



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Pós-Graduação em Geologia

Dissertação de Mestrado
Área de Concentração: Prospecção e Geologia Econômica

INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS, GEOQUÍMICOS, ESPECTRORRADIOMÉTRICOS
E DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE ROCHA: O ESTUDO DE CASO DO CORPO N5S,
PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS.

Halana Sales Pereira.
Dissertação de Mestrado n°393

Orientadora: Profa. Dra. Catarina L. B. Toledo
Co-orientadora: Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

Março de 2017

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS, GEOQUÍMICOS,
ESPECTRORRADIOMÉTRICOS E DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE ROCHA: O
ESTUDO DE CASO DO CORPO N5S, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS.**

HALANA SALES PEREIRA

Dissertação de mestrado elaborada junto ao curso de Pós-Graduação em Geologia (Área de concentração em Geologia Econômica), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Catarina Labouré Bemfica Toledo

Co-orientadora: Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

Banca examinadora:

Profa. Dra. Catarina Labouré Bemfica Toledo (Presidente)

Prof. Dr. Joel Buenano Macambira (IG-UFPA)

Prof. Dr. Augusto César Bittencourt Pires (IG-UnB)

BRASÍLIA - DF

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Pereira, Halana Sales

Integração de dados Geológicos, Geoquímicos, Espectrorradiométricos e de Propriedades Físicas De Rocha: O estudo de caso do Corpo N5S, Província Mineral De Carajás – Brasília, 2017.

Nº de páginas: 150

Área de concentração: Geologia Econômica e Prospecção Mineral

Orientadora: Profa. Dra. Catarina Labouré Bemfica Toledo

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, José Henrique e Tércia por sempre incentivarem minha formação profissional, pessoal e acadêmica, pelo apoio, amor incondicional, respeito e confiança, e aos meus irmãos, Bruno e Renan, por sempre estarem ao meu lado me apoiando. Dedico a vocês, juntamente com minha orientadora (Catarina), esta dissertação de mestrado.

Agradeço em especial às minhas orientadoras Profas. Dr. Catarina L. B. Toledo e Adalene Moreira Silva pela convivência, orientações, correções, pela paciência, confiança e ensinamentos ao longo da produção deste trabalho.

Aos Profs. Dr. Diego Fernando Ducart (Unicamp) e Luís Fernando Martins Ribeiro (FT- UnB) pelas contribuições a este trabalho e pelas enriquecedoras discussões.

Aos amigos de profissão João Paulo Gomes de Souza, Vitor Nascimento Ferreira e Pedro Luiz Gomez Martins que auxiliaram no trabalho e nos conhecimentos geofísicos e geológicos da região de estudo, sem os quais este caminho teria sido mais difícil.

Ao Instituto de Geociências representado aqui pelos professores e funcionários e à Universidade de Brasília pela oportunidade de realizar este trabalho, bem como o apoio ao longo de todo o curso de mestrado.

Ao CNPQ pela concessão da Bolsa de mestrado e pelos auxílios à pesquisa concedidos tanto durante as etapas e usos de laboratórios, a Vale. S.A pelo apoio nas etapas de campo, coleta de material e no custeio das análises químicas.

Não esquecendo ainda dos amigos, especialmente Hiromi Nakashima, Natália Mota Silva, Túlio Marques, Márcio Albuquerque, Steffano Paz e Caio Aguiar que participaram e apoiaram a caminhada desta fase da minha vida.

"The future belongs to those who believe in the beauty of their dreams."

Eleanor Roosevelt.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	6
Índice de Figuras	8
Índice de Tabelas	13
Resumo	14
Abstract	16
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	17
I.1. Estruturação da Dissertação	18
I.2. Apresentação e Justificativas	18
I.3. Localização.....	19
I.4. Objetivos	20
I.5. Materiais e Métodos	21
I.5.1. Aerogeofísica	21
I.5.2. Amostragem e Petrografia	24
I.5.4. Espectrometria de reflectância.....	27
I.5.5. Propriedades Físicas de Rocha.....	31
I.5.5.1. Susceptibilidade Magnética.....	32
I.5.5.2. Gamaespectrometria.....	34
I.5.5.3. Densidade	35
I.5.6. Software	40
CAPÍTULO 2 – ARTIGO CIENTÍFICO	42
“THE FOOTPRINT OF THE N5S IRON ORE DEPOSIT IN SIERRA NORTE BASED ON MULTI SOURCE DATA, CARAJÁS MINERAL PROVINCE, BRAZIL”.....	42
Abstract	42
1. Introduction.....	44
2. Geological settings and iron deposits in the Carajás Mineral Province	45
2.1. Geological Settings.....	45
2.2. Mineralization of iron	48
3. Materials and Methods	50
3.1. Sampling and fieldwork	50
3.2. Petrography	50
3.3. Geochemistry	51
3.4. Reflectance spectroscopy.....	51
3.5. Physical properties of rocks	52
3.6. Aerogeophysical Data	55
4. Results	57
4.1. Geology of N5S deposit	57
4.2. Geochemistry	62
4.3. Reflectance spectroscopy.....	64

4.4. Physical properties of rocks	71
4.5. Aerogeophysics	76
5. Data Integration and Discussion.....	80
6. Conclusion	86
7. Acknowledgements	88
8. References	88
9. Attachment	96
10. Appendix	97
CAPÍTULO III – DISCUSSÃO	105
CAPÍTULO IV – CONCLUSÕES	108
CAPÍTULO V – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
CAPÍTULO VI – APÊNDICES	121

Índice de Figuras

Figura I.1. Localização do corpo de minério N5S em relação a Serra Norte e ao Brasil e posicionamento dos furos de sondagem. Imagem obtida pelo ArcGis, Esri World Imagery	20
Figura I.2. Litotipos descritos nos testemunhos de sondagem dos furos N5S-F867, N5S-FH1099, N5S-F871, N5S-FH1103.	25
Figura I.3. Cálculos realizados para se obter o ferro férrico (Fe^{3+}) utilizando os dados do ferro ferroso (Fe^{2+}) e do ferro total (Fe_2O_3).	27
Figura I.4. Parâmetros espectrais obtidos pela média espectral das amostras coletadas no estudo de Prado et al. (2016).	28
Figura I.5. (A) Espectrorradiômetro de reflectância FieldSpec3HiRes® (ASD) com o cabo de fibra ótica; (B) Sonda de contato, que apresenta como fonte de luz uma lâmpada de halogênio.	29
Figura I.6. Valores de susceptibilidade magnética de vários tipos de rochas e dos principais minerais magnéticos com os valores mais comuns (Clark, 1997; in Dentith e Mudge, 2014).	33
Figura I.7. Equipamento MPP-EM2S+ (Multi Parameter Probe) desenvolvido pela GDD INSTRUMENTATION INC utilizado para aquisição dos dados de susceptibilidade magnética.	34
Figura I.8. Gamaespectrômetro RS-320, fabricado pela Radiation Solutions, utilizado para aquisição dos dados radiométricos	35
Figura I.9. Boxplot dos valores dos radioelementos potássio, urânio e tório e da contagem total para os litotipos descritos por Ferreira (2014), no corpo N4WS	35
Figura I.10. Variação de densidade dos principais grupos de rochas conhecidos, com destaque para as rochas de estudo nos polígonos vermelhos (Dentith e Mudge, 2014).	36
Figura I.11. Balança de pesagem industrial IND560 com a base acoplável para medidas de massa em imersão	38
Figura I.12. Equipamentos utilizados na coleta da densidade do material friável (A) Pentapyc 5200e; (B) Balança SHIMADZU AUW2200	39
Fig. 1. Simplified geological map of the Carajás Mineral Province (Tavares, 2015). The polygon highlights the deposit of N5.	47
Fig.2. Geological map of the N5 body (Tolbert et al., 1971; Resende and Barbosa, 1972; Macambira, 2003). Landsat 8 satellite background image with Operational Land Imager (OLI) sensor, RGB composition. The location of the survey and the geological profile are indicated on the map.	49
Fig. 3. Geological section A-A' in the N5S body, following the nomenclature and description of the different types of rocks used by the company Vale S.A. The location of the profile on the map is in fig. 2	50
Fig. 5. Photomicrographs of the N5S gabbro. A. Intergranular preserved igneous texture, crossed nicols (Pl - plagioclase; Px - pyroxene). B. Subophytic domains, crossed nicols. C. Magnetite (Mag) is almost completely martitized, and hematite (Hem) may have thin lamellae of ilmenite (Il) exsolution (reflected light), with the presence of quartz (Qtz) and stilpnomelane (Est).	60
Fig. 6. Jaspilite photomicrographs of the N5S-F867 probes. A. Compositional primary bandage defined by the alternation of bands rich in hematite/magnetite and siliceous bands. B. Euhedral magnetite (Mag) crystals, totally or partially substituted by hematite (Hem), aligned parallel to the bundle. C. Euhedral crystals of martitized magnetite with goethite (Goe) nuclei with a colloform habit. D. Acicular, neo-formed, supergenetic hematite-3, interpreted as having grown in void spaces. Photomicrographs in reflected light	61

- Fig. 7. Scatter plots showing the geochemical variation as a function of the hole depth N5S-F871. The analyzed elements were SiO₂, Fe₂O₃, FeO, Al₂O₃, K₂O, MgO, Ti, P, Cr, Sc and ΣREE (Rare Earth Elements). 63
- Fig. 8. Stacking of reflectance spectra removed from the continuum of the samples containing iron (hydro-) oxides and phyllosilicates from the N5S deposit, including hematite (N5S-F867/150), goethite (N5S-FH1103/2), kaolinite (N5S (N5S-FH1099/168), illite / smectite (N5S-FH1010/170), gibbsite (N5S-FH1099/14), Fe-chlorite (N5S-FH1099/192) And Mg-chlorite (N5S-F871/182). 65
- Fig. 9. Mineral abundance results and composition analysis using the reflectance spectroscopy data for the N5S-F871 titer and the lithotypes found during the description of the holes. The scatter plot shows the variation of mineral abundance as a function of depth. The color scale in the abundance iron (hydro-)oxides and chlorite diagrams show the wavelength in nm of the absorption feature of these minerals. The color scale of the abundance diagram of kaolinite and the smectite-illite mixture is colored according to the crystallinity of these minerals. The intervals that have similar mineralogical characteristics were grouped in the same colored horizon 66
- Fig. 10. Correlation graph between the mineral abundance algorithm under study and the geochemical analysis of XRF. The samples are colored according to the lithotype. A. Correlation between the abundance of iron (hydro-)oxide (900Dfe) and Fe₂O₃%. B. Correlation of goethitic-hematitic distribution (900Wlv-fe) and loss by calcination (LOI) at 1000°C. C. Correlation between abundance of gibbsite (2260Dg) and Al₂O₃%. 68
- Fig. 11. Correlation between the albedo (N1650R) and the iron (hydro-)oxide (900Dfe) abundance algorithm for iron (hydro-)oxide spectra, including spectra of mixtures with kaolinite. The samples are colored according to Fe₂O₃% of the XRF analyses. 69
- Fig. 12. Histogram of the chlorite composition obtained by the algorithm 2335Wlv-cl. Values above 2335 nm show a more chlorite-ferric composition, while the values below show more magnesian composition. 70
- Fig. 13. Classification of the chlorites of the gabions of the N5S body in relation to the content of Fe and Mg obtained by the microprobe analysis and the silica for 28 oxygens (Hey, 1954). 71
- Fig. 14. Box plot showing the values of magnetic susceptibility, total gamma spectrometry and density count of each lithotype and their respective histograms. In addition to, present a total histogram for each method of the physical property of rock. 72
- Figure 15. Ternary diagram with the normalization of K, eU, eTh obtained in N5S body reports. 74
- Fig. 16. Correlation diagram between the physical properties of rock, showing the behavior for each lithotype. A. Correlation between density and total gamma spectrometry. B. Correlation between density and magnetic susceptibility on log base. C. Correlation between magnetic susceptibility on log base and total gamma spectrometry. 75
- Fig. 17. Scatter plots showing the variation of the physical properties of rock as a function of the depth of the N5S-F871, representing the behavior for each lithotype. Following from left to right is the response of magnetic susceptibility, density, gamma spectrometry with the total count, potassium, uranium and thorium and their relationships. 76
- Fig. 18. Products derived from the anomalous magnetic field. A. Analytical Signal Amplitude (ASA) grid. B. Geological map of the N5S body on the ASA grid. C. Magnetic features generated by the application of the Multiscale Edge Detection (MED) algorithm 76
- Fig. 19. Gamma spectroscopy product. A. RGB ternary composition (KeUeTh). B. Geological map of the N5S body on the RGB ternary composition grid. C. Lithogeophysical map of the N5S body using unsupervised classification. 77

Fig. 20. Products of gradiometric gravimetry. A. Grids of the Tzz component of gradiometric gravimetry. B. Geological map of the body N5S on the grid Tzz. C. General features of the gradiometric gravimetry obtained using the Multiscale Edge Detection (MED) algorithm.	78
Fig. 21. Section AA' (N82.7°E) showing the holes done and density distribution obtained after the inversion of the FTG data (lower panel). In the upper panel the Tzz component profile is displayed, in the middle panel can be observed grid of the Tzz component.	79
Fig. 22. Correlation between the density (g/cm ³) and Fe ₂ O ₃ % of the XRF analysis. A. Samples are colored according to the lithotype. B. Samples are colored according to the iron (hydro-)oxides (900Dfe) abundance algorithm for each spectrum with iron (hydro-)oxides	80
Fig. 23. Scatter plots of the reflectance spectroscopy data, geochemistry, physical properties of rocks, the petrographic description of the N5S-F871 drill hole and the logging interpretation using all integrated data as a function of depth. The color scale in the abundance diagrams of iron (hydro-)oxide and chlorite shows the wavelength in nm of the absorption feature of these minerals. The color scale of the abundance diagram of kaolinite and smectite-illite is colored according to the crystallinity of these minerals. Geochemical variation of SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , FeO and Al ₂ O ₃ elements. Variation of the physical properties of rock with the magnetic susceptibility response, density, gamma spectrometry with the total count.	81
Fig. 24. Variation of the abundance (2200Ds/i) on the x-axis and color crystallinity (2200Ci/i) of the smectite-illite mixture in the N82.7°E profile, showing the location of the samples studied in the profile, with vertical exaggeration of 5x	83
Fig. 25. Variation of the abundance (2335Dcl) in the x-axis and color composition (2335Wlv-cl) of the chlorite in the profile N82,7°E, showing the location of the studied samples in the profile, with a vertical exaggeration of 5x.	84
Fig. 26. Variation of the abundance (900Dfe) in the x-axis and color composition (900Wlv-fe) of the iron (hydro-)oxide in the profile N82,7°E, showing the location of the studied samples in the profile, with a vertical exaggeration of 5x. The red line indicates the weathering profile, where a hematite-goethite composition prevails over the hematite composition	84
Fig. 27. Variation of the hematite-goethite composition in the hole N5S-F871 and correlation with the geological data, the result of the integration, the chemical elements P and Sc and the properties of gamma spectrometry of the potassium channel (K) and factor F. With emphasis on the red line, which represents the delimitation at the beginning of the hole of the composition more goethite	85
Annex 1. Nomenclature to describe the survey testimonies used by Vale S.A.	96
Appendix 1. Chemical analysis of chlorite.	97
Appendix 2. Algorithms extracted from the spectral data (band radius, absorption depth, minimum wavelength, etc.) of each absorption feature.	98
Appendix 3. Spectral products applied in this study to extract abundance and mineral composition data from N5S Body testimonies.	99
Appendix 4. Scatter plots showing the geochemical variation as a function of the depth of the N5S-F867. The analyzed elements are SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , FeO, Al ₂ O ₃ , K ₂ O, MgO, Ti, P, Cr, Sc and ΣREE (rare earth elements).	100
Appendix 5. Scatter plots showing the geochemical variation as a function of the depth of the N5S-FH1099. The analyzed elements are SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , FeO, Al ₂ O ₃ , K ₂ O, MgO, Ti, P, Cr, Sc and ΣREE (rare earth elements).	100

- Appendix 6. Scatter plots showing the geochemical variation as a function of the depth of the N5S-FH1103. The analyzed elements are SiO₂, Fe₂O₃, FeO, Al₂O₃, K₂O, MgO, Ti, P, Cr, Sc and ΣREE (rare earth elements). 101**
- Appendix 7. Scatter plots of reflectance spectrometry data, geochemistry, physical properties of rocks, the petrographic description of the N5S-F867 testament and the interpretation of logging using all depth-integrated data. The color scale in the abundance diagrams of iron (hydro-)oxide and chlorite shows the wavelength in nm of the absorption feature of these minerals. The color scale of the abundance diagram of kaolinite and smectite-illite is colored according to the crystallinity of these minerals. Geochemical variation of SiO₂, Fe₂O₃, FeO and Al₂O₃ elements. Variation of the physical properties of rock with the magnetic susceptibility response, density, gamma spectrometry with the total count. 101**
- Appendix 8. Scatter plots of the reflectance spectrometry data, geochemistry, physical properties of rocks, the petrographic description of the N5S-FH1099 testament and the interpretation of logging using all the integrated data as a function of depth. The color scale in the abundance diagrams of iron (hydro-)oxide and chlorite shows the wavelength in nm of the absorption feature of these minerals. The color scale of the abundance diagram of kaolinite and smectite-illite is colored according to the crystallinity of these minerals. Geochemical variation of SiO₂, Fe₂O₃, FeO and Al₂O₃ elements. Variation of the physical properties of rock with the magnetic susceptibility response, density, gamma spectrometry with the total count. 102**
- Appendix 9. Scatter plots of reflectance spectrometry data, geochemistry, physical properties of rocks, the petrographic description of the N5S-FH1103 testament and the interpretation of logging using all integrated data as a function of depth. The color scale in the abundance diagrams of iron (hydro-)oxide and chlorite shows the wavelength in nm of the absorption feature of these minerals. The color scale of the abundance diagram of kaolinite and smectite-illite is colored according to the crystallinity of these minerals. Geochemical variation of SiO₂, Fe₂O₃, FeO and Al₂O₃ elements. Variation of the physical properties of rock with the magnetic susceptibility response, density, gamma spectrometry with the total count. 102**
- Appendix 10. Variation of the hematite-goethite composition in the N5S-F867 hole and correlation with the geological data, the result of the integration, the chemical elements P and Sc and the properties of gamma spectrometry of the potassium channel (K) and factor F. With emphasis on the delimitation at the beginning of the hole of the more goethitic composition 103**
- Appendix 11. Variation of the hematite-goethite composition in the N5S-FH1099 hole and correlation with the geological data, the result of the integration, the chemical elements P and Sc and the properties of gamma spectrometry of the potassium channel (K) and factor F. With emphasis on the delimitation at the beginning of the hole of the more goethitic composition. 103**
- Appendix 12. Variation of the hematite-goethite composition in the N5S-FH1103 hole and correlation with the geological data, the result of integration, the chemical elements P and Sc and the properties of gamma spectrometry of the potassium channel (K) and factor F, With emphasis on the delimitation at the beginning of the hole of the more goethitic composition. 104**
- Apêndice VI.1. Resultados da abundancia mineral e analise de composiçãõ utilizando os dados de espectrometria de refletância para o testemunho N5S-F871 e os litotipos encontrados durante a descriçãõ dos furos. O scatter plot mostra a variaçãõ da abundância mineral em função da profundidade. A escala de cores nos diagramas de abundância (hidro-)óxidos de ferro, clorita e mistura esmectita-illita mostra o comprimento de onda em nm da feiçãõ de absorçãõ desses minerais. A escala de cores do diagrama de abundância da caolinita e da mistura esmectita-illita é colorido de acordo com a cristalinidade destes minerais. Os intervalos que tem características mineralógicas similares foram agrupados no mesmo horizonte colorido 122**

