PILÓ, L. B. 2000. Geomorfologia cárstica (Revisão de Literatura). *Revista brasileira de geomorfologia*, v. 1, n. 1, : 88-102.

PILÓ, Luís B. e AULER, A. 2009. Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. *In: Anais do 30º Congresso Brasileiro de Espeleologia*, Montes Claros-MG, p. 181-186.

PINHEIRO, R. V. L. e HOLDSWORTH, R. E. 2000. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Craton Amazônico, Pará. *Revista Brasileira de Geociências.*, v. 30, n. 4, : 597-606.

PUTIŠKA, R. *et al.* 2014. Integrated geophysical and geological investigations of karst structures in Komberek, Slovakia. *Journal of Cave & Karst Studies*, v. 76, n. 3.: 155–163

ROSIÈRE, C. A. *et al.* 2006. Structure and iron mineralisation of the Carajás Province. *Applied Earth Science*, v. 115, n. 4, : 126-133.

RUCHKYS, U. A. *et al.* 2015. *Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas. Propostas para sua conservação no quadrilátero ferrífero, Minas Gerais.* Campinas, São Paulo. Sociedade Brasileira de Espelologia. 341 p.

SANTOS, J. O. S. dos. 2003. Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil-Central. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil (texto, mapas & SIG). Brasília, Serviço Geológico do Brasil–CPRM/MME, p. 169-226.

SERRA, O. E. 1983. *Fundamentals of well-log interpretation.* Springer. 435 p.

SILVA, M. G. *et al.* 2014. Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras. CPRM. 589 p.

SOUZA, C. I. J.; KOTSCHOUBEY, B. 1991. Alguns aspectos micromorfológicos e gênese da cobertura residual sobre as rochas sedimentares da aba norte da Serra dos Carajás-Pará. *In: SBG/Núcleo Norte, Simp. Geol. Amaz*, v. 3, p. 569-583.

TALLARICO, F. H. B. *et al.* 2005. Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: An Archean (2.57 Ga) example of iron-oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization. *Economic Geology*, v. 100, n. 1, : 7-28.

TAVARES, F. M. 2015. *Evolução geotectônica do nordeste da Província Carajás.* Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 143p.

TEIXEIRA, J.B.G. e LINDENMAYER, Z. G. 2012. Serra dos Carajás. *In: Hasui, Y. et al. Geologia do Brasil.* Beca, p. 176-183.

TELFORD, W. M. 1990. *Applied geophysics.* 2ª Ed. Cambridge university press. 792 p.

TOLBERT, G. E. *et al.* 1971. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, northern Brazil. *Economic Geology*, v. 66, n. 7,: 985-994.

VALE, Equipe. 2017 Definição dos parâmetros geotécnicos/geomecânicos de perfis de intemperismo em Serra Norte, Carajás. Relatório interno, 72p.

VALENTIM, R. F e OLIVITO, J. P. R. 2011. Unidade Espeleológica Carajás: delimitação dos enfoques regional e local, conforme metodologia da IN-02/2009 MMA. *Espeleo-tema*, v. 22, n. 1,: 41-60.

VASCONCELOS, P. M. *et al.* 1994. Direct dating of weathering phenomena by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar analysis of supergene K-Mn oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 58, n. 6,: 1635-1665.

WEATHERFORD, EQUIPE. 2015. Slimline Capabilities. Resumo Técnico. Disponível em:<https://www.aseg.org.au/sites/default/files/Weatherford_Slimline_Capabilities.pdf >

WINGE, M. *et. al.* 2001. Glossário Geológico Ilustrado. Acessado na Internet em 29 de novembro de 2018 no site <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>

ZUCCHETTI, M. 2007. *Rochas máficas do Supergrupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Tese de Doutorado, 166p.