- Apêndice VI.2. Resultados da abundancia mineral e analise de composição utilizando os dados de espectrometria de refletância para o testemunho N5S-F871 e os litotipos encontrados durante a descrição dos furos. O scatter plot mostra a variação da abundância mineral em função da profundidade. A escala de cores nos diagramas de abundância (hidro-)óxidos de ferro, clorita e mistura esmectita-illita mostra o comprimento de onda em nm da feição de absorção desses minerais. A escala de cores do diagrama de abundância da caolinita e da mistura esmectita-illita é colorido de acordo com a cristalinidade destes minerais. Os intervalos que tem características mineralógicas similares foram agrupados no mesmo horizonte colorido** 123
- Apêndice VI.3. Resultados da abundancia mineral e analise de composição utilizando os dados de espectrometria de refletância para o testemunho N5S-F871 e os litotipos encontrados durante a descrição dos furos. O scatter plot mostra a variação da abundância mineral em função da profundidade. A escala de cores nos diagramas de abundância (hidro-)óxidos de ferro, clorita e mistura esmectita-illita mostra o comprimento de onda em nm da feição de absorção desses minerais. A escala de cores do diagrama de abundância da caolinita e da mistura esmectita-illita é colorido de acordo com a cristalinidade destes minerais. Os intervalos que tem características mineralógicas similares foram agrupados no mesmo horizonte colorido** 124
- Apêndice VI.4. Scatter plots apresentando a variação das propriedades físicas de rocha em função da profundidade do testemunho N5S-F871, representando o comportamento para cada litotipo. Seguindo da esquerda para a direita tem-se a resposta da susceptibilidade magnética, densidade, gamaespectrometria com contagem total, potássio, urânio e tório e suas relações** 125
- Apêndice VI.5. Scatter plots apresentando a variação das propriedades físicas de rocha em função da profundidade do testemunho N5S-F871, representando o comportamento para cada litotipo. Seguindo da esquerda para a direita tem-se a resposta da susceptibilidade magnética, densidade, gamaespectrometria com contagem total, potássio, urânio e tório e suas relações** 126
- Apêndice VI.6. Scatter plots apresentando a variação das propriedades físicas de rocha em função da profundidade do testemunho N5S-F871, representando o comportamento para cada litotipo. Seguindo da esquerda para a direita tem-se a resposta da susceptibilidade magnética, densidade, gamaespectrometria com contagem total, potássio, urânio e tório e suas relações.** 127

Índice de Tabelas

Tabela I.1. Características dos levantamentos aerogeofísicos processados por Assis (2013).	22
Tabela I.2. Sumário com a média e variação dos valores obtidos de densidade no corpo N5S e seu respectivo boxplot por litotipo	23
Tabela I.3. Análises químicas da clorita.	26
Tabela I.4. Métodos utilizados na dosagem dos diferentes elementos e óxidos utilizados nesta pesquisa.	27
Tabela I.5. Algoritmos utilizados na extração dos parâmetros espectrais para cada feição de absorção.	30
Tabela I.6. Produtos espectrais aplicados neste estudo para a extração dos parâmetros de abundância e composição dos minerais dos furos de sondagem do corpo mineralizado N5S.	31
Tabela I.7. Susceptibilidade magnética de formações ferríferas na Austrália e Brasil (dados extraídos de Bubner et al 2003 ^a ; Zacchi 2010 ^b ; Ferreira 2014 ^c).	32
Tabela I.8. Número de amostras medidas pelo método da balança e pelo método do pentapicnômetro em cada furo	37
Tabela I.9. Tabela com a média e a variação para densidades de cada litotipo obtidas por meio dos métodos do pentapicnômetro, da balança hidrostática e da gamma-gamma, pelo trabalho de Assis (2013) e pela correção dos dados do pentapicnômetro	40
Table 1. Mean contents for the major elements, Ti (%) and trace (ppm) in the main lithotypes of the N5S body.	52
Table 2. The mean and variation of the density of each lithotype obtained by the pentapycnometer and the hydrostatic scale in the four holes of the N5S and eleven holes of the N4WS, gamma-gamma profiling, Assis (2013) and correction of the data of the pentapycnometer.	55
Table 3. Methodology and characteristics of aerogeophysical data processed by Assis (2013) and windowed for this project.	56
Table 4. Summary of the mean and variation of the magnetic susceptibility, density and total count, potassium, uranium and thorium values of gamma spectroscopy for lithotypes.	57
Table 5. Signature of each lithotype and the altered zones after integration of the data performed in the probes of the N5S body.	82
Tabela III.1. Densidade média dos litotipos dos corpos N4WS e N5S	107
Apêndice VI.7. Tabela resumida de integração com observações, valores e variações da espectroscopia de reflectância, geoquímica, propriedades físicas de rocha e petrografia dos furos N5S-F867, N5S-F871, N5S-FH1099 e N5S-FH1103.	

Erro! Indicador não definido.

Resumo

Esta pesquisa está centrada na integração de dados aerogeofísicos e dados geológicos, geoquímicos, espectrometria de reflectância e de propriedades físicas de rocha coletados em testemunhos de sondagem que interceptaram o corpo mineralizado do depósito N5S, localizado na Serra dos Carajas, Pará, Brasil. De forma geral, foram analisados o jaspilito (protominério) e o hematitito friável (minério) da Formação Carajás, bem como gabros intrudidos. O jaspilito apresenta cerca 54% de Fe_2O_{3T} e 44,67% de SiO_2 , (hidro-)óxido de ferro (900Dfe), esmectita (2200Ds) e densidade média de $3,4\text{g/cm}^3$, com variações nas zonas de jaspilito brechado. Já o hematitito friável mostra teores de Fe_2O_{3T} chegando até 99%, densidade média de $4,14\text{g/cm}^3$ e maiores valores de abundância de (hidro-)óxido (900Dfe) em relação ao jaspilito, confirmando o processo de lixiviação da sílica e o enriquecimento em óxido de ferro. O gabro possui 52,65% de SiO_2 , 10,9% de Fe_2O_{3T} , 6,13% de FeO e 16,0% de Al_2O_3 . Na espectrometria de reflectância foram detectados clorita (2335Dcl) e uma mistura de esmectita-illita (2200Ds/i) e as zonas alteradas apresentaram valores de densidade menores que $2,6\text{g/cm}^3$. A partir dos dados aerogeofísicos de gradiometria gravimétrica foi obtido um modelo geofísico de densidade utilizando as informações coletadas nos testemunhos de sondagem. Essa técnica de interpretação conseguiu delimitar as zonas mais densas associadas à Formação Carajas. A análise individual de cada técnica aplicada proporcionou resultados satisfatórios, porém cada uma possui um limite aceitável de resultados. A integração dos dados das técnicas utilizadas auxiliou na caracterização de cada litotipo e principalmente na identificação e caracterização de zonas brechadas no jaspilito. Estas regiões apresentam aumento do comprimento de onda do óxido de Fe (900Wlv-Fe) com composição mais hematita-goethita. Além disso, foi detectada a presença de caolinita (2200Dk) e mistura de esmectita-illita (2200Ds/i), um aumento de SiO_2 , ETR's, Hf, Zr, Nb, P em relação a variação comum e uma diminuição de Al_2O_3 , MnO, FeO e Cr. A representação de alguns resultados em perfil possibilitou diferenciar regiões com diferentes composições e características no N5S. O estudo da cristalinidade da mistura da esmectita-illita (2200Cs/i) indicou que a região leste do perfil estava mais aquecida e provavelmente mais próxima de sua fonte. A clorita (2335Dcl) mostra-se mais magnésiana a leste e mais férrica a oeste, demonstrando que a composição Mg-clorita está relacionada com a illita/esmectita. Os parâmetros do (hidro-)óxido de ferro apresentou o perfil de alteração supergênica mais profundo na região oeste do perfil, sendo constatado também pelos dados de geoquímica e de gamaespectrometria. As diferentes respostas entre os dados coletados no corpo N5S e N4WS corroboraram com as observações feitas nos perfis do corpo N5S. A diferença de composição mineralógica obtida na espectrometria de reflectância das regiões brechadas e das vênulas das regiões citadas, o corpo N4WS apresenta alterações com a formação de talco e carbonato, enquanto no N5S tem-se somente a presença de quartzo.

Palavras-chave: Integração de dados multi-fontes, espectroscopia de reflectância, Carajás, depósito N5S, minério de ferro.

Abstract

This follow paper is focused on the integration of aerogeophysical, geological and geochemical data, reflectance spectroscopy and physical rock properties collected in drillholes samples that intercepted the N5S mineralized iron body, located in the Serra dos Carajás, Pará, Brazil. We analyzed the jaspilite (proto ore) and friable hematite (ore) of the Carajás Formation, and intruded gabbros as well. The jaspilite exhibits about 54% Fe₂O₃ and 44.67% SiO₂, (hydro-) iron oxide (900Dfe), smectite (2200Ds) and average density of 3.4g / cm³, with variations in breccia jaspilite. However, the friable hematite shows Fe₂O₃ contents up to 99%, average density of 4.14 g/cm³ and higher values of (hydro-) oxide (900Dfe) in relation to jaspilite, confirming the silica leaching process and enrichment in iron oxide. The gabbro has 52.65% SiO₂, 10.9% Fe₂O₃T, 6.13% FeO and 16.0% Al₂O₃. The spectrometric study detected chlorite (2335Dcl) and a mix of smectite-illite (2200Ds/i) and the altered zones presented values of density less than 2.6 g / cm³. From the of gravimetric gradiometry airborne survey, a geophysical density model was obtained using the information collected in the drill cores. This technique of interpretation could delimit the denser zones associated with the Carajás Formation. The individual analysis of each technique applied provided satisfactory results, however each one has limits and an integration between the technics is necessary. The integration of the techniques used in all the characterizations of each lithotype and mainly in the identification and characterization of the breccias zones in the jaspilite. These areas have values of the wavelength of Fe oxide (900Wlv-Fe) with the composition plus hematite-goethite. In addition, the presence of kaolinite (2200Dk) and a mixture of smectite-illite (2200Ds/i), an increase of SiO₂, ETR's, Hf, Zr, Nb, P were detected in relation to the common variation and a decrease of Al₂O₃, MnO, FeO and Cr. The representation of some results in a geological profile of making it possible to differentiate regions with different compositions and characteristics at N5S. The study of the smectite-illite mixture (2200C/i) indicated that the eastern region was warmer and closer to source. The study of the smectite-illite mixture (2200C/i) indicated that the eastern region of the profile was warmer and closer to source. The chlorite (2335Dec) is shown to be more magnesian to the east and more ferritic to the west, demonstrating that the Mg-chlorite composition is related to an illite/smectite. The parameters of the (hydro-) iron oxide presented the deepest supergenic alteration profile in the western region, being also verified by geochemistry and gamma spectrometry data. The different responses between the data collected in the N5S and N4WS corroborated with the observations made in the N5S body. The mineralogical composition reached in the reflectance spectroscopy in the breccia areas and venules, shows that the N4SW shows talc and carbonate, while not N5S has only a presence of quartz.

Keywords: Multi-source data integration, reflectance spectroscopy, Carajás, N5S deposit, iron ore.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

I.1. Estruturação da Dissertação

Este projeto de pesquisa foi desenvolvido na Universidade de Brasília sob a orientação da Professora Dra. Catarina Labouré Bemfica Toledo e a co-orientação da Professora Dra. Adalene Moreira Silva e faz parte do projeto “Geração de modelos prospectivos para o minério de ferro da Província Mineral de Carajás”. O projeto faz parte de um acordo de cooperação técnico-científico entre a Fundação Universidade de Brasília e a empresa Vale S.A com a interveniência da FUNAPE (Fundação de Apoio a Pesquisa). Além disso, o projeto contou com o apoio dos Professores Diego Fernando Ducart (Unicamp) e Luís Fernando Martins Ribeiro (FT- UnB).

A dissertação de mestrado está estruturada em três partes, sendo a primeira constituída do corpo principal do projeto, onde é apresentada a introdução ao problema estudado, à localização, os objetivos da dissertação e os materiais e métodos utilizados. A segunda parte está organizada em formato de artigo a ser submetido na *Journal of Applied Geophysics* (Capes – Qualis A2), intitulado “*The footprint of the N5S Iron Ore Deposit in North Mountain based on multi source data, Carajás Mineral Province, Brazil*”. Na terceira parte encontram-se as discussões e considerações sobre os resultados obtidos, bem como as conclusões principais sobre a assinatura dos diferentes litotipos encontrados no corpo N5S e a aplicação dos métodos utilizados para a exploração de minério de ferro.

I.2. Apresentação e Justificativas

Os depósitos de ferro hematítico de classe mundial de alto teor (60-67% Fe) são produtos de enriquecimento das formações ferríferas bandadas pré-cambrianas (Beukes *et al.*, 2002). O Brasil possui duas das maiores províncias do mundo: Quadrilátero Ferrífero/MG e Carajás/PA (Zucchetti, 2007).

A Província Mineral de Carajás é conhecida por hospedar mineralizações e depósitos de classe mundial de minério de ferro, manganês, Cu-(Au) tipo Iron Oxide Copper Gold (IOCG), ouro e elementos do grupo da platina (EGP). A descoberta dos depósitos de formações ferríferas na região ocorreu em 31 de julho de 1967 pela empresa Meridional/US Steel, através do pouso na clareira com canga hematítica na Serra Arqueada, indicando um grande potencial para prospecção de minério de ferro (Gomes, 2007).

Os depósitos de ferro estão hospedados nas rochas da Formação Carajás, e são tradicionalmente classificados em três distritos, (Serras Norte, Sul e Leste) onde ocorrem 57 corpos descontínuos de

minério de alto teor. No distrito mineiro da Serra Norte, acham-se as minas a céu aberto N4 e N5, além dos depósitos N1 a N3 e N6 a N9. A espessura do pacote mineralizado varia entre 250 e 300 m, o comprimento entre 200 m (N3, N6, N7 e N9) até 10 km (N4) e a terceira dimensão (extensão em profundidade, segundo o mergulho) pode atingir até 600 m. Inúmeros depósitos de ferro, não explorados, também são distribuídos nas serras Leste, SL1 a SL3, e Serra Sul, S1 a S45 (Lobato, 2005).

No âmbito econômico dos últimos anos, o minério de ferro tem sido a principal *commodity* brasileira de exportação, sendo de grande importância na balança comercial brasileira, além de ser a substância mineral que mais fornece arrecadações para a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) (DNPM, 2014). O corpo N5S, objeto de estudo desta pesquisa, é um ativo de classe mundial, com 888 milhões de toneladas métricas de reservas provadas e prováveis e um teor médio de Fe de 67,2%, com a menor relação estéril-minério e as menores distâncias médias de transporte em Carajás (Vale S.A., 2015). Apesar do minério de ferro desempenhar papel importante na economia brasileira e no cenário internacional, a abundância desse recurso e a facilidade de exploração fizeram com que métodos prospectivos inovadores fossem pouco estudados quando comparados com outras *commodities*.

O projeto Geração de Modelos Prospectivos para Minério de Ferro, desenvolvido pela Universidade de Brasília em parceria com a companhia Vale S.A., visa apresentar novos critérios prospectivos a partir da modelagem de dados multi-fonte. Com base nesse objetivo geral, o presente trabalho tem como principal meta criar uma assinatura do minério de ferro do depósito N5S, utilizando a integração de dados geológicos de superfície, aerogeofísicos (aeromagnetometria, aerogamaespectrometria e aerogravimetria gradiométrica) e de testemunhos de sondagem com dados petrográficos, geoquímicos, de espectrometria de reflectância e de propriedades físicas de rocha (susceptibilidade magnética, gamaespectrometria e densidade).

I.3. Localização

Os furos de sondagem do depósito de ferro N5S, alvos deste trabalho, estão localizados no distrito mineiro de Serra Norte, na Província Mineral de Carajás/PA (Figura I.1) inserida no município de Parauapebas/PA. A via de acesso principal é a rodovia estadual PA-275, que liga Parauapebas às áreas de Serra Norte, tendo também acesso por via aérea pelo aeroporto de Carajás. O distrito mineiro é composto pelas minas a céu aberto N4 e N5, além dos depósitos N1 a N3 e N6 a N9.

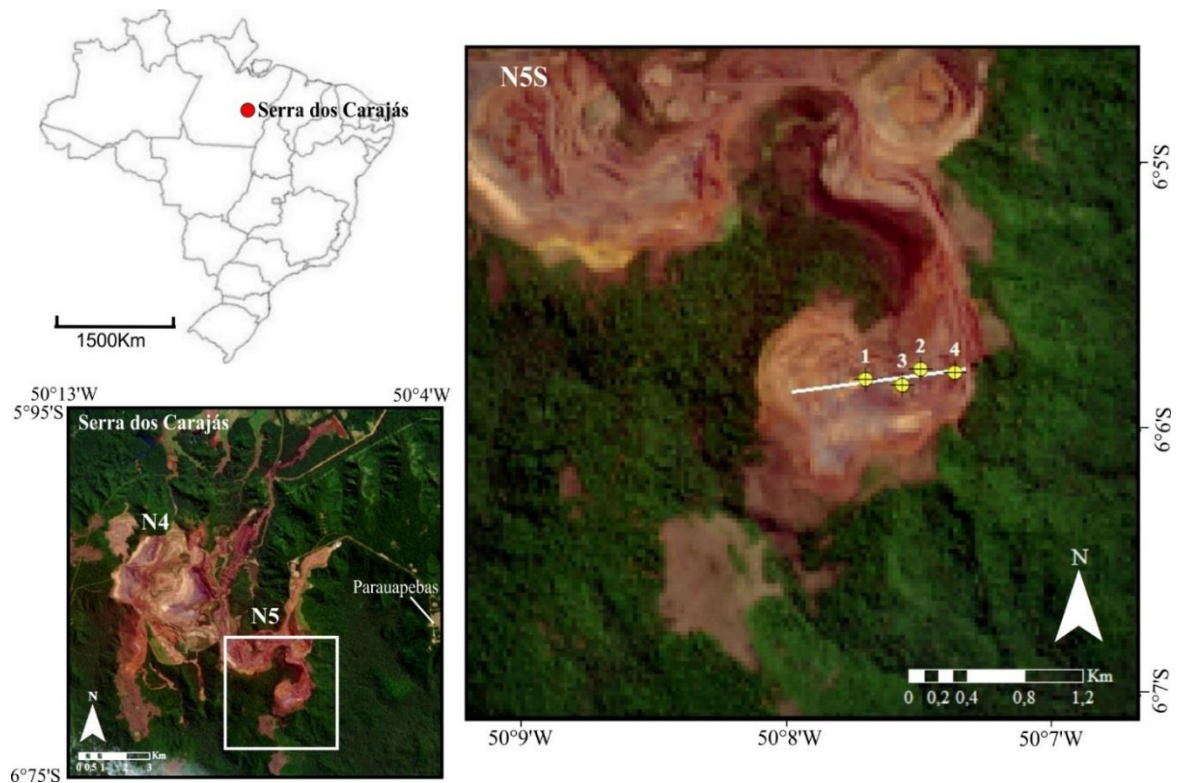


Figura I.1. Localização do corpo de minério N5S em relação a Serra Norte e ao Brasil e posicionamento dos furos de sondagem. Imagem de satélite Landsat 8 com sensor Operational Land Imager (OLI), composição RGB.

I.4. Objetivos

A proposta de pesquisa está centrada na integração de dados, geológicos, geoquímicos, aerogeofísicos de alta resolução, espectrometria de reflectância e de propriedades físicas de rocha, com intuito de gerar uma assinatura para o corpo N5S. Para atingir o objetivo central desta pesquisa, são desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Processamento e interpretação de dados aerogeofísicos de alta resolução com o objetivo de compreender a distribuição da formação ferrífera bandada no corpo N5S e do seu padrão estrutural;
- ✓ Levantamento das propriedades físicas de rocha (susceptibilidade magnética, gamaespectrometria e densidade) em testemunhos de sondagem com o intuito de auxiliar na caracterização do minério, do protominério e suas encaixantes;
- ✓ Caracterização petrográfica e geoquímica do minério e suas encaixantes, visando à identificação da estratigrafia e das variações composicionais internas das sequências sedimentares;

- ✓ Coleta dos dados espectrorradiométricos para identificar as variações mineralógicas dos diversos litotipos, além de quantificar a mineralogia identificada a partir da correlação com a geoquímica;
- ✓ Correlação entre as propriedades físicas de rocha, os perfis mineralógicos (espectrorradiométricos e petrográficos) e geoquímicos dos furos de sondagem, buscando compreender as variações laterais dentro do pacote sedimentar;
- ✓ Integração dos dados geológicos, geoquímicos, aerogeofísicos, espectrorradiométricos e de propriedades físicas de rocha para a modelagem do minério de ferro.

I.5. Materiais e Métodos

A seguir são apresentados os materiais e os métodos aplicados na realização deste projeto. Inicialmente tem-se a explanação dos materiais e métodos utilizados no tratamento dos dados aerogeofísicos seguido da amostragem e petrografia, da geoquímica, da espectrometria de reflectância, das propriedades físicas das rochas, e dos *softwares* utilizados.

I.5.1. Aerogeofísica

Os dados aerogeofísicos foram fornecidos pela empresa Vale S.A. e processados durante a elaboração da dissertação de mestrado de Assis (2013). Para o presente estudo esses dados foram janelados para a área do corpo mineralizado N5S, sendo apresentados na tabela I.1 os métodos de aquisição e as características dos aerolevantamentos. O aerolevantamento magnetométrico foi realizado simultaneamente com o aerolevantamento gravimétrico gradiométrico utilizando o sistema de *Full Tensor Gravimetric (FTG)*, e a direção das linhas de voo foram definidas para garantir uma menor interferência do relevo na aquisição dos dados, sendo programadas para serem alinhadas com as principais feições fisiográficas de Serra Norte (Braga, 2009). O aerolevantamento da gamaespectrometria foi realizado em 1995. Para a cobertura total da área de estudo de Assis (2013) foi necessário utilizar dados de dois aerolevantamentos, com mesmas características de aquisição.

Para auxiliar na análise das estruturas e das feições dos produtos gerados a partir de dados aerogeofísicos foi utilizado o processo de detecção de bordas multi-escala (MED). Esta técnica numérica mapeia as bordas de fontes anômalas em dados de campo potencial à medida que se varia a profundidade. Num plano horizontal, estas arestas formam "vermes" isolados que são semelhantes a linhas isoladas desenhadas por um geocientista interpretando manualmente um potencial conjunto de dados de campo (por exemplo, contatos ao longo de gradientes máximos) (Archibald *et al.*, 1998).

Tanto na aerogravimetria quanto nos dados aeromagnéticos, a maioria das informações está contida no sinal analítico e derivadas que, por sua vez, mapeiam os limites de propriedades contrastantes de rochas em subsuperfície (contatos, falhas, etc.). A detecção e visualização dessas variações em escalas diferentes (bordas de várias escalas) podem aumentar consideravelmente a interpretação de dados de campo potencial e contribuir para a construção de mapas geológicos em 3D. O MED também fornece informações sobre a profundidade e o tipo de fontes causais. Fontes tridimensionais dão uma assinatura diferente em comparação com diques e contatos (Archibald *et al.*, 1998).

Tabela I.1. Características dos levantamentos aerogeofísicos processados por Assis (2013).

Método Aéreo	Equipamento Utilizado	Metodologia do equipamento	Direção de voo	Altura de voo	Espaçamento de linhas de voo	Espaçamento de linhas de controle
Gravimetria gradiométrica	Sistema <i>Full Tensor Gravity Gradiometry</i> (3D-FTG), na aeronave Cessna Grand Caravan	Plataforma móvel constituída por 12 acelerômetros que medem as cinco componentes independentes do gradiente de gravidade e representam a aceleração da gravidade ao longo dos eixos cartesianos.	N25W	150m	150m	Não foram executadas
Magnetometria	Sensor de bombeamento ótico de vapor de césio, modelo Scintrex CS-2, na aeronave Cessna Grand Caravan	A taxa de amostragem foi de 10Hz, gerando 1 medida a aproximadamente cada 7m, com leitura dos valores do campo magnético bruto e compensado	N25W	150m	150m	Não foram executadas
Gamaespectrometria	Gamaespectrômetro da EXPLORANIUM, modelo GR-820, na aeronave Cessna Grand Caravan	O intervalo entre as medições foi de 1Hz, ou seja, uma medida a aproximadamente cada 70m	N15E	150m	250m	250m na direção N75W

A inversão dos dados é uma técnica eficiente para mapear corpos de geometria complexa, heterogêneos e anisotrópicos, onde calculamos os parâmetros físicos a partir dos dados observados. Ela pode ser efetuada sem vínculos (*unconstrained*) onde se minimiza o ajuste (*misfit*) entre os dados computados e observados. Este processo não aplica restrição geológica, mas usa propriedades físicas (e.g., susceptibilidade magnética) para ajustar a resposta observada. O modelo resultante define uma distribuição geofísica da propriedade que minimiza o erro. Já a inversão geofísica com vínculo (*constrained*), é um método de interpretação quantitativo que permite obter a geometria e profundidade da fonte anômala a partir de um modelo geológico inicial. Desta forma é possível reduzir as incertezas do modelo obtido, tornando-o mais confiável e similar à geologia em subsuperfície. Nesse trabalho foi utilizado a seguinte metodologia: Correção de terreno; construção do modelo geológico inicial; e

inversão dos dados geofísicos (*constrained*). O modelo geológico inicial foi obtido a partir das densidades coletadas nos furos de sondagem e que seccionam o platô do N5S

Para a retirada da influência topográfica foi utilizada a metodologia sugerida por FritzGerald e Patterson (2013) e utilizado o valor de 2,7 g/cm³ na correção de terreno. Dessa forma, os valores positivos anômalos corresponderão a fontes com densidade maior que o valor escolhido, o que inclui as camadas mineralizadas com minério de ferro. Os dados de densidade foram os obtidos neste trabalho e podem ser visualizados na tabela I.2. Com base na mesma tabela é possível afirmar que o litotipo mais denso é o hematitito friável com densidade média de 4,14 g/cm³.

Tabela I.2. Sumário com a média e variação dos valores obtidos de densidade no corpo N5S e seu respectivo *boxplot* por litotipo.

Litotipo	Densidade (g/cm ³)		Densidade (g/cm ³)
	Média	Variação	
CM	3,27	2,61 – 3,99	
HF	4,14	3,25 – 4,91	
JP	3,4	2,97 – 3,72	
M	2,74	2,41 – 2,88	
MS	2,29	1,88 – 3,89	

Notas: CM = canga de minério; HF = hematitito friável; JP = jaspilito; MS = rocha máfica semi-alterada; M = rocha máfica (gabro)

Os dados obtidos mostram que se considerarmos todo o pacote mineralizado, ou seja, o hematitito friável, jaspilito e a parte mais intemperizada denominada canga de minério (HF+JP+CM), a densidade média do pacote é de 3,97 g/cm³, enquanto as encaixantes mostram uma média de densidade 2,66 g/cm³. Observa-se uma diferença de 1,31 g/cm³ de contraste. Estes mostram que o contraste justifica a aplicação de dados de gradiometria gravimétrica e que, após a correção de terreno, as anomalias de alto gradiente observadas poderão refletir em subsuperfície o pacote mineralizado. A diferenciação dos litotipos a partir dos dados gravimétricos não é possível devido ao fenômeno da superposição de fontes, comum aos métodos potenciais. Dados semelhantes foram obtidos por Souza *et al.* (2016) para o N4WS.

Os valores médios de densidades foram atribuídos de forma homogênea para os intervalos dos furos de sondagem na área delimitada, considerando todos os furos disponíveis no banco de dados e

onde os dados de densidade não foram coletados. O modelo inicial de densidade foi construído a partir da interpolação em 3D utilizando o algoritmo de mínima curvatura. Para a inversão dos dados geofísicos de FTG foi utilizado o código GGINV3D (Li, 2001), com *mesh* de 50m x 50m x 25m (X Y Z), e erro de 5% do desvio padrão do dado de FTG (143 Eo). Ou seja, neste caso foi utilizado o erro de 7 Eo. O número de medidas utilizadas para a inversão foi de 936, distribuídas ao longo das linhas de aquisição. O código GGINV3D permite que o usuário realize a escolha do melhor parâmetro de regularização. Essa escolha é realizada através da curva L (Oldenburg e Li, 2007). Para a confecção dessa curva são realizadas várias inversões com diferentes valores de parâmetro de regularização e então é feito um gráfico do *misfit* pela norma de cada inversão. Para o dado de FTG em questão foram realizadas 10 inversões com o maior parâmetro de regularização igual a 1000 e o menor parâmetro foi 0,000001.

1.5.2. Amostragem e Petrografia

Os trabalhos de campo foram efetuados em julho de 2011 e incluíram 20 dias de campo, nos quais foram descritos os testemunhos de sondagem referentes a quatro furos N5S-F867, N5S-F871, N5S-FH1099 e N5S-FH1103, com profundidades de 200m, 230,5m, 192,75m, e 202,5m, respectivamente (Figura I.2). A coleta de amostras foi realizada a cada dois metros, com amostras de 15cm, totalizando 419 amostras. As amostras foram destinadas para litogeoquímica e coleta de dados espectrorradiométricos e de propriedades físicas. Foram também selecionadas 49 amostras para descrição petrográficas, visando descrever as principais variações texturais e mineralógicas.

A análise petrográfica foi focada na identificação da mineralogia e das estruturas primárias do minério e suas encaixantes. Treze destas amostras foram laminadas após a análise dos dados geoquímicos e espectrorradiométricos, com a intenção de validar os dados geoquímicos e os minerais determinados pela espectrometria de reflectância. As lâminas delgadas polidas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências da UnB e as descrições petrográficas foram efetuadas em microscópio petrográfico sob luz transmitida e refletida, no Laboratório de Microscopia da Universidade de Brasília.

As análises químicas minerais da clorita foram realizadas na Microsonda Eletrônica marca Cameca, modelo Camebax SX 50, da Universidade de Brasília (Tabela I.3). Foi utilizado a voltagem de excitação de 15 kV, corrente de 25 hA e diâmetro de feixe de 5nm. Os padrões utilizados consistiram de minerais naturais, vidros sintéticos e metais.

1.5.3. Geoquímica

Para identificação da estratigrafia e das variações composicionais internas do corpo mineralizado N5S foram realizadas análises químicas detalhadas nas 419 amostras coletadas. A preparação das amostras e as dosagens de elementos maiores, menores e traço foram realizadas pelo laboratório da ALS Minerals a partir de cinco métodos, designados pelos códigos: ME-MS81 (ICP-MS); ME-ICP41 (ICP-AES); ME-XRF06 (Fluorescência de raio X); Fe-VOL05 (Titulação) e; AO-GRA06 (WST-SIM).

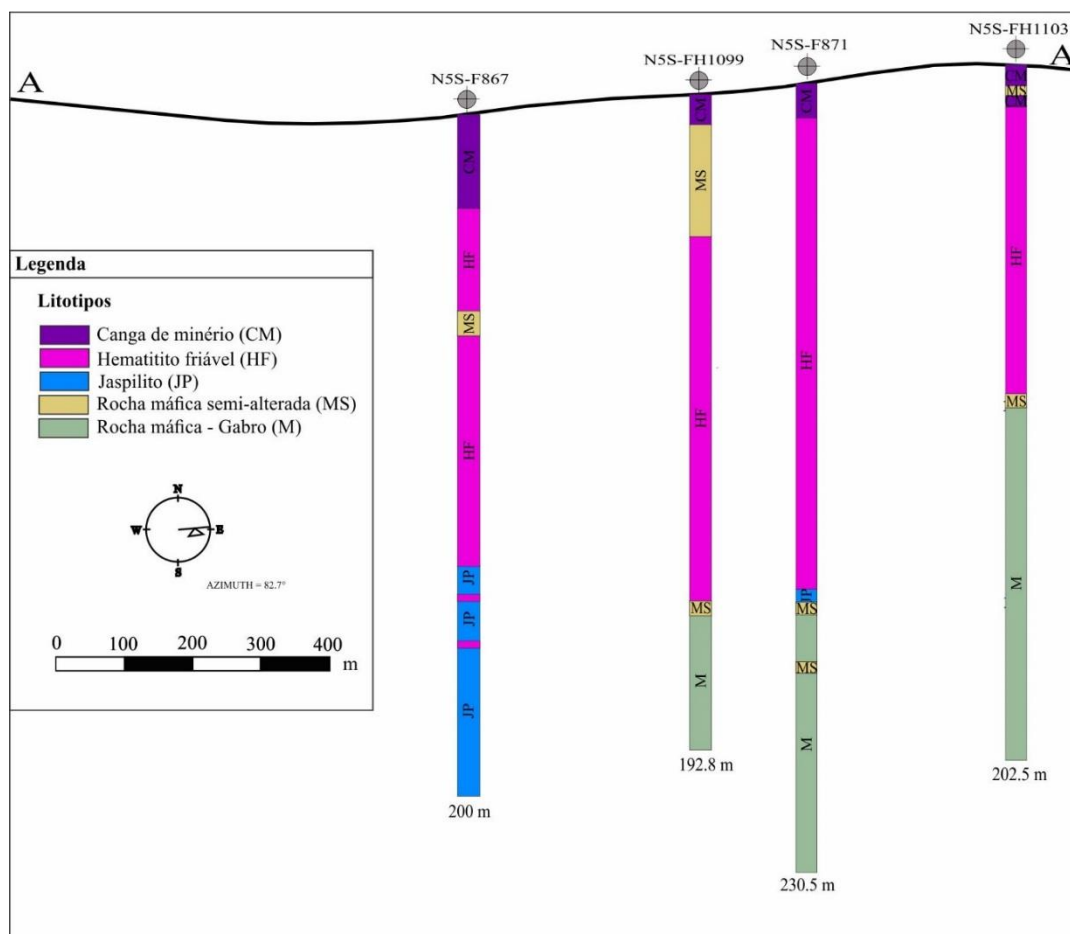


Figura I.2. Litotipos descritos nos testemunhos de sondagem dos furos N5S-F867, N5S-FH1099, N5S-F871, N5S-FH1103.

O método de ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma – Mass Spectroscopy*) se baseia em adicionar à amostra, boreto de lítio/tetraboreto de lítio, misturar e fundir a 1025°C. O resultado é então resfriado e dissolvido em uma mistura ácida contendo o ácido nítrico, hidrocloreídrico e hidrófluorídrico. Essa solução é analisada pelo ICP-MS. O método de ICP-AES (*Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy*) consiste em digerir a amostra em água régia em um bloco de aquecimento de grafite e, após resfriar a amostra, dissolver esta em 12,5L de água deionizada, misturar e analisar no ICP-AES (ALS Geochemistry, 2017).

O método de Fluorescência de raios-X é utilizado para quantificar os elementos maiores da amostra e fundamenta-se na análise de pastilhas formadas por fusão da amostra com borato de lítio. A titulação do ferro foi utilizada para diferenciar o Fe^{2+} do Fe^{3+} , já que nos outros métodos isto não é possível. O método de WST-SIM determina a perda por calcinação (*Loss on Ignition – LOI*) por meio de um forno e é uma importante análise para depósitos de ferro (*ALS Geochemistry*, 2017). Para garantia dos resultados das análises foram enviadas amostras duplicadas e em branco.

O tipo de método de análise utilizado na dosagem dos elementos e óxidos utilizados nesta dissertação estão demonstrados na tabela I.4. Como os dados da Fluorescência de raio X para Fe_2O_3 representam o ferro total das amostras, foram realizados os cálculos demonstrados na Figura I.3 para se obter o percentual de ferro férrico (Fe^{3+}). Os valores de Fe^{3+} negativos foram desconsiderados levando em conta os erros analíticos, em um total de 2 amostras.

Tabela I.3. Análises químicas da clorita.

Amostra %	F871									FH1099							
	98/02	98/03	98/04	98/05	98/06	98/07	98/08	98/09	98/10	79/01	79/02	79/03	79/04	79/05	79/06	79/07	79/08
SiO₂	41,69	27,02	28,26	28,70	28,01	27,56	36,07	27,40	27,80	30,02	29,74	29,17	30,19	31,65	29,94	31,40	30,34
TiO₂	0,15	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,22	0,31	0,00	0,07	0,14	0,21	0,20
Al₂O₃	6,39	15,83	15,76	14,02	16,03	15,48	9,72	15,36	14,96	14,63	15,74	17,59	16,70	14,48	14,96	14,17	15,18
FeO	18,92	20,14	19,77	19,59	19,93	19,61	18,22	18,71	19,78	19,16	21,15	20,82	21,83	18,83	21,82	17,19	19,10
MnO	0,68	0,75	0,72	0,81	0,62	0,86	0,57	0,55	0,69	0,60	0,63	0,88	0,62	0,64	0,67	0,68	0,73
MgO	15,84	23,17	22,65	23,85	22,83	23,69	19,97	23,80	22,75	24,42	23,15	22,54	22,47	25,43	22,49	24,89	23,85
SrO	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,09	0,01	0,04	0,01	0,03	0,02	0,03
CaO	7,46	0,13	0,07	0,08	0,05	0,09	3,95	0,01	0,10	0,07	0,05	0,09	0,07	0,10	0,05	0,10	0,07
Na₂O	0,31	0,00	0,01	0,01	0,04	0,01	0,18	0,04	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,00
K₂O	0,16	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,08	0,04	0,02	0,05	0,07	0,02	0,03	0,09	0,05	0,12	0,08
Cl	0,08	0,00	0,01	0,00	0,03	0,03	0,02	0,03	0,01	0,11	0,15	0,00	0,02	0,10	0,36	0,03	0,09
V₂O₃	0,09	0,00	0,05	0,05	0,03	0,05	0,01	0,00	0,08	0,00	0,04	0,14	0,02	0,07	0,04	0,00	0,01
OH	8,26	12,87	12,69	12,80	12,46	12,63	11,20	14,06	13,74	10,95	8,99	8,42	8,00	8,53	9,51	11,16	10,35
Total	100,03	99,98	100,00	99,99	100,04	100,04	100,00	100,00	99,99	100,02	100,03	99,99	100,00	100,02	100,08	100,01	100,03
Cations recalculados para 28 oxigênios (PUFF)																	
Si	7,17	4,95	5,14	5,17	5,11	5,02	6,28	4,95	5,04	5,41	5,46	5,41	5,58	5,69	5,50	5,57	5,48
Ti	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04	0,06	0,00	0,01	0,02	0,04	0,03
Al	0,28	0,73	0,72	0,63	0,73	0,71	0,42	0,69	0,68	0,66	0,72	0,82	0,77	0,65	0,69	0,63	0,69
Fe²⁺	2,26	2,56	2,50	2,46	2,53	2,48	2,21	2,35	2,49	2,40	2,70	2,68	2,80	2,35	2,79	2,12	2,40
Mn	0,08	0,10	0,09	0,10	0,08	0,11	0,07	0,07	0,09	0,08	0,08	0,11	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09
Mg	2,62	4,07	3,96	4,13	4,00	4,15	3,34	4,13	3,96	4,22	4,09	4,01	3,99	4,39	3,97	4,24	4,14
Sr	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	1,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,56	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Na	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H	0,16	0,26	0,26	0,26	0,25	0,26	0,22	0,28	0,28	0,22	0,18	0,17	0,16	0,17	0,19	0,22	0,21
Cátions	13,67	12,70	12,68	12,77	12,71	12,74	13,11	12,48	12,57	13,00	13,30	13,29	13,40	13,37	13,26	12,92	13,05
Fe/(Fe+Mg)	0,46	0,39	0,39	0,37	0,39	0,37	0,40	0,36	0,39	0,36	0,40	0,40	0,41	0,35	0,41	0,33	0,37

Tabela I.4. Métodos utilizados na dosagem dos diferentes elementos e óxidos utilizados nesta pesquisa.

ME-MS81 (ICP-MS)	ME-ICP41 (ICP-AES)	ME-XRF06 (Fluorescência de raio X)	Fe-VOL06 (Titulação)	AO-GRA06 (WST-SIM)
ETR's, Ba, Co, Cr, Cs, Ga, Hf, Mo, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, Tl, U, V, W, Yb e Zr.	Ag, Al, As, B, Be, Bi, Ca, Cd, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, S, Sb, Sc, Ti e Zn.	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, TiO ₂ , Fe ₂ O _{3T} , P ₂ O ₅ , BaO, MgO, K ₂ O, Na ₂ O, Cr ₂ O ₃ , MnO e SrO.	FeO.	LOI.

Cálculo do teor de Fe₂O₃:

i) Cálculo dos fatores de óxido

$2Fe/Fe_2O_3 = 0.699436$

$Fe/FeO = 0.777314$

ii) Cálculo do Fe³⁺ a partir dos óxidos de Fe_{total} e Fe²⁺:

$Fe_{total} = Fe_{2O_{3T}} \times 0.699436$

$Fe^{2+} = FeO \times 0.777314$

$Fe^{3+} = Fe_{total} - Fe^{2+}$

iii) Cálculo do Fe₂O₃ usando o Fe³⁺ e convertendo para óxido novamente:

$Fe_2O_3 = Fe^{3+} + 0.699436$

Figura I.3. Cálculos realizados para se obter o ferro férrico (Fe³⁺) utilizando os dados do ferro ferroso (Fe²⁺) e do ferro total (Fe₂O₃).

1.5.4. Espectrometria de reflectância

Nas diferentes etapas da exploração mineral a espectrometria de reflectância tem sido uma técnica muito conhecida e efetiva para a identificação da mineralogia dos depósitos minerais, auxiliando tanto no entendimento da distribuição espacial do minério, como dos contaminantes (Ducart *et al.*, 2006; Silva, 2009; Prado *et al.*, 2016).

A reflectância é definida como a razão entre a intensidade de luz refletida pela amostra e a intensidade de luz incidente (Van der Meer, 2004). A luz ao interagir com um mineral ou rocha é absorvida em certos comprimentos de onda enquanto em outros é transmitida e refletida. As posições das feições diagnóstico de absorção dos espectros de alguns minerais na região do VNIR (comprimentos de onda do visível ao infravermelho próximo) e WSIR (comprimentos de onda do infravermelho de ondas curtas) são determinadas por processos de transição eletrônica e transferência de carga associados a íons de metais de transição, como Fe, Ti, Cr, etc. (Hunt, 1977). Processos de

vibração relacionados à H₂O e OH também produzem feições de absorção características no WSIR (Hunt, 1977).

As variáveis que caracterizam as feições de absorção (posição, forma e profundidade) podem ser diretamente correlacionadas com a composição química e estrutura cristalina da amostra (Van der Meer, 2004). Na figura I.4 são demonstrados os parâmetros espectrais obtidos por meio da curva polinomial que melhor se ajusta ao espectro de reflectância removido do contínuo (albedo total da curva de reflectância). A posição da feição de absorção é definida como o mínimo de reflectância da curva de absorção no comprimento de onda e a posição de uma feição de reflectância é definida como o máximo de reflectância da curva de absorção no comprimento de onda. O fator de assimetria da feição é definido como a razão entre as áreas à direita e à esquerda do comprimento de onda de mínima reflectância (Van der Meer, 2004). Por meio do coeficiente angular de uma reta tangente é possível determinar a inclinação de uma determinada região do espectro (Figura I.4).

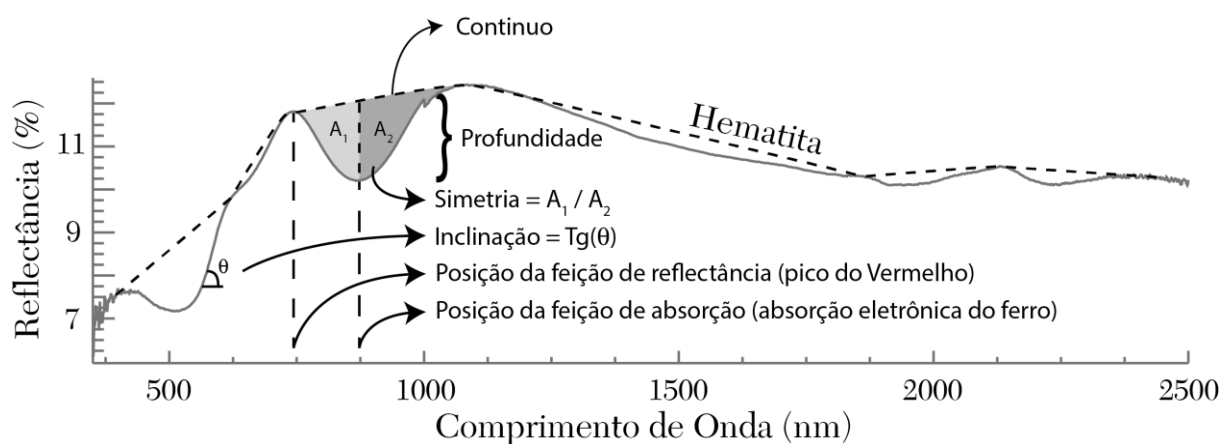


Figura I.4. Parâmetros espectrais obtidos pela média espectral das amostras coletadas no estudo de Prado *et al.* (2016).

O método de quantificação espectral deste trabalho seguiu os métodos publicados por Haest *et al.* (2012) e Prado *et al.* (2016). Para se extrair as informações dos minerais dos espectros de reflectância existe uma variedade de métodos que se baseiam na correlação dos dados espectrais de um mineral específico com as bibliotecas espectrais ou com dados independentes (ex. análises químicas). Para o cálculo da profundidade da feição de absorção neste estudo foi utilizado o método de subtração do valor de reflectância do mínimo da curva polinomial pelo valor de reflectância do contínuo no mesmo comprimento de onda e dividindo este valor pela reflectância do contínuo (Clark e Roush, 1984).

O espectro de reflectância das amostras foi medido utilizando espectrorradiômetro de reflectância FieldSpec3HiRes® (ASD) (Figura I.5A). As medidas foram realizadas utilizando a sonda de contato, que apresenta como fonte de luz uma lâmpada de halogênio (Figura I.5B), pois apresenta

maior precisão que a pistola (Prado *et al.*, 2016). A janela de aquisição da sonda de contato tem diâmetro de 1 cm, e o espectro salvo representa a média de 75 espectros coletados na mesma área. O dispositivo coleta os espectros em três módulos, o primeiro cobrindo os comprimentos de onda do visível ao infravermelho próximo (VNIR: 350-1000 nm) e dois que cobrem a região do infravermelho de ondas curtas (WSIR 1 e 2: 1.000-2500 nm). O intervalo de amostragem do espectrômetro é de 1,4 nm no VNIR e de 2,0 nm do WSIR, com uma precisão de comprimento de onda de $\pm 0,5$ nm. A resolução espectral é de 3nm no VNIR e 8 nm no WSIR. Os espectros coletados pelo ASD são convertidos de radiação para reflectância utilizando o sinal do SpectralomTM, coletado por meio de uma calibração feita a cada 15 minutos durante a coleta dos dados. Segundo Prado *et al.* (2016) a metodologia mais eficaz para a amostragem segue uma sequência de medição em duas linhas paralelas ao comprimento da amostra.

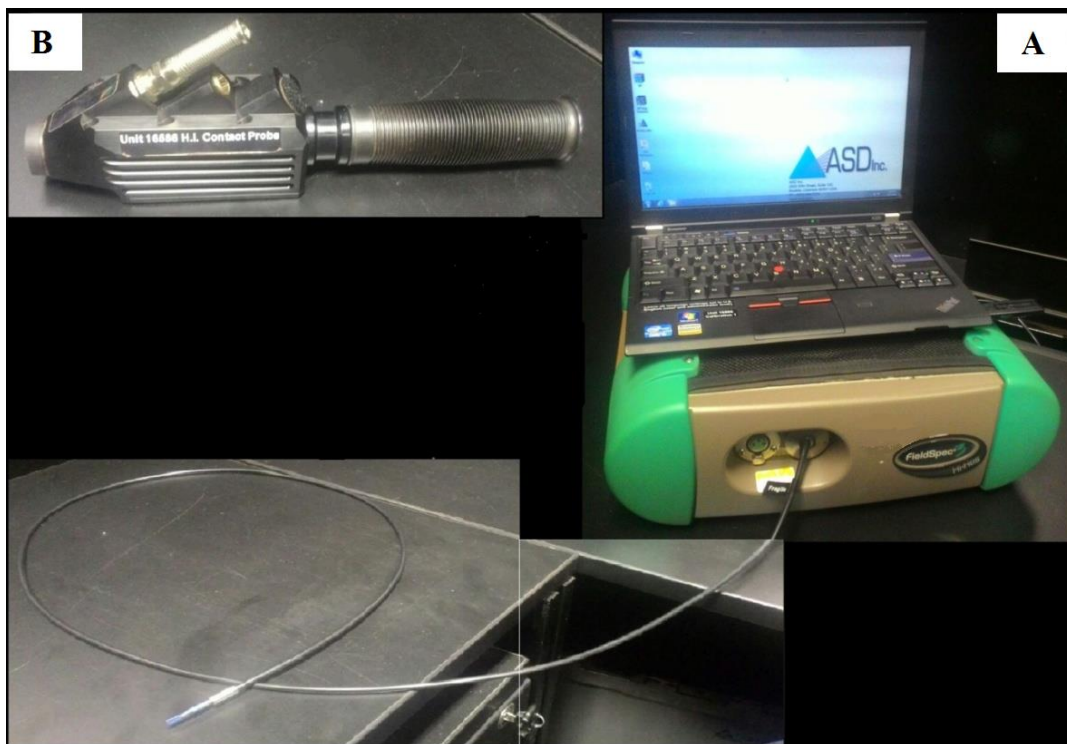


Figura I.5. (A) Espectrorradiômetro de reflectância FieldSpec3HiRes® (ASD) com o cabo de fibra ótica; (B) Sonda de contato, que apresenta como fonte de luz uma lâmpada de halogênio.

Foram obtidos 1050 espectros de 419 amostras. Esses dados foram analisados por meio do *software* comercial “*The SpectralGeologist*” (TSG CoreTM, versão 7.1.0.066). O *software* foi utilizado para processar os dados espectrais de reflectância, obter os parâmetros espectrais e extrair as informações de abundância, composição e cristalinidade dos minerais presentes. Primeiramente foram calculados individualmente os parâmetros espectrais das feições de absorção, como a profundidade e o comprimento de onda ou razão entre as bandas espectrais (Tabela I.5), para então integrar os dados

e obter as informações mencionadas dos minerais (Tabela I.6). Além dos parâmetros espectrais desenvolvidos neste trabalho, alguns parâmetros foram baseados nos propostos por Prado *et al.* (2016) e adaptados ao projeto. Os parâmetros mencionados são ilustrados na figura II.10 e nos apêndices VI.1, VI.2 e VI.3.

Tabela I.5. Algoritmos utilizados na extração dos parâmetros espectrais para cada feição de absorção.

Parâmetro	Função	Algoritmo TSG Core
600-740SL	Identificação dos (hidro-)óxidos de Fe	PFIT: Inclinação contínua entre 600 e 740 nm.
900Dfe	Identificação e quantificação dos (hidro-)óxido de Fe	PFIT: Profundidade do espectro removido do contínuo calculado usando a sexta ordem polinomial de 735 a 1290 nm, com o alcance do foco entre 830 e 1020 nm.
900Wlv-fe	Diferenciação entre hematita e goethita	PFIT: Comprimento de onda do espectro removido do contínuo calculado usando a oitava ordem polinomial de 735 a 1290 nm, com alcance do foco entre 830 e 1020 nm.
N1650R	Albedo	PROFILE: Reflectância média de 1650 ± 100 nm
2164Dk	Identificação da caolinita	PFIT: Profundidade do espectro removido do contínuo calculado usando a sexta ordem polinomial de 2152 a 2180 nm, com alcance do foco entre 2160 e 2170 nm.
2200Dk	Identificação e quantificação da caolinita	PFIT: Profundidade do espectro removido do contínuo calculado usando a oitava ordem polinomial de 2130 a 2245 nm, com alcance do foco entre 2200 e 2215 nm.
2170SL	Índice da cristalinidade da caolinita	ARITH: (R2180/2166)
2170Ck	Cristalinidade da caolinita	ARITH: (2170SL+2200Dk)
1450Dg	Identificação da gibbsita	PFIT: Profundidade do espectro removido do contínuo calculado usando a décima primeira ordem polinomial de 1350 a 1710 nm, com alcance do foco entre 1430 e 1467 nm.
2260Dg	Identificação e quantificação da gibbsita	PFIT: Profundidade do espectro removido do contínuo calculado usando a sexta ordem polinomial de 2115 a 2475 nm, com alcance do foco entre 2240 e 2300 nm.
2251Dcl	Identificação da clorita	PFIT: Profundidade do espectro removido do contínuo calculado usando a sexta ordem polinomial de 2236 a 2268 nm, com alcance do foco entre 2243 e 2258 nm.
2335Dcl	Identificação e quantificação da clorita	PFIT: Profundidade do espectro removido do contínuo calculado usando a sétima ordem polinomial de 2280 a 2408 nm, com alcance do foco entre 2328 e 2360 nm.
2335Wlv-cl	Composição da clorita	PFIT: Comprimento de onda do espectro removido do contínuo calculado usando a sexta ordem polinomial de 2272 a 2381 nm, com alcance do foco entre 2310 e 2370 nm.
1500SL	Identificação do Fe ²⁺	ARITH: (R1650/R1350)
1915Ds/i	Identificação da esmectita-illita	PFIT: Profundidade do espectro removido do contínuo calculado usando a oitava ordem polinomial de 1830 a 2140 nm, com alcance do foco entre 1890 e 1950 nm.
2200Ds/i	Identificação e quantificação da mistura esmectita-illita	PFIT: Profundidade do espectro removido do contínuo calculado usando a terceira ordem polinomial de 2150 a 2238 nm, com alcance do foco entre 2198 e 2220 nm.
2200Cs/i	Cristalinidade da mistura esmectita-illita	ARITH: (2200Ds/i)/(1915Ds/i)
2200Wlv-s/i	Composição da mistura esmectita-illita	PFIT: Comprimento de onda do espectro removido do contínuo calculado usando a terceira ordem polinomial de 2150 a 2238 nm, com alcance do foco entre 2198 e 2220 nm.

Tabela I.6. Produtos espectrais aplicados neste estudo para a extração dos parâmetros de abundância e composição dos minerais dos furos de sondagem do corpo mineralizado N5S.

Nome	Minerais detectados	Base algorítmica	Filtro/Máscaras	Tendência de correlação
Abundância de (hidro-)óxido de Fe	Hematita, goethita	900Dfe	900Dfe>0,025 600-740SL>1,979 2200Dk>0,1 Abundância de clorita, caolinita, gibbsita, esmectita-illita= 0	% Fe ₂ O ₃ = 205,26 x (900Dfe) – 7,735 Accuracy: 14,7% Fe ₂ O ₃
Distribuição de hematita-goethita	Hematita, goethita	9000Wlv-fe	600-740SL>1,979	
Abundância caolinita	Caolinita	2200Dk	2200Dk>0,0129 2164Dk>0,00112 Abundância gibbsita= 0	
Cristalinidade caolinita	Caolinita	2170Ck	2200Dk>0,0129 2164Dk>0,00112 2260Dg<0,012 Abundância gibbsita = 0	
Abundância gibbsita	Gibbsita	2260Dg	2260Dg>0,012 1450Dg>0,0143	
Abundância clorita	Clorita	2335Dcl	2335Dcl>0,0159 2251Dcl>0,005 2260Dg<0,012 Abundância gibbsita =0	
Composição da clorita	Clorita	2335Wlv-cl	2335Dcl>0,0159 2251Dcl>0,005 2260Dg<0,012 Abundância gibbsita =0	
Abundância da mistura esmectita-illita	Esmectita, esmectita/illita e illita/esmectita	2200Ds/i	2200Ds/i>0,00112 1915Ds/i>0,0241 2200Dk<0,018 2260Dg<0,012 Abundância Caolinita, Gibbsita = 0	
Cristalinidade da mistura esmectita-illita	Esmectita, esmectita/illita e illita/esmectita	2200Cs/i	2200Ds/i>0,00112 1915Ds/i>0,0241 2200Dk<0,018 2260Dg<0,012 Abundância Caolinita, Gibbsita = 0	

1.5.5. Propriedades Físicas de Rocha

A utilização de métodos geofísicos para a definição das propriedades físicas das formações ferríferas e do minério de ferro ainda é bastante restrita no mundo, e consequentemente no Brasil. Recorrendo a esse estudo, um dos objetivos deste trabalho é definir a assinatura do corpo N5S utilizando susceptibilidade magnética, gamaespectrometria e densidade obtidos a partir de medidas sistemáticas, de dois em dois metros, em testemunhos de sondagem. A metodologia de coleta e análise

utilizada para cada propriedade é apresentado a seguir. As respostas dos dados foram ilustradas na figura II.17 e apêndices VI.4, VI.5 e VI.6.

I.5.5.1. Susceptibilidade Magnética

A susceptibilidade magnética nas rochas depende da quantidade e do tamanho dos grãos, além do modo de distribuição dos minerais magnéticos. Devido à abundância apenas alguns minerais possuem susceptibilidade magnética suficientemente elevada para produzirem anomalias detectáveis, sendo eles, a magnetita, a pirrotita (monoclínica) e a ilmenita (Gouvêa e Silva, 1995). Sua unidade de medida é adimensional e expressa em SI.

Minerais magnéticos são fortemente afetados por sutis diferenças na geoquímica e por processos secundários geológicos, podendo produzir diferentes propriedades magnéticas para um mesmo litotipo (Dentith e Mudge, 2014). Dentith e Mudge (2014) apresentam um sumário com os intervalos de observação e faixas de susceptibilidade magnéticas mais comuns para vários tipos de rochas e os principais minerais magnéticos (Figura I.6).

Além disso, foi feita uma compilação de dados de Bubner *et al.* (2003), Zacchi (2010) e Ferreira (2014), que indica de forma sumarizada os intervalos de valores de susceptibilidade magnética para diferentes tipos de minério de ferro, formações ferríferas associadas e suas encaixantes, em Middleback Ranges (Austrália), Serra do Sapo, (Brasil) e Carajás (Corpo N4WS-Brasil), respectivamente. (Tabela I.7).

Tabela I.7. Susceptibilidade magnética de formações ferríferas na Austrália e Brasil (dados extraídos de Bubner *et al* 2003^a; Zacchi 2010^b; Ferreira 2014^c).

Litologia	Varição ($\times 10^{-3}$ SI)	Ocorrência
Canga de Minério (CM)	0,31 - 25,17	Carajás ^c
Canga Química (CG)	0,14 - 1,24	Carajás ^c
Formação Ferrífera com Magnetita	1634	Middleback Ranges ^a
Itabirito	0,3 - 10,40	Serra do Sapo ^b
Jaspilito	17,6 - 2111	Middleback Ranges ^a
Jaspilito (JP)	0,51 - 904,33	Carajás ^c
Jaspilito Hematítico	6,3 - 12	Middleback Ranges ^a
Minério de Ferro	0,2 - 42,10	Serra do Sapo ^b
Minério de Ferro (magnetítico)	4,4 - 2111	Iron Duke
Minério de Ferro Hematítico I	30,2 - 52,8	Middleback Ranges ^a
Minério de Ferro Hematítico II	1,0 - 10	Middleback Ranges ^a
Hematítico friável (HF)	0,50 - 111,33	Carajás ^c
Quartzito Hematítico	1,63 - 1684	Middleback Ranges ^a
Rocha Máfica (M) (Basalto)	0 - 21,27	Carajás ^c
Rocha Máfica Semi-Decomposta (MS)	0 - 1,69	Carajás ^c

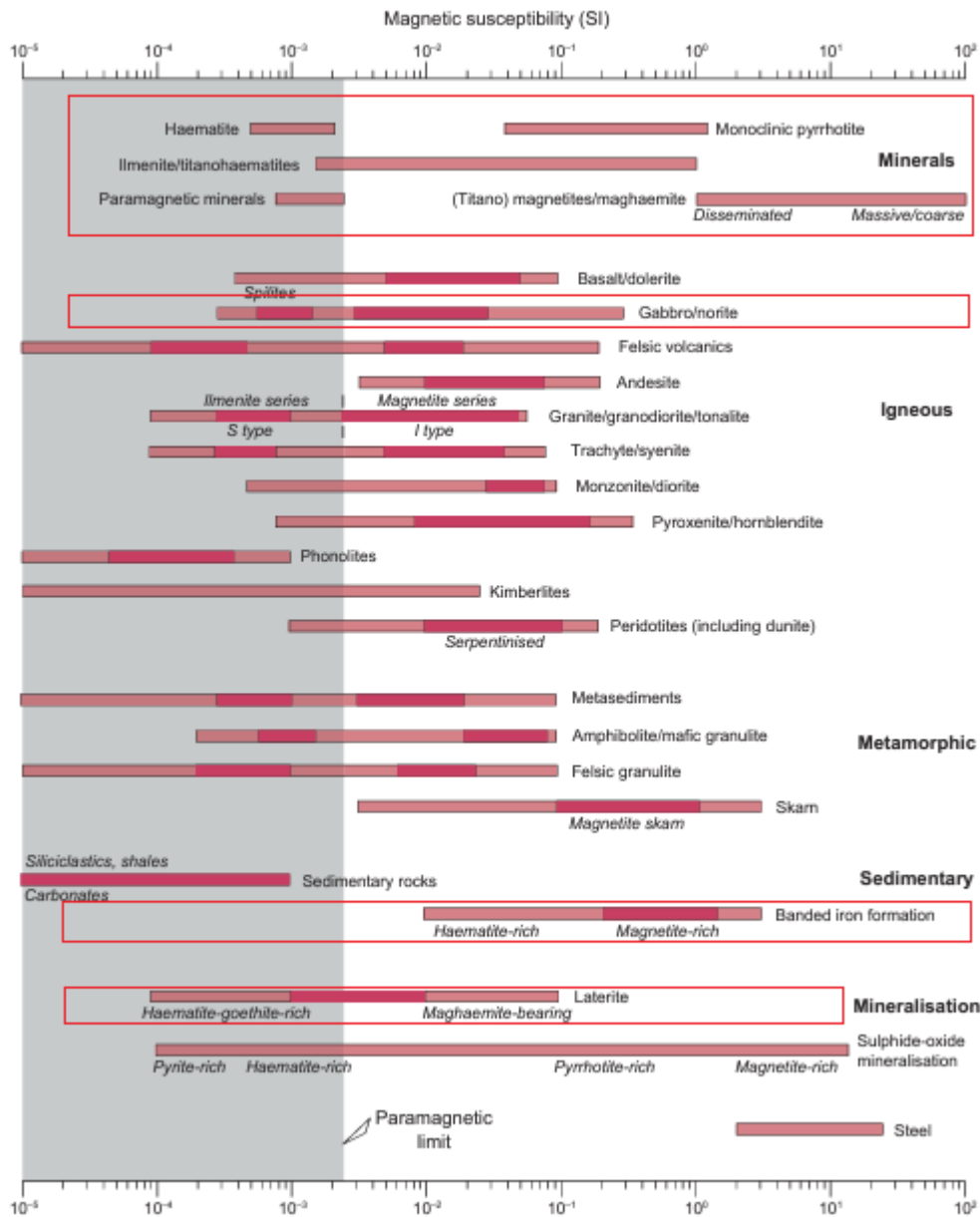


Figura I.6. Valores de susceptibilidade magnética de vários tipos de rochas e dos principais minerais magnéticos com os valores mais comuns (Clark, 1997; *in* Dentith e Mudge, 2014).

Para a aquisição dos dados de susceptibilidade magnética foi utilizado o equipamento MPP-EM2S+ (*Multi Parameter Probe*) desenvolvido pela INSTRUMENTATION GDD INC., que consiste em uma sonda com forma de pistola ligada a uma unidade de leitura (*Palm Top*) e possibilita a determinação da susceptibilidade magnética ($\times 10^{-3}$ SI) (Figura I.7). Os parâmetros do equipamento indicam uma taxa de amostragem de 10 vezes por segundo e uma taxa apresentada a cada 0,5 segundo. Os dados de susceptibilidade magnética consistiram na média de três medições sequenciais com período de estabilização de aproximadamente 15 segundos.



Figura I.7. Equipamento MPP-EM2S+ (*Multi Parameter Probe*) desenvolvido pela GDD INSTRUMENTATION INC utilizado para aquisição dos dados de susceptibilidade magnética.

I.5.5.2. Gamaespectrometria

Para a coleta da emissão de radiação gama dos radioelementos K, Th e U foi utilizado o gamaespectrômetro portátil de 1024 canais RS-230, da *Radiation Solutions Inc* (Figura I.8). O detector é constituído por um cristal de germanato de bismuto que absorve a radiação gama e a transforma em sinais elétricos proporcionais à emissão. O equipamento permite medidas da radiação gama tanto em % de K e ppm de eU e eTh como em contagens por minuto (cpm).

São conhecidos mais de 20 elementos naturalmente radioativos, porem são poucos que podem ser utilizados na prospecção geológica, sendo eles o urânio (U), o tório (Th) e o isótopo do Potássio (K), isso ocorre devido a raridade ou a pouca radioatividade dos outros elementos. Alguns trabalhos determinam intervalos de valores através da concentração de radioelementos. Killeen (1979) classifica rochas sedimentares químicas, aplicável indiretamente às formações ferríferas bandadas, com intervalo de K, U e Th respectivamente entre 0,02 – 8,4%, 0,03 – 26,7ppm, 0,03 – 132,0ppm. Boyle (1982) apresenta teores médios de U e Th para formações ferríferas bandadas de 2,0ppm e 3,0ppm, respectivamente. Ferreira (2014) apresenta valores de K, U, Th e contagem total para os litotipos encontrados na formação ferrífera de Carajás, no corpo mineralizado N4WS, sendo utilizado como o principal parâmetro de comparação devido à proximidade com a área deste estudo e por apresentar valores na mesma unidade de trabalho (contagem por minuto (cpm)) (Figura I.9).

Segundo IAEA (2003), o tempo de amostragem necessário para uma medição depende da radioatividade da fonte e da precisão necessária. Como as rochas do presente trabalho apresentam baixa resposta dos radioelementos, fez-se a amostragem com medições de 5 minutos. Um tempo de

amostragem de 2 minutos para rochas altamente radioativas e 6 minutos para rochas de baixa radioatividade é considerado aceitável, de acordo com testes realizados para um detector de 350 cm³ de NaI(Tl) com uma precisão de 10% (Lovborg e Mose, 1987).



Figura I.8. Gamaespectrômetro RS-320, fabricado pela *Radiation Solutions*, utilizado para aquisição dos dados radiométricos.

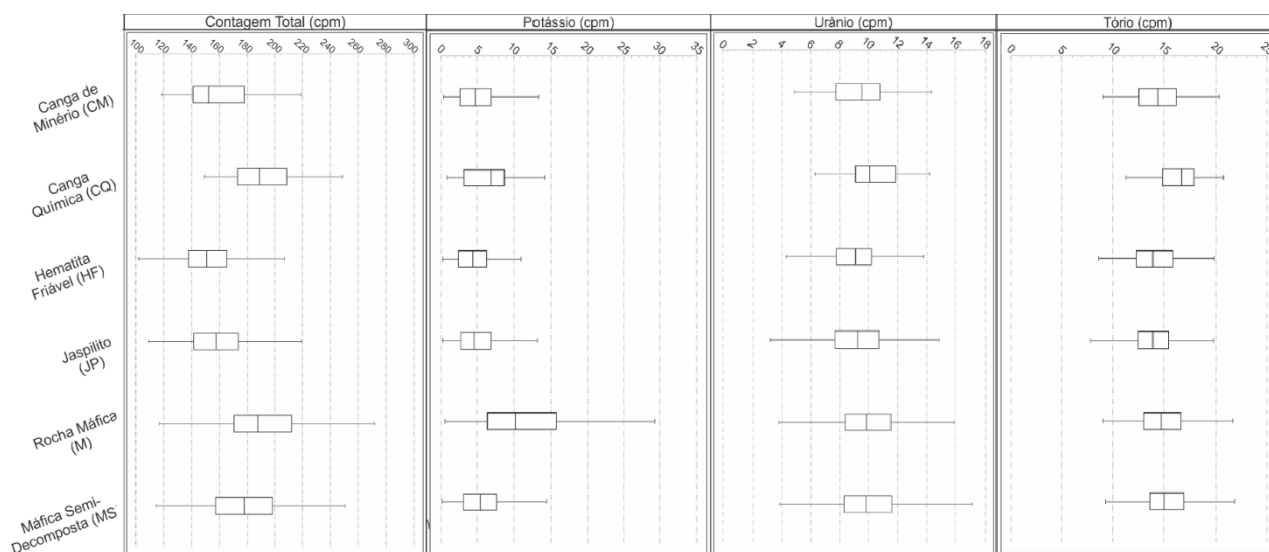


Figura I.9. *Boxplot* dos valores dos radioelementos potássio, urânio e tório e da contagem total para os litotipos descritos por Ferreira (2014), no corpo N4WS.

I.5.5.3. Densidade

Densidade é a propriedade física específica de um material, sendo definido pela quantidade de massa da substância em uma unidade de volume. Pode ser usada para a diferenciação de materiais, pois está ligada à natureza de sua estrutura cristalina. A aferição dos dados de densidade das rochas estudadas proporciona uma melhora na classificação dos litotipos descritos e possibilita a modelagem geológica do bloco estudado, utilizando a inversão geofísica.

A densidade varia em um espectro amplo, o que não possibilita a definição de um padrão de valores para cada tipo de rochas. Isso é reflexo dos diferentes processos geológicos que se traduzem em quantidades distintas de minerais, poros e diferentes condições durante sua formação. Entretanto, os valores das rochas apresentadas na figura I.10 indicam os valores esperados ao se medir esta propriedade física das rochas (Dendith e Mudge, 2014).

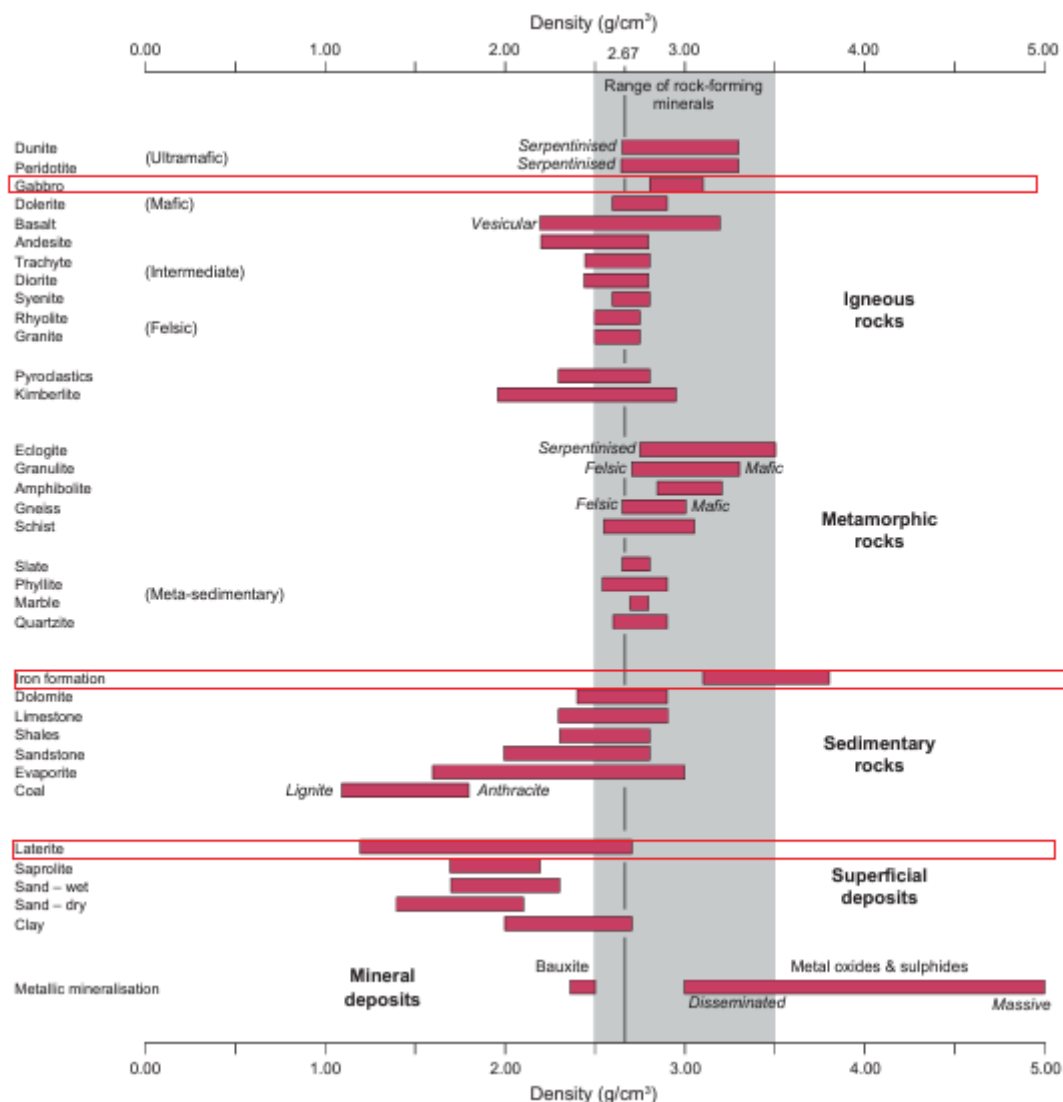


Figura I.10. Variação de densidade dos principais grupos de rochas conhecidos, com destaque para as rochas de estudo nos polígonos vermelhos (Dendith e Mudge, 2014).

A maior dificuldade para medir a densidade de rochas se encontra em amostras, heterogêneas, friáveis ou aquelas distribuídas irregularmente. Existem diversos modos de medir densidade, visto que os materiais terrestres possuem três fases: minerais, espaços vazios e espaços preenchidos com outros materiais (líquido, gás ou os dois). A densidade verdadeira é equivalente à densidade do grão. Já a densidade da massa é medida considerando a porcentagem de espaços vazios, assim como a massa do corpo seco. Esta última relaciona-se com a densidade natural, pois ambas trabalham com os espaços

vazios preenchidos de fluidos. Todavia, a densidade natural equivale à densidade molhada, na qual é medida com base a saturação da água nos espaços vazios da rocha, de forma que considera essa densidade a mais próxima da situação real da rocha em subsuperfície (Hinze, 2013).

Para a aquisição dos dados de densidades das amostras foram utilizados dois equipamentos, sendo um para a rocha sã (a balança industrial IND560), e outro para a rocha friável (Pentapyc 5200e). Na tabela I.8 é possível averiguar o número de amostras medidas em cada equipamento, por furo de sondagem estudado.

A balança de pesagem industrial IND560 vem acompanhada de base acoplável para medidas de massa em imersão, com precisão de três casas decimais e carga máxima 10 quilogramas com erro de 0,001Kg (Figura I.11).

Tabela I.8. Número de amostras medidas pelo método da balança e pelo método do pentapicnômetro em cada furo.

Furos do N5S	Total de Amostras	Amostras Medidas na Balança	Amostras Medidas no Pentapyc
N5S-F867	101	28	73
N5S-F871	119	45	74
N5S-FH01099	96	24	72
N5S-FH01103	103	58	45
TOTAL	419	155	264

Para o cálculo da densidade foi utilizado o método de Arquimedes tendo em vista sua praticidade e confiabilidade. Nesse método assume-se que “Um fluido em equilíbrio age sobre um monólito nele imerso, com uma força vertical orientada de baixo para cima, denominada empuxo, aplicada no centro de gravidade do monólito cuja intensidade é igual ao volume de fluido deslocado”.

Baseado nesse conceito foi utilizado à equação (1), no qual, a densidade do sólido (D_s) é igual à massa do sólido seco (M_{ss}), dividida pela diferença entre a massa do sólido seco e do sólido molhado (M_{si}), multiplicado pela densidade do líquido (D_l).

$$D_s = (M_{ss}/M_{ss}-M_{si}) \cdot D_l \quad (1)$$

A água foi utilizada como líquido para a imersão, como a densidade é igual a 1g/cm^3 , a aquisição da densidade se torna uma razão entre a massa do sólido seco e a diferença dessa massa seca e a massa do sólido molhado.



Figura I.11. Balança de pesagem industrial IND560 com a base acoplável para medidas de massa em imersão.

O Pentapyc 5200e é um equipamento para determinação de volume e densidade de cinco amostras simultâneas, sendo a análise feita em sequência sem o envolvimento de algum operador (Figura I.12A). O equipamento é designado para quantificar o verdadeiro volume de um material sólido por meio do princípio de Arquimedes de deslocamento de fluidos e de expansão de gás (Lei de Boyle). O fluido utilizado é o gás Hélio devido a sua dimensão atômica ser pequena e ocupar as menores cavidades, o que assegura a maior precisão. As amostras são rapidamente e automaticamente analisadas quantas vezes necessárias para arquivar a porcentagem de desvio desejada pelo usuário (0,005) a partir da média do número de leituras (3). As leituras são feitas de forma automática e exportadas para o software FileZilla 30.5.2. Para a medição no equipamento é necessário informar a massa (foram utilizados aproximadamente 20,0g) contida em cada cápsula, para isso utilizou-se a balança SHIMADZU A UW2200 de alta precisão com cinco casas decimais (Figura I.12B).

Como os dados fornecidos pelo Pentapyc 5200e representam a densidade dos sólidos constituintes da amostra, sem considerar sua porosidade foi necessário realizar uma correção dos elementos para uma melhor análise dos furos e comparação com os dados encontrados *in situ*. Para tal correção, baseou-se nas características físicas do solo, partículas sólidas, água e ar, sendo estes dois últimos reconhecidos como espaços vazios ou poros.

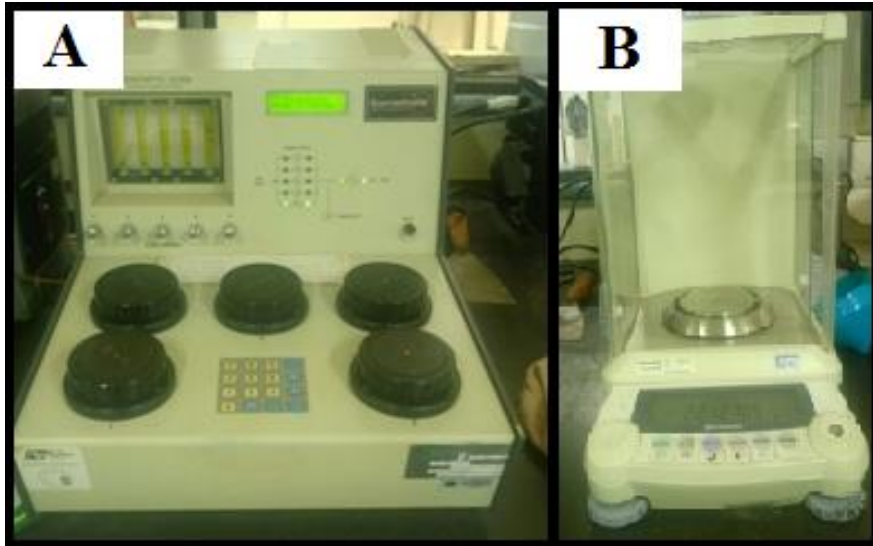


Figura I.12. Equipamentos utilizados na coleta da densidade do material friável (A) Pentapyc 5200e; (B) Balança SHIMADZU AUV2200.

Utilizando a densidade calculada na equação 1 com as massas obtidas pela balança hidrostática, aplicou-se o conceito de densidade para calcular o volume total (V_t), o volume mineralógico (V_m), e o volume de espaços vazios (V_v) de cada amostra compacta, nas equações 2, 3 e 4 respectivamente.

$$V_t = M_{ss}/D_s \quad (2)$$

$$V_m = M_{si}/D_s \quad (3)$$

$$V_v = V_t - V_m \quad (4)$$

Por meio dos valores do volume foi calculado o índice de porosidade, utilizando a equação 5.

$$e = V_v/V_m \quad (5)$$

Como não foi possível mensurar a quantidade de espaços vazios preenchidos por líquidos e/ou gases, para a umidade (W) de cada amostra, foram levadas em consideração duas situações, a primeira em que a umidade de cada amostra foi considerada o valor mínimo, zero por cento (porosidade preenchida por gás), e a segunda, no qual, o valor foi o máximo possível de umidade (porosidade preenchida por água), calculado na equação 6.

$$W = V_v * D_h / M_{ss} \quad (6)$$

Obtendo-se o índice da porosidade e da umidade foi realizada uma média para cada um destes parâmetros considerando os litotipos, o que possibilitou a substituição dos valores na equação 7 e o cálculo da densidade natural (D_n) das amostras a partir da densidade encontrada no pentapicnômetro (D_p).

$$D_n = ((1 - W / (1 - e)) D_p) \quad (7)$$

Para a verificação da veracidade da correção elaborada neste trabalho, calculou-se a média e a variância da densidade natural (D_n) corrigida do pentapicnômetro para cada litotipo e comparou-se

com as densidades fornecidas e encontradas por outras fontes (Tabela I.10). Essas médias foram feitas utilizando as medidas de densidade dos furos de sondagem dos alvos N5S e N4WS para se obter um número significativo de amostras e validar a correção.

Tabela I.9. Tabela com a média e a variação para densidades de cada litotipo obtidas por meio dos métodos do pentapicnômetro, da balança hidrostática e da gamma-gamma, pelo trabalho de Assis (2013) e pela correção dos dados do pentapicnômetro.

Litotipo		Pentapicnômetro	Balança Hidrostática	Assis (2013)	GammaGamma	Pentapicnômetro corrigido
CM	Média	4.88	3.38	3.09	2.97	3.17
	Variação	3.36-5.90	3.05-3.93	-	0.96-3.83	2.19-3.83
CQ	Média	3.65	3.06	2.58	-	2.54
	Variação	3.18-5.61	2.40-3.99	-	-	2.20-3.89
HF	Média	5.45	3.42	3.12	3.41	3.98
	Variação	3.84-6.73	3.32-3.53	-	2.00-4.23	2.81-4.91
JP	Média	4.65	3.4	3.18	-	3.36
	Variação	3.18-5.61	1.98-4.05	-	-	2,32-3.98
M	Média	3.12	2.7	2.58	2.75	2.11
	Variação	2.69-4.20	1.99-3.49	-	2.22-2.93	1.81-2.83
MS	Média	3.35	2.72	2.14	2.48	1.96
	Variação	2.58-5.65	2.04-3.37	-	1.58-4.07	1.51-3.30

Notas: CM = canga de minério; HF = hematitito friável; JP = jaspilito; MS = rocha máfica semi-alterada; M = rocha máfica (gabro)

1.5.6. Software

Os dados obtidos e disponibilizados para a realização deste projeto foram processados, interpretados e analisados dentro de vários programas, sendo eles:

- ✓ Oasis Montaj (versão 8.5), da *Geosoft Inc*, para a elaboração dos mapas aerogeofísicos (extensão Magmap) e dos perfis geológicos (extensão Target);
- ✓ ArcGIS (versão 10.2), da Esri Inc., para elaboração dos mapas geológicos e interpretação de mapas e imagens;
- ✓ TSG CoreTM, versão 7.1.0.066, para análise dos dados espectrorradiométricos, integração com os demais dados obtidos e elaboração dos perfis geoquímicos e petrofísicos;
- ✓ FileZilla 30.5.2. para processamento dos dados de densidade do Pentapyc 5200e;
- ✓ SAnalyst, da Georadis (versão 0.141.0) para processamento dos dados de gamaespectrometria;
- ✓ Microsoft Office Excel 2007 para processamento dos dados de susceptibilidade magnética e análise dos dados obtidos.
- ✓ MATLAB (versão 2016), pacote *Multi Edge Detection* (Wu e Shi, 2014).

CAPÍTULO 2 – ARTIGO CIENTÍFICO

CAPÍTULO 2 – ARTIGO CIENTÍFICO

“THE FOOTPRINT OF THE N5S IRON ORE DEPOSIT IN NORTH MOUNTAIN BASED ON MULTI SOURCE DATA, CARAJÁS MINERAL PROVINCE, BRAZIL”.

Halana Sales Pereira ^a, Catarina Labouré Bemfica Toledo ^a, Adalene Moreira Silva ^a,
Diego Fernando Ducart ^b, Luís Fernando Martins Ribeiro ^c, Luciano Mozer de Assis ^d.

^a Institute of Geosciences, University of Brasília (UnB), 70910-900 Brasília, DF, Brazil.

^b Institute of Geosciences, University of Campinas (Unicamp), PO Box 6152, Campinas, São Paulo, Brazil.

^c Institute of Geotechnical, University of Brasília (UnB), 70910-900 Brasília, DF, Brazil.

^d Exploração Mineral de Ferrosos, Vale S.A., CTF - Miguelão, Fazenda Rio de Peixe, s/no, Nova Lima, MG, Brazil

*Corresponding author. Halana Sales Pereira. Tel: +5561982262356

Email address: halanasales@gmail.com

Abstract

The N5S iron deposit, located in the Mineral Province of Carajás, Brazil, is a world-class deposit where banded iron formations are not metamorphosed, with depositional and diagenetic structures preserved. This deposit presents interesting differences in relation to the compact ore bodies found in the N5 iron deposits, where the friable hematite predominates. The area is covered by aerogeophysical data of high spatial resolution, which together with available geological data allowed the delimitation of the ore's formation, besides defining structures and lineaments present in the region. The geophysical inversion model of the gradiometric gravimetric data, associated with density data collected in the drill holes, delimited denser areas in the surface of the model correlated with the Carajás Formation lithotypes. Magnetic susceptibility data, density, gamma spectrometry, geochemistry and reflectance spectroscopy were carried out in four drill holes that intercept the N5S deposit, which determined the signature of the ore, the protore and its host rocks. It was found that the protore (JP) had about 54% Fe₂O₃ and 44.67% SiO₂, (hydro-) iron oxide (900Dfe), smectite (2200Ds) and average density of 3.4g/cm³, with variations in brecciated jaspilite zones. On the other hand, the ore (HF) showed Fe₂O₃ levels up to 99%, mean density of 4.14g/cm³, higher values of iron (hydro-)oxide (900Dfe) compared to jaspilite (JP) and, occasionally, gibbsite (2260Dg). The main host rocks (M) had 52.65% SiO₂, 10.9% Fe₂O₃, 6.13% FeO and 16.0% Al₂O₃, presence of chlorite (2335Dcl) and smectite-illite mixture (2200Ds/i) and an average density of 2.74g/cm³. In addition, the data integration provided the delimitation of hydrothermal alteration regions in the drill holes. The representation of some results in profile allowed to discern regions with different compositions and characteristics in the N5S. The

parameters of the (hydro-)oxide iron presented the profile of deeper supergenic alteration in the western region of the profile, being also verified by geochemistry and gamma spectrometry data.

Keywords: N5S iron deposit, iron ore, aerogeophysical, physical rock properties, reflectance spectroscopy, geochemistry, multi-source data integration, Carajás.

1. Introduction

Iron ore deposits are subject of studies on many continents, not only because they are the largest sources of iron, but also because they can provide important information for the study of Earth's evolutionary history (Spier et al., 2006). Unlike the majority deposits in the world, the banded iron formations of the Carajás Mineral Province (CMP) were not affected by regional metamorphism and showed preserved depositional and diagenetic structures (Macambira and Silva, 1995). In addition, the original geochemical signature was not affected by subsequent tectonic processes (Macambira, 2003). In general, Carajás hematite iron ore deposits are a product of enrichment of the Carajás Formation jaspilite, due to the preferential leaching of silica, which increased the iron content from about 36-45% to 64-68% (Beisiegel, 1982; Tolbert et al., 1971; Dardenne and Schobbenhaus, 2001; Macambira, 2003).

The N5S ore body, the object of study, is a world-class deposit with 888 million tons of proven and probable reserves with a Fe average of 67.2% (Vale SA, 2015). Moreover, the economic attractive, the deposit N5S is different from the other bodies of the N5 body due to the predominance of friable hematite (Figueiredo e Silva, 2009). Iron ore has an important role in the Brazilian and international economy, its abundance and ease of exploration have made prospective innovative method studies limited when compared to other commodities.

Some techniques may provide important information for the study of the iron deposit: aerogeophysical allow the delimitation of the ore's formation, besides defining structures and lineaments (Assis, 2013; Ferreira, 2014); magnetic susceptibility, density and gamma spectrometry characterize the physical properties of the rocks and help in the stratigraphic correlation between the drill holes (Ferreira, 2014); reflectance spectroscopy and geochemistry that characterize the composition and mineralogy of rocks (Prado et al., 2016). The integration between these techniques has helped to confirm existing genetic models and to generate new prospective criteria for iron ore (eg. Zacchi, 2010; Assis, 2013; Ferreira, 2014; Prado et al., 2016). Besides, the integration of all these techniques provides continuous vertical and horizontal sampling, presenting a range of results, which together provide a signature for the iron ore and the host rocks, defining the iron formation, its mineralogical variation and hydrothermal alteration zones.

Geophysical airborne surveys are important in the prospecting phase, since they have a fast and uniform sampling, regardless of the type of surface. Currently, applications for iron ore prospecting are still restricted, with the most significant advances in the last decade, such as the application of 3D aerogravimetry gravimetric and other indirect methods (eg. Dalstra and Flis, 2008; Flis, 2008; Braga et al., 2009). Aerogeophysical data, together with geological data, allow directly or indirectly mapping

the iron ore, defining structures and lineaments of the region (eg. Braga et al., 2009; Assis, 2013; Ferreira, 2014).

The characterization of the physical properties of the rocks carried out in samples collected in drill holes favors the obtaining of continuous information of magnetic susceptibility, gamma spectroscopy, electrical conductivity and density data (Dentith and Mudge, 2014; Pereira et al., 2016). For iron ore deposits, physical property analyses are also restricted and can be used for stratigraphic correlation between several survey data, creating a physical signature of the various geological units, and may also assist in spatial modeling and geophysical inversion (Zacchi, 2010; Assis, 2013; Ferreira, 2014; Souza et al., 2016).

Reflectance spectroscopy is another tool that has been successfully applied in the mineralogical study of hydrothermal alteration associated with mineral deposits (Thompson et al., 1999; Ducart et al., 2006; Laakso et al., 2016; among others). For iron ore deposits, in addition to qualitatively determining mineralogy, it is also useful for a quickly estimation of iron content, showing iron concentration and the abundance of contaminants in the deposit (Cudahy and Ramanaidou, 1997; Ramanaidou et al., 2008; Haest et al., 2012I, 2012II; Murphy and Monteiro, 2013; Singh et al., 2016; Prado et al., 2016).

The study area is covered by magnetic, gamma spectrometric and gravimetric airborne data that together with geological data delimit the ore, the protore and its host rocks. Magnetic susceptibility, density, gamma spectrometry, geochemistry and reflectance spectroscopy data were collected in four drill holes that intercept the N5S deposit, to mapping the subsurface continuity and to perform the stratigraphic correlation between several holes, using the physical properties of the rocks, mineral and compositional variations of the ore, protore and host rocks. The present work aims to define the footprint of the N5S iron ore deposit, using the integration of surface geological data, aerogeophysical data, physical properties of rock (magnetic susceptibility, gamma spectrometry and density), petrographic, geochemical, as well as reflectance spectroscopy data. The intention is to generate subsidies for the exploration of others iron deposits in the Mineral Province of Carajás.

2. Geological settings and iron deposits in the Carajás Mineral Province

2.1. Geological Settings

The Carajás Mineral Province (CMP) is in the east-southeast portion of the Amazonian Craton (Gibbs et al., 1986) and is formed by two domains: Carajás in the north and Rio Maria in the south (Tassinari et al., 1996). The Rio Maria Domain is characterized by a juvenile mesoarchean crust, with greenstone belts and TTG terrains. In contrast, the Carajás domain is a predominantly neoproterozoic

continental crust region, characterized mainly by metavolcanosedimentary sequences and high potassium granitoid. Both domains are marked by Orosirian type A granitic magmatism (Vasquez et al., 2008).

The basement of the Carajás Domain is mesoarchean and consists of three distinct sets of rocks: migmatite orthogneisses, sequences of greenstone belts, and gneissified calcio-alkaline granitoid, (Tavares, 2014; Justo, 2014). These associations are incorporated by several authors into the Xingu Complex (Araújo et al., 1988; Macambira et al., 1990; Araújo and Maia, 1991; Oliveira et al., 1994; Macambira, 2003; among others). Covering the basement is the metavolcanosedimentary sequences of the Itacaiúnas Supergroup, grouped initially in the Igarapé Bahia, Aquiri and Grão Pará groups in the southern portion, and in the Igarapé Salobo and Igarapé Pojuca groups in the northern portion of the CMP (Docegeo, 1988). Docegeo (1988) also includes the Buritirama Group in the Itacaiúnas Supergroup. The Carajás Formation, object of this study, is part of the Grão Pará Group and consists of jaspilite that host the main iron orebodies of the Carajás Province.

The metavolcanosedimentary sequence of the Grão Pará Group is overlapped discordantly on basement and intruded by the Carajás Central Granite, which is 1.89 Ga (Wirth et al., 1986; Machado et al., 1991) (Fig. 1). The base of the Grão Pará Group is composed by basalts and basaltic andesites rocks, subordinate felsic volcanic rocks, and mafic intrusions (sills and dikes) of the Parauapebas Formation, with ages around 2.76 Ga (Olszewski et al., 1989; Machado et al. Al., 1991; Trendall et al., 1998). The volcanic mafic rocks are superimposed by a thick jaspilite package belonging to the Carajás Formation. The Carajás Formation consists of banded iron formations in oxide facies, of the jaspilite type, partially transformed into hematite ore intercepted by dikes and sills of mafic rocks. The jaspilite occurs in the tabular form and is concordant with the Parauapebas and Igarapé Cigarra formations. The Carajás Formation has an average thickness of 200-250 m in the Serra Norte and over 300 m in the Serra Sul (Macambira, 2003). The age of Carajás Formation is inferred between 2740 ± 8 and 2757 ± 18 Ma (Trendall et al., 1998). The Igarapé Cigarra Formation is superimposed on the jaspilite and is composed by mafic flows with intercalations of tuffs, followed by clastic sedimentary rocks such as siltstone and grauwacke (Gibbs et al., 1986; Macambira, 2003).

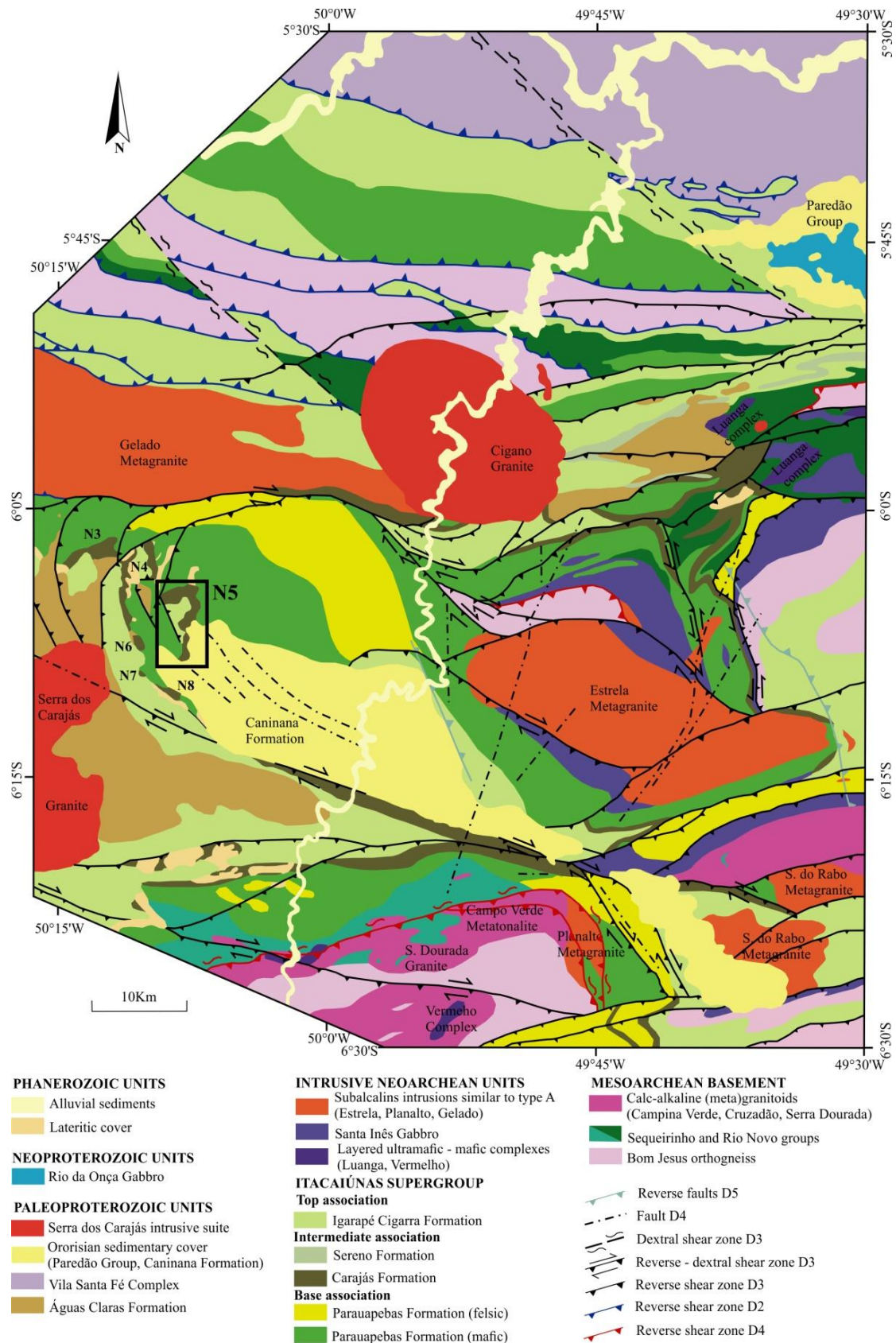


Fig. 1. Simplified geological map of the Carajás Mineral Province (Tavares, 2015). The polygon highlights the deposit of N5.

The Itacaiúnas Belt is a deformation belt with E-W direction coinciding with the Carajás Domain and parallel to the boundary with the Rio Maria Domain (Araújo et al., 1988). This belt is understood as a deep structural discontinuity and conducive to subsequent processes of reactivation during subsequent tectonic events. It was formed by the superimposition of four Archaean events, being two compressional and two extensional, which produced and/or reactivated subparallel structures, in the E-W direction (Tavares, 2015).

2.2. Mineralization of iron

The iron deposits of the Carajás Mineral Province are distributed along the Carajás fold, containing jaspilite, friable and compact hematite ores, involved by volcanic mafic rocks (Lobato et al., 2005b; Rosière et al., 2006). The iron deposits are distributed in three districts (North, South and East Mountain), where there are 57 discontinuous bodies of high-grade ore. In the mining district of the Norte Mountain, are the open pit mines N4 and N5, besides the deposits N1 to N3 and N6 to N9 (Fig. 1). The thickness of the mineralized package varies between 250 and 300 m, the extension varies between 200 m (N3, N6, N7 and N9) up to 10 km (N4) and the vertical extension can reach up to 600 m. Numerous unexploited iron deposits are also distributed in the Eastern and Southern Mountain (eg. Lobato et al., 2005). The N5 body is characterized by a syncline structure dipping to SW, marked by the distribution of the Carajás Formation (Macambira, 2003) (Fig.2).

The hematite ore occurs as friable bodies from tabular to lenticular shape and irregular contact that involves lenses of compact ore bodies (Guedes et al., 2002). They are constituted by hematite, magnetite and locally carbonate, with quartz and carbonate veins/venules (Figueiredo e Silva, 2004). Locally, brecciated ores occur in compact ore lenses composed of aggregates of hematite crystals, where the original texture and structure are destroyed. The nomenclature used by mine geologists for the descriptions of drill cores for mining purposes are presented and described in the attachment 1. In the Norte Mountain deposits, compact magnetite-rich lenses are found located in the contact between the jaspilite and the ore (Figueiredo e Silva, 2009). The N5 body presents characteristics quite distinct from N4, with jaspilite and high-grade ore totally enveloped by the volcanic mafic rocks of the Parauapebas/Igarapé Cigarra formations. The ore consists essentially of hematite, with a predominance of compact ore, gray-metal, in contrast to N4 where the ore is porous and dark gray. Venules are abundant, occurring discordant bodies subordinately among the friable ore (Guedes, 2000). Locally, the host rocks are also enriched in hematite.

Until today, there is no consensus regarding the genesis of iron ore mineralization in the Carajás Mineral Province, Gross (1980) highlights three main models: supergenic, hydrothermal, and hydrothermal-supergenic alteration. For Tolbert et al. (1971) and Dardenne and Schobbenhaus (2001),

iron ore was formed by supergenic enrichment processes, with the leaching of the silica from the jaspilite by meteoric waters, which resulted in the residual enrichment of the iron oxides and the formation of the present of ore bodies. According to Dalstra and Guedes (2004), Rosière et al. (2004) and Lobato et al. (2005a, 2005b) the genetic model involves hydrothermal leaching of silica from the iron formation and introduction of Ca, Fe and Mg carbonates. For Rosière et al. (2004), there is still a structural control in these mineralization, since the large bodies have developed in zones of greater permeability, that is, in the hinge zone of Carajás's synform. Beukes et al. (2002) classified Carajás iron ore as supergenically modified hydrothermal deposits, where friable hematite ore was formed by the supergenic enrichment of the banded iron formation previously hydrothermally altered, near high-grade hydrothermal compact hematite bodies. Beisiegel et al. (1973) and Figueiredo e Silva (2009) proposed a similar origin for iron ore from the Carajás Mineral Province.

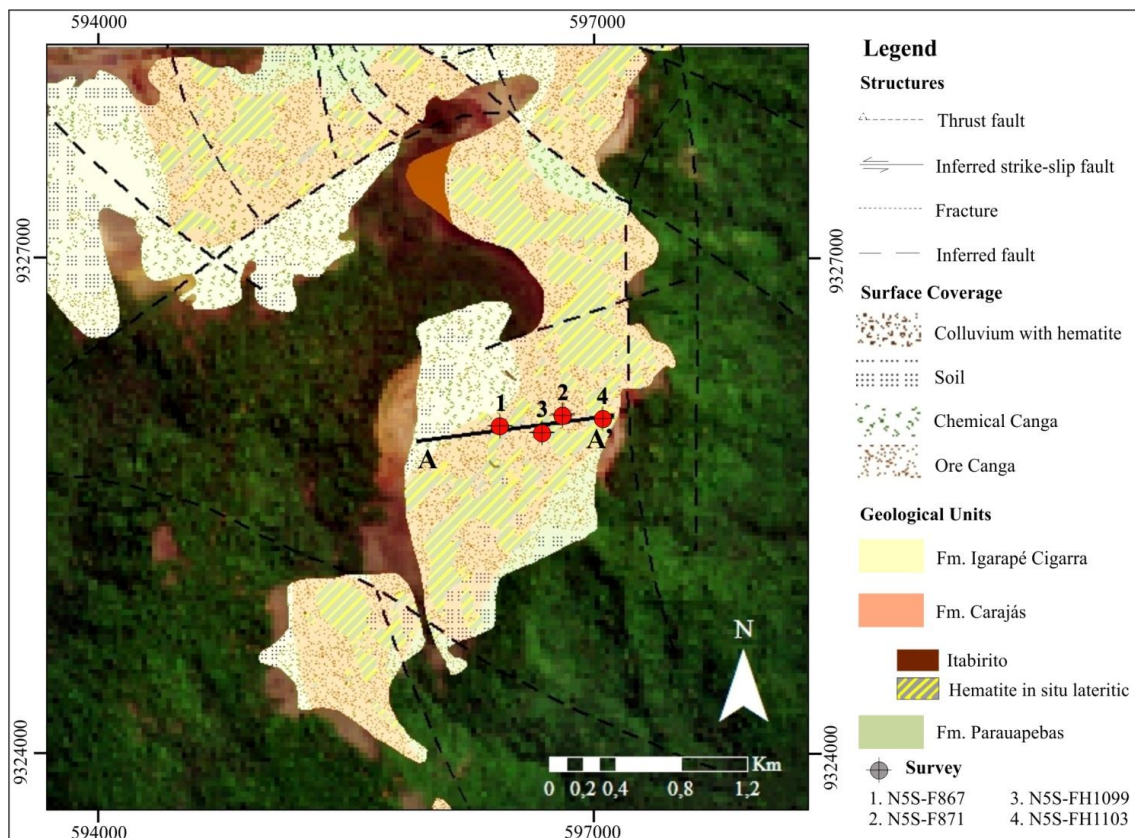


Fig. 2. Geological map of the N5 body (Tolbert et al., 1971; Resende and Barbosa, 1972; Macambira, 2003). Landsat 8 satellite background image with Operational Land Imager (OLI) sensor, RGB composition. The location of the survey and the geological profile are indicated on the map.

3. Materials and Methods

3.1. Sampling and fieldwork

The field work was carried out in July 2011 and lasted 20 days in which the drill cores for N5S-F867, N5S-F871, N5S-FH1099 and N5S-FH1103 holes were described, distributed in a section N82,7°E (Fig.2). The description of the drill holes followed the nomenclature adopted at the mine for the lithotypes and assisted in the elaboration of the geological section that supported this research (Fig.3) A geological section was performed with the description of 35 holes provided by the company, having up to a 75m distance from the section drawn. A sample was collected each two meters with 0.15m of extension, totaling 419 samples. These samples were destined for petrographic, lithochemical analysis, reflectance spectroscopy and physical properties data. Ten samples outside these ranges were also collected to produce petrographic thin section, where textural and mineralogical variations were observed.

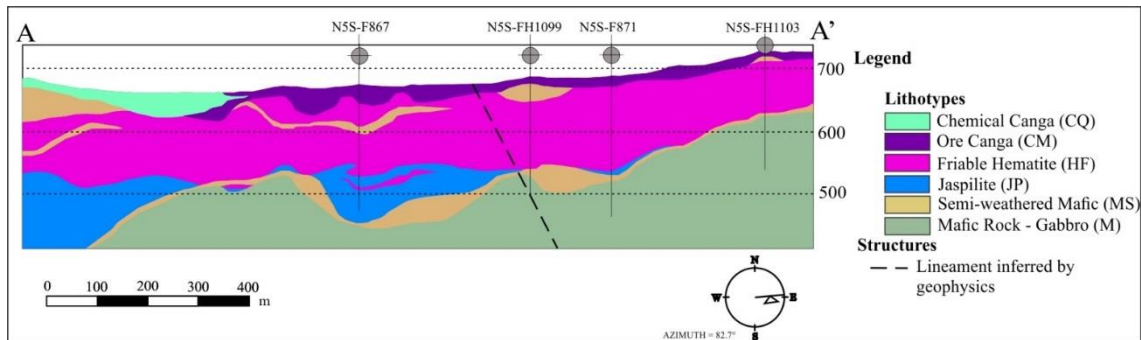


Fig. 3. Geological section A-A' in the N5S body, following the nomenclature and description of the different types of rocks used by the company Vale S.A. The location of the profile on the map is in fig. 2.

3.2. Petrography

The petrographic analysis was based on the description of 49 thin section to identify the mineralogy and the primary structures of the ore and its hosting. Thirteen of these samples were laminated after analysis of the geochemical and reflectance spectroscopy data, with the intention of validating the geochemical data and the minerals determined by reflectance spectroscopy. The thin sections were made in the Laminating Laboratory of the Institute of Geosciences of the UnB and the petrographic descriptions were made under a petrographic microscope in the Laboratory of Microscopy of the University of Brasília.

The mineral chemical analyses of chlorite were carried out on the Microprocessor Electronics, Cameca brand, model Camebax SX 50, from the University of Brasília (Appendix 1). The excitation voltage of 15 kV, an electric current of 25 hA and a beam diameter of 5 nm was used. The standards used consisted of natural minerals, synthetic glasses, and metals.

3.3. Geochemistry

The litho-geochemistry aimed at the identification of internal compositional variations of the mineralized body N5S and its hosting rocks. It was done measurements of major, minor and trace elements in 419 samples collected every 2 meters in the surveys. The sample preparation and chemical analysis were carried out in ALS Chemex (Canada) laboratory, following standard laboratory procedures, using five methods designated by the following codes: ME-MS81 (ICP-MS); ME-ICP41 (ICP-AES); ME-XRF06 (X-ray Fluorescence); Fe-VOL05 (Titration) e; AO-GRA06 (WST-SIM) in total rock. A full description of the analytical methods is available in ALS (2017). The major elements were analyzed by X-ray Fluorescence and presented in percentage by weight of oxides. The results of the study were based on the results obtained by ICP-MS, which was used to evaluate the effects of high-strength element (HFSE) and high ion strength (LF) Sc, Tl and Zn were determined by ICP-AES, ferrous iron (Fe²⁺) by volumetric titration and loss on ignition (LOI) by WST-SIM. The treatment of the geochemical data was done using The SpectralGeologist (TSG Core™, version 7.1.0.069). The mean of the main analyses for each lithotype is represented in table 1.

3.4. Reflectance spectroscopy

The spectral quantification method of this work followed the methods published by Haest et al. (2012) and Prado et al. (2016). The reflectance spectra of the samples were obtained using a FieldSpec3HiRes® (ASD) reflectance spectroscopy, covering the wavelength range from visible and near infrared (VNIR: 350-1000 nm) to short-wave infrared (WSIR: 1,000 -2500 nm). The measurements were performed using a contact probe, which presents a halogen lamp as the light source since it has a higher accuracy than the pistol (Prado et al., 2016). The window acquisition of the contact probe has a diameter of 1cm, and the saved spectrum represents the average of 75 spectra collected in the same area. The sampling interval of the spectrometer is 1.4 nm in the VNIR and 2.0 nm in the WSIR, with a wavelength accuracy of ± 0.5 nm. The spectral resolution is 3nm at VNIR and 8nm at WSIR. The spectra collected by the ASD are converted from radiation to reflectance using the Spectralom™ signal, collected by means of a calibration done every 15 minutes during data collection. The most effective sampling methodology follows a measurement sequence in two lines parallel to the sample length (Prado et al., 2016).

The spectra were obtained from 419 samples, also collected every 2m in the four drill holes, in a total of 1050. These data were analyzed using commercial software "The Spectral Geologist" (TSG Core™, version 7.1.0.069). The software was used to process the reflectance spectral data, obtain the spectral parameters and extract information on abundance, composition, and crystallinity of the

minerals present. Firstly, the spectral parameters of the absorption features, such as depth and wavelength or ratio between the spectral bands (Appendix 2), were then individually calculated to integrate the data and obtain the information of the minerals (Appendix 3). In addition to the spectral parameters developed in this work, some parameters were based on those proposed by Prado et al. (2016) and adapted to the project.

Table 1. Mean contents for the major elements, Ti (%) and trace (ppm) in the main lithotypes of the N5S body.

Chemical Element	Ore Canga (CM)	Friable Hematite (HF)	Jaspilite (JP)	Semi- weathered Mafic (MS)	Mafic (Gabbro) (M)	Rock
Fe₂O_{3T}*	88.78	96.87	54.62	40.38	10.90	
SiO₂	0.58	1.24	44.67	12.25	52.64	
Al₂O₃	3.60	0.47	0.23	26.42	16.00	
FeO	0.36	0.42	0.50	0.79	6.13	
CaO	0.02	0.01	0.02	0.10	2.05	
MgO	0.04	0.04	0.04	0.24	6.25	
Na₂O	0.02	0.02	0.02	0.08	1.59	
K₂O	0.01	0.02	0.01	0.81	4.63	
MnO	0.03	0.13	0.07	1.62	0.31	
P₂O₅	0.52	0.04	0.01	0.30	0.26	
Cr₂O₃	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	
TiO₂	0.45	0.03	0.05	2.35	0.97	
SrO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	
BaO	0.00	0.01	0.01	0.36	0.27	
LOI **	6.36	1.51	0.40	15.47	4.54	
Ti	0.06	0.01	0.02	0.09	0.16	
Co	1.10	4.39	2.62	31.78	34.94	
Cr	67.86	23.94	34.55	236.80	126.61	
Cu	23.04	44.00	19.64	275.00	61.83	
Ni	1.75	3.08	1.50	27.73	91.47	
Sc	2.89	1.25	1.00	29.48	8.68	
P	1675.36	131.10	15.15	998.40	1050.00	
Pb	9.50	17.07	3.74	34.16	8.60	
Zn	17.39	66.85	17.86	137.76	343.43	
Σ REE ***	41.80	27.62	26.01	184.15	218.77	

* Total iron; ** Loss by calcination (LOI); *** Rare earth elements (REE).

3.5. Physical properties of rocks

3.5.1. Magnetic Susceptibility: The MPP-EM2S + (Multi-Parameter Probe), developed by INSTRUMENTATION GDD INC., was used to acquire magnetic susceptibility data, consisting of a gun-shaped probe attached to a reading unit (Palm Top) Which makes possible the determination of the magnetic susceptibility (x10⁻³ SI). The equipment parameters indicate a sampling rate of 10Hz.

The magnetic susceptibility data consisted of the average of three sequential measurements, with a stabilization period of approximately 15 seconds and are presented in SI.

3.5.2. Gamma spectrometry: RadiationSolutions Inc.'s 1024-channel portable spectrometer RS-230 was used to collect gamma spectrometry from the K, Th and U radioelements. The detector consists of a bismuth germanium crystal that absorbs gamma radiation and electrical signals proportional to the emission. The equipment allows measurements of gamma radiation both in % K and ppm eU and eTh as in counts per minute (cpm). The sampling time required for a measurement depends on the source radioactivity and the required accuracy (IAEA, 2003). As the rocks of the present work present low response of the radioelements, the sampling was done with measurements of 5 minutes.

3.5.3. Density: Two scales were used to obtain the density of the samples. The hydrostatic scale was used for measurements of natural density in hard, compact and/or fractured rocks (155 samples). Measurement of the true density in friable rocks was performed with the pentapycnometer model Pentapyc 5200e (264 samples).

The industrial weighing scale IND560 comes with an attachable base for immersion mass measurements, accurate to three decimal digits and maximum load 10 kg with a 0.001 kg error. For the density calculation, the Archimedes method was used in view of its practicality and reliability. Based on these concepts, it was used to equation (1), where the density of the solid (D_s) is equal to the mass of the dry solid (M_{ss}), divided by the difference between the mass of the dry solid and the wet solid (M_{si}), multiplied by the density of the liquid (D_l).

$$D_s = (M_{ss}/(M_{ss}-M_{si})) \cdot D_l \quad (1)$$

The water was used as the liquid for immersion ($1\text{g}/\text{cm}^3$), then the density measurement becomes a ratio between the mass of the dry solid and the difference of this dry mass and the mass of the wet solid.

Pentapyc 5200e is designed to quantify the true volume of a solid material by the Archimedes principle utilizing gas expansion (Boyle's Law). The fluid used is Helium gas because its atomic size is small and occupy the smallest cavities, which ensures the highest accuracy. Samples are quickly and automatically analyzed as often as necessary to archive the user's desired deviation percentage (0.005) from the average number of readings (3). The readings are made automatically and exported to the FileZilla 30.5.2 software. For the measurement in the equipment it is necessary to inform the mass (approximately 20.0g) contained in each capsule, for that, was used the SHIMADZU AUW2200 scale of high precision was used, with five decimal places.

As the data provided by Pentapyc 5200e represent the density of the constituent solids of the sample, without considering its porosity it was necessary to perform a correction of the elements for a better analysis of the samples and comparison with the data found in situ. For this, the correction was based on the physical characteristics of the soil, solid particles, water, and air, the latter two being recognized as empty spaces or pores.

The true density is equivalent to grain density. Already the mass density is measured considering the percentage of empty spaces, as well as the mass of the dry body (M_{ss}) measured in the hydrostatic scale. However, natural density equals wet density, which is measured based on the water saturation of the empty spaces of the rock, so that it considers this density to be closest to the actual situation of the subsurface rock (Hinze, 2013). The density concept was used to calculate the total volume (V_t), the mineralogical volume (V_m), and the volume of empty spaces (V_v) of each sample using the density calculated in equation 1 with the masses obtained by the hydrostatic scale. In equations 2, 3 and 4 respectively.

$$V_t = M_{ss}/D_s \quad (2)$$

$$V_m = M_{si}/D_s \quad (3)$$

$$V_v = V_t - V_m \quad (4)$$

The porosity index (equation 5) can be calculated by the ration between the equations (4) and (3).

$$e = V_v/V_m \quad (5)$$

It was not possible to measure the quantity of voids filled by liquids and/or gases in the moisture (W) of each sample, due to it two situations was considered, in the first one the humidity of each sample was considered the minimum value (porosity filled by gas), and in the second, the value was the maximum possible moisture (porosity filled by water), calculated in equation 6.

$$W = V_v * D_h / M_{ss} \quad (6)$$

Obtaining the index of porosity and moisture, a mean was performed for each of these parameters considering the lithotypes, which made it possible to substitute the values in equation 7 and calculate the natural density (D_n) of the samples from the density found in the pentapycnometer (D_p).

$$D_n = ((1-W)/(1-e)) * D_p \quad (7)$$

To validated the correction made, the average and the variance of the natural density (D_n) corrected of the pentapycnometer for each lithotype were calculated and compared with the densities provided

by other sources (Table 2). These averages were made using the density measurements of the N4WS and N5S targets to obtain a significant number of samples and to validate the correction.

Table 2. The mean and variation of the density of each lithotype obtained by the pentapycnometer and the hydrostatic scale in the four holes of the N5S and eleven holes of the N4WS, gamma-gamma profiling, Assis (2013) and correction of the data of the pentapycnometer.

Lithotypes		Pentapyc	Hydrostatic scale	Assis (2013)	Gamma Gamma	Fixed Pentapyc
CM	Mean	4.88	3.38	3.09	2.97	3.17
	Variance	3.36-5.90	3.05-3.93	-	0.96-3.83	2.19-3.83
CQ	Mean	3.65	3.06	2.58	-	2.54
	Variance	3.18-5.61	2.40-3.99	-	-	2.20-3.89
HF	Mean	5.45	3.42	3.12	3.41	3.98
	Variance	3.84-6.73	3.32-3.53	-	2.00-4.23	2.81-4.91
JP	Mean	4.65	3.4	3.18	-	3.36
	Variance	3.18-5.61	1.98-4.05	-	-	2,32-3.98
M	Mean	3.12	2.7	2.58	2.75	2.11
	Variance	2.69-4.20	1.99-3.49	-	2.22-2.93	1.81-2.83
MS	Mean	3.35	2.72	2.34	2.48	1.96
	Variance	2.58-5.65	2.04-3.37	-	1.58-4.07	1.51-3.30

Notes: CM = ore “canga”; CQ = chemical “canga”; HF = friable hematite; JP = jaspilite; MS = semi-weathered mafic; M = mafic rock (gabbro).

3.6. Aerogeophysical Data

The airborne geophysical data were supplied by Vale S.A. and processed by Assis (2013). For the present study, these data were windowed for the area of the mineralized body N5S, the table 3 shows the characteristics of surveys. The magnetometry survey was carried out simultaneously with the gravimetric survey using the Full Tensor Gravimetric (FTG) system, and the direction of the flight lines were defined to ensure less interference of the relief in the acquisition of the data, being programmed to be aligned with the main physiographic features of Norte Mountain (Braga, 2009). The gamma spectroscopy survey was carried out in 1995 and for the total coverage of the Norte Mountain plateaus, two airborne surveys were carried out, with the same acquisition characteristics.

To assist in the analysis of the structures and features of aerogeophysical maps, the multiscale edge detection (MED) processing was used for both aerogravimetry and aeromagnetic survey. Most of the information is contained in analytical signal irregularities which, map the boundaries of contrasting properties of underground rocks (contacts, faults, etc.). The MED also provides information about the

depth and type of causative sources. Three-dimensional sources give a different signature compared to dikes and contacts (Archibald et al., 1998).

Table 3. Methodology and characteristics of aerogeophysical data processed by Assis (2013) and windowed for this project.

Method	Equipment used	Equipment methodology	Fligh direction	Fligh height	Fligh line spacing	Control line spacing
Gravity Gradiometry	Full Tensor Gravity Gradiometry (3D-FTG) in the Cessna Grand Caravan aircraft	Mobile platform consisting of 12 accelerometers that measure the five independent components of the gravity gradient and represent the acceleration of gravity along the cartesian axes	N25W	150m	150m	Not executed
Magnetometry	Cesium vapor optical pumping sensor, model Scintrex CS-2, in the Cessna Grand Caravan aircraft	The sampling rate was 10Hz, generating 1 measurement nearly 7m, with reading of the values of the gross and compensated magnetic field	N25W	150m	150m	Not executed
Gamma Spectroscopy	EXPLORANIUM Gamma Spectrometer, model GR-820, on Cessna Grand Caravan aircraft	The interval between measurements was 1Hz, that's mean, a measurement nearly 70m	N15E	150m	250m	250m in direction N75W

In this work, a constrain geophysical inversion was performed utilizing the FTG data. In general, the methodology used three steps: terrain correction, construction of the initial geological model, and inversion of geophysical data. The initial geological model was obtained from the densities collected in the drill holes. To removal the topographic influence, the methodology suggested by FritztGerald and Patterson (2013) was used and the value of 2.7 g/cm³ was used in the terrain correction. Thus, the anomalous positive values correspond to sources with a density greater than the chosen value, which includes the mineralized layers with iron ore. The density data were obtained in this work and can be visualized in table 4. Based on the same table it is possible to affirm that the densest lithotype is the friable hematite with an average density of 4.14 g/cm³. The data obtained show that if we consider the whole mineralized package, in the friable hematite, jaspilite and the most weathered part called ore “canga” (HF + JP + CM), the average density of the package is 3.97 g/cm³, while the host package show a mean density of 2.66 g/cm³. A difference of 1.31 g/cm³ is observed. This contrast justifies the application of gravimetric gradiometry data and that after correcting the terrain the high gradient anomalies observed may reflect the subsurface of the mineralized package. The differentiation of the lithotypes from the gravimetric data is not possible due to the phenomena of the superposition of sources, common to the potential methods. Similar data were obtained by Souza et al. (2016) for N4WS.

The values of densities were homogeneously assigned to the drill hole intervals in the delimited area, considering all available holes in the database and where density data were not collected. The initial density model was constructed from 3D interpolation using the minimum curvature algorithm.

For the inversion of the FTG geophysical data, the GGINV3D (Li, 2001) code, with a mesh size of 50m x 50m x 25m (X Y Z), and 5% error of the standard deviation of the FTG (143 Eo) was used. In this case, the error of 7Eo was used. The number of measurements used for inversion was 936, distributed along the lines of acquisition. The GGINV3D code allows the user to perform a selection of the best regularization parameter. This choice is made through the L curve (Oldenburg and Li, 2007). For making this curve several inversions with different regularization parameter values are tested and a misfit graphic is done.

Table 4. Summary of the mean and variation of the magnetic susceptibility, density and total count, potassium, uranium and thorium values of gamma spectroscopy for lithotypes.

Lithotype		Magnetic susceptibility (x10⁻³SI)	Density (g/cm³)	Gamma Total Count (cpm)	K (cpm)	U (cpm)	Th (cpm)
CM	Mean	3.30	3.27	120.66	1.12	7.86	12.46
	Variance	0.38 – 26.17	2.61 – 3.99	80.9 – 152.4	0 - 5,4	4.1 – 12.2	9.4 – 17.2
HF	Mean	5.19	4.14	114.61	1.50	7.76	11.7
	Variance	0.3 – 151.67	3.25 – 4.91	83.6 – 163.3	0 - 11	2 – 13.5	6.9 - 16
JP	Mean	3.42	3.4	146.65	6.57	8.34	12.13
	Variance	0.38 – 27.03	2.97 – 3.72	97.8 – 195.4	0 – 15.3	3.9 – 12.9	8 – 16.2
MS	Mean	0.48	2.29	133.48	3.02	8.4	12,15
	Variance	0.21 – 1.15	1.88 – 3.89	91 – 307,8	0 – 32.2	4.3 – 18.7	7.7 – 17.9
M	Mean	10.83	2.74	248.74	30.75	10.12	15.85
	Variance	0.51 – 65.37	2.41 – 2.88	170.9 – 371.2	6.5 – 64.1	4.3 – 15.8	10.6 – 23.5

Notes: CM = ore “canga”; HF = friable hematite; JP = jaspilite; MS = semi-weathered mafic; M = mafic rock (gabbro).

4. Results

4.1. Geology of N5S deposit

The N5S orebody differs from the other orebodies found in the N5, where the compact ore predominates, due to the strong presence of desilication and hematitization of the jaspilite bands (Figueiredo e Silva, 2009). The N5S body is located on the eastern flank of the syncline structure, which controls the distribution of the jaspilite layers, and presents a thickness of approximately 200m of iron formation with approximate NNE-SWS direction and NW plunges. The stratigraphy of this body is marked by a basal layer of gabbro (not previously described in the literature), intrusive and apparently concordant with the Carajás Formation consisting of jaspilite (56.6% Fe₂O₃ and 44.7% SiO₂), friable hematite (96.9% Fe₂O₃ and 1.2% SiO₂) and ore “canga” (88.8% Fe₂O₃ and 0.6% SiO₂).

Overlapping these sets are the rocks of the Igarapé Cigarra Formation, composed of semi-weathered mafic rocks and chemical “canga” (Fig. 3).

Following the nomenclature used by the company Vale S.A., the study of the samples’ drill holes allowed to define the following lithotypes for the N5S body in the studied section: Mafic Rock (M), Semi-Weathered Mafic Rock (MS), Jaspilite (JP), Friable Hematite (HF) and the Ore “Canga” (CM) (Fig. 4).

4.1.1. Mafic rock (M): The description of this rock includes basalts, gabbro and diabase, weakly affected by weathering, without the separation of the geological unit. However, in the drill holes’ studies of the N5S was observed gabbro (Fig. 4A). In all drill holes studied, the gabbro is positioned at the base of the jaspilite package and the contacts between these units are abrupt and irregular. The granulation of gabbro decreases near contact with the jaspilite, indicates the intrusive character of this body after the Carajás Formation deposition. The rock has a grayish green-gray color, rosy gray, holocrystalline, phaneritic, with crystals of fine to large size. The pink coloration can be attributed to assimilation of iron by the magmatic melt, that promoted iron impregnation near the contact with the jaspilite. The gabbro has a preserved igneous texture commonly intergranular (Fig. 5A) with subophytic domains (Fig. 5B), characterized by relics of extremely saussuritized plagioclase included in augite pseudomorphs partially or totally replaced by chlorite. Its primary constituents are plagioclase, pyroxene, K-feldspar and quartz and the accessories are apatite, spinel, magnetite and ilmenite. Epidote, chlorite, hornblende, albite, K-feldspar, stilpnomelane and white mica appear as secondary minerals. In the strongly brecciated zones, the fragments of the matrix are substituted for chlorite and stilpnomelane (Fig. 5C). The crystals of magnetite are subhedral and appear partially or totally martitization, with hematite having lamellae of ilmenite exsolution (Fig. 5D).

4.1.2. *Semi-weathered mafic rock (MS)*: this lithotype is the product of the weathering of the gabbro, presenting mostly remnants of the original protolith (Fig. 4B) and in some cases the total loss of the original structure (Fig 4C).

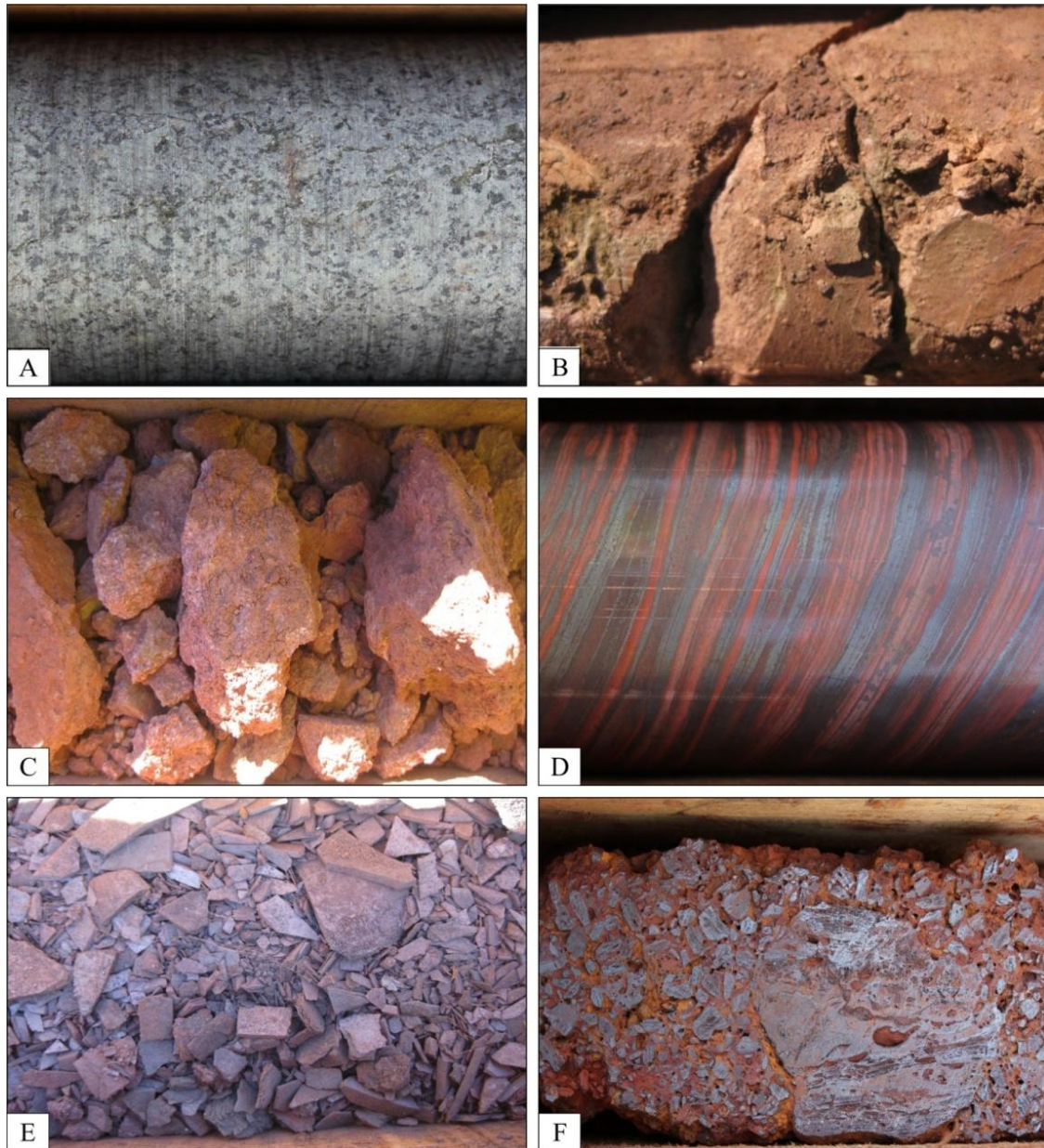


Fig. 4. Lithotypes identified in the N5S body, in the section studied. A. Mafic rock (gabbro). B. Semi-weathered mafic rock showing preserved original structures. C. Semi-weathered mafic rock showing a total loss of the original structure. D. Details of jaspilite with jasper and iron oxide banding. E. Details of iron ore, named Friable Hematite. F. Ore “canga”.

4.1.3. *Jaspilite (JP)*: the jaspilite is the main rock of the Carajás Formation and represents the protore, with contents between 20 and 40% of Fe. The rock presents millimeter to centimetric lamination, constituted by the alternation of bands of chert, jasper and iron oxide (hematite and magnetite) (Fig. 6A and D). The bands of jasper are reddish or reddish brown, the chert bands are whitish, and the oxide bands are metallic gray or have brown shade due to the weathering change for goethite. The contact between the bands is usually abrupt and rectilinear, but can also be gradual, irregular or wavy (Fig. 6A). The excavation features, generated during deposition, are used as

indicative of sequence polarity (Macambira, 2003). Structures and features such as inharmonic folds, caused by intra-stratum slips, discontinuous micro-failures, flame structures, intertype contacts and structures that resemble "boudinagem", caused by overload and differential compression, are associated with post depositional processes prior to lithification, according to Macambira (2003).

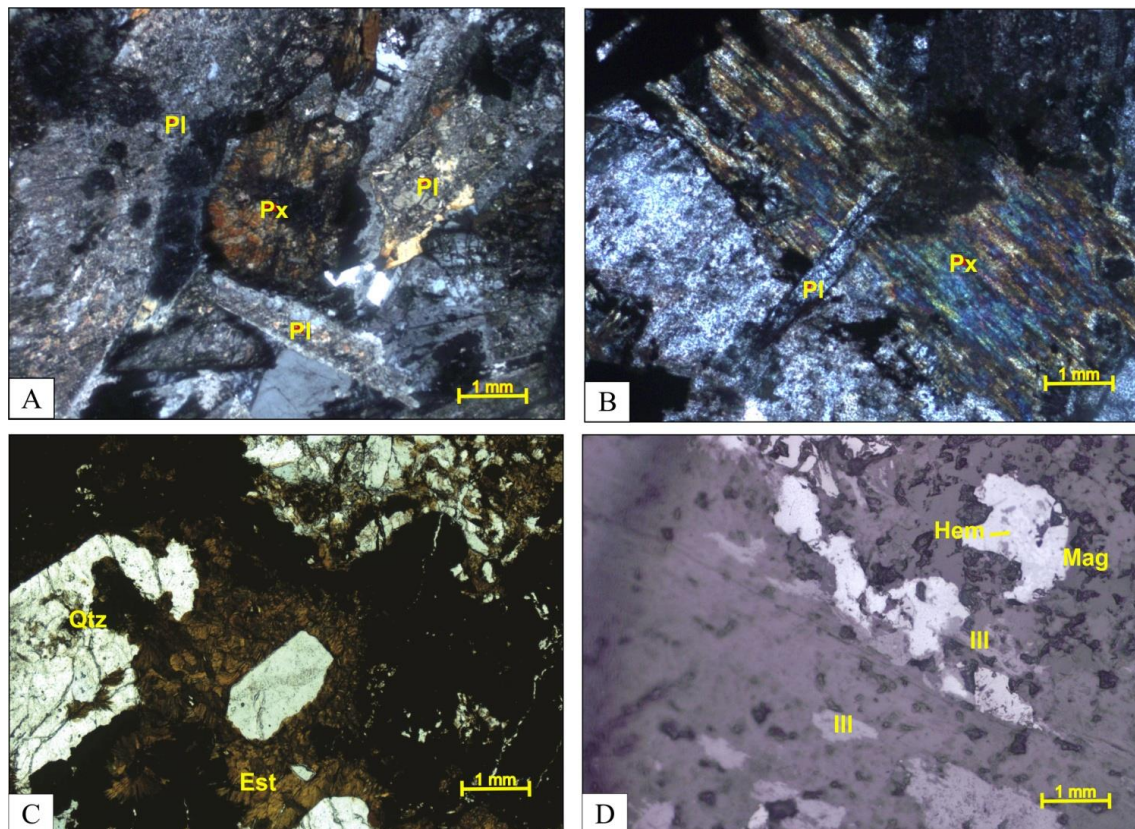


Fig. 5. Photomicrographs of the N5S gabbro. A. Intergranular preserved igneous texture, crossed nicols (Pl - plagioclase; Px - pyroxene). B. Subophytic domains, crossed nicols. C. Magnetite (Mag) is almost completely martitized, and hematite (Hem) may have thin lamellae of ilmenite (III) exsolution (reflected light), with the presence of quartz (Qtz) and stilpnomelane (Est).

Venule and millimeter to centimetric fractures filled mainly by quartz, magnetite and seldom sulfides, cracks filled by quartz and rock fragments and faults are possibly associated with hydrothermal and/or diagenesis processes. An important feature observed are the spherulites, which are circular structures constituted by a nucleus of opaque minerals, surrounded by colorless chert, surrounded by a layer of jasper. This feature was interpreted by Meirelles (1986), Macambira (1992) and Macambira (2003) as a possible microfossil.

In the jaspilite thin section, the quartz has very fine granulometry, ranging from crypto to microcrystalline. In the oxide layer, a predominance of primary hematite occurs, but magnetite crystals of euhedral to subhedral shapes are observed partially or totally replaced by hematite (Fig. 6B).

Isolated euhedral crystals were also observed. The crystal of martitized magnetite present nuclei transformed into goethite, with a colloform habit (Fig. 6C). The magnetite crystals decrease in proportion and size toward the top of each drill hole. Rarely are crystals of anhedral pyrite and chalcopyrite associated with fractured and brecciated zones. The breccias contain angular fragments of jaspilite surrounded by a matrix composed of quartz. In these fragments, it is noticed that the sedimentary layers are still preserved and in the contact with the matrix of the breccia, there is the formation of acicular hematite (Fig. 6D).

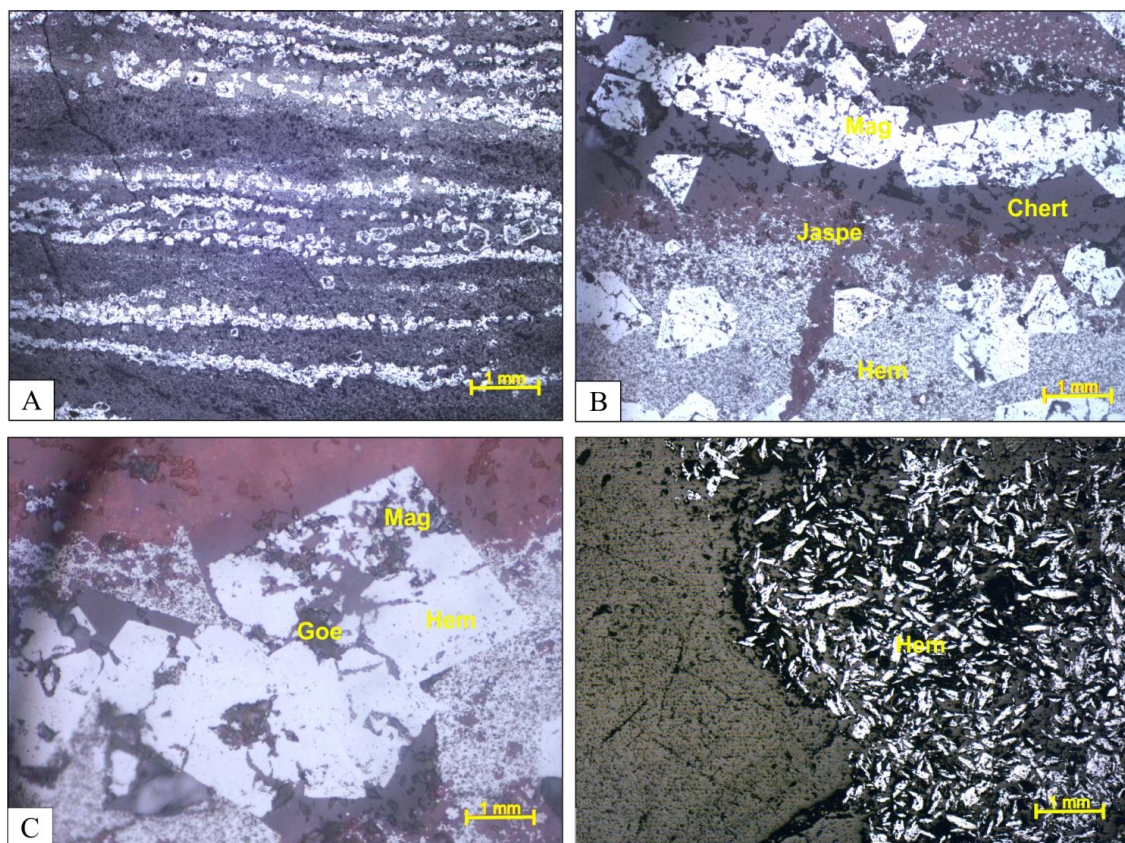


Fig. 6. Jaspilite photomicrographs of the N5S-F867 probes. A. Compositional primary bandage defined by the alternation of bands rich in hematite/magnetite and siliceous bands. B. Euhedral magnetite (Mag) crystals, totally or partially substituted by hematite (Hem), aligned parallel to the bundle. C. Euhedral crystals of martitized magnetite with goethite (Goe) nuclei with a colloform habit. D. Acicular, neo-formed, supergenic hematite-3, interpreted as having grown in void spaces. Photomicrographs in reflected light.

4.1.4. *Friable Hematite (HF)*: is the iron ore typical of the N5S body and due to the leaching of silica has a medium content of 66% Fe. It is highly friable and porous and its structures are partially or totally obliterated. The coloration varies between shades of gray, sometimes yellowish associated with aluminum contaminations (0.47% Al_2O_3) (Fig. 4E).

4.1.5. Ore “canga” (CM): or lateritic cover, forms on the outcrops of ore in situ through the weathering and the supergenic enrichment in iron oxide and therefore has high Fe content and relatively low contaminants. It is an indicator of iron ore, and may even be used as ore. Its thickness can reach more than 20m (Fig. 4F).

4.2. Geochemistry

The N5S-871 drill hole was selected to represent the geochemical variations, the physical properties of the rock and the reflectance spectroscopy since it contains the largest number of lithotypes found in the area. However, the result described will be the one observed in the holes in general.

The geochemical analysis was performed with the purpose of observing the composition of the different lithotypes and the compositional variations along the holes. Initially, the analysis was directed to the selection of chemical elements that represented the different lithotypes analyzed (Fig. 7). To facilitate this analysis, the mean chemical element content of the 419 samples is summarized in table 1, showing the mean of the major elements, the selected trace elements and the sum of the rare-earth elements (REE), as well as the loss of Fire (LOI) in total rock. In this analysis samples with values below the limit of detection were eliminated.

The main chemical differences detected among the lithotypes observed in the N5S body are attested by the larger elements, and the most contrasting compositional differences are delineated by the percentage of oxides Fe_2O_3 , SiO_2 , and Al_2O_3 , although the average values of Al_2O_3 between jaspilite (JP) and the ore (HF) are very close and low (<5%) (Fig. 7). P_2O_5 and TiO_2 present low average percentages (<2.6%), but it is possible to observe a clear mean variation between the lithotypes (Table 1). The other major, minor and trace elements are only good delimiters between mafic rocks and jaspilite and their alteration products. In this work, only the behavior of the traces Ti, Sc, and Cr will be presented, since they are the ones that most reflect the compositional variations in the studied samples. The behavior of P is also shown in figure 7 since it presents a marked variation and is considered a contaminant for the ore.

4.2.1. Mafic Rock (M): present major, minor and trace element contents, including REE's, higher than the contents found in the jaspilite, except for Fe_2O_3 . In general, gabbro stands out for the highest SiO_2 (52.64%), Al_2O_3 (16.00%), FeO (6.13%), CaO (2.05%), MgO (6.25 %), Na_2O (1.59%) and K_2O (4.63%). Within the gabbro package, no significant variations in the percentage of major and trace elements are observed. Some localized variations, such as increased P levels, are related to the increase in the amount of primary apatite (Table 1; Fig. 7).

4.2.2. *Semi-weathered mafic rock (MS)*: the SiO_2 contents are lower than the original rock, while Al_2O_3 and Fe_2O_3 are higher, an expected response due to the intemperic processes. In addition to these oxides, MnO and TiO_2 also present an enrichment in the semi-weathered mafic rock. The other major elements do not present a very different mean value of original rock. The average analysis of the trace elements showed that the semi-decomposed mafic rock is more enriched in the elements Cr, Cu, Sc, Pb and more depleted in Co, Ni, P, Zn than the mafic rock (Table 1). The sum of the REE's presents a lower average than the original rock, which would be unusual due to the more immobile nature of the rare-earth elements in the alteration processes (Table 1). When analyzing the variation along the holes separately (Appendix 4, 5 and 6, Fig. 7), it is possible to observe that the hole N5S-FH1099 does not follow the mean, showing an increase of the concentration of the REE's and Ti, and decrease of the Pb on the passage from semi-weathered mafic rock to fresh rock (Appendix 5).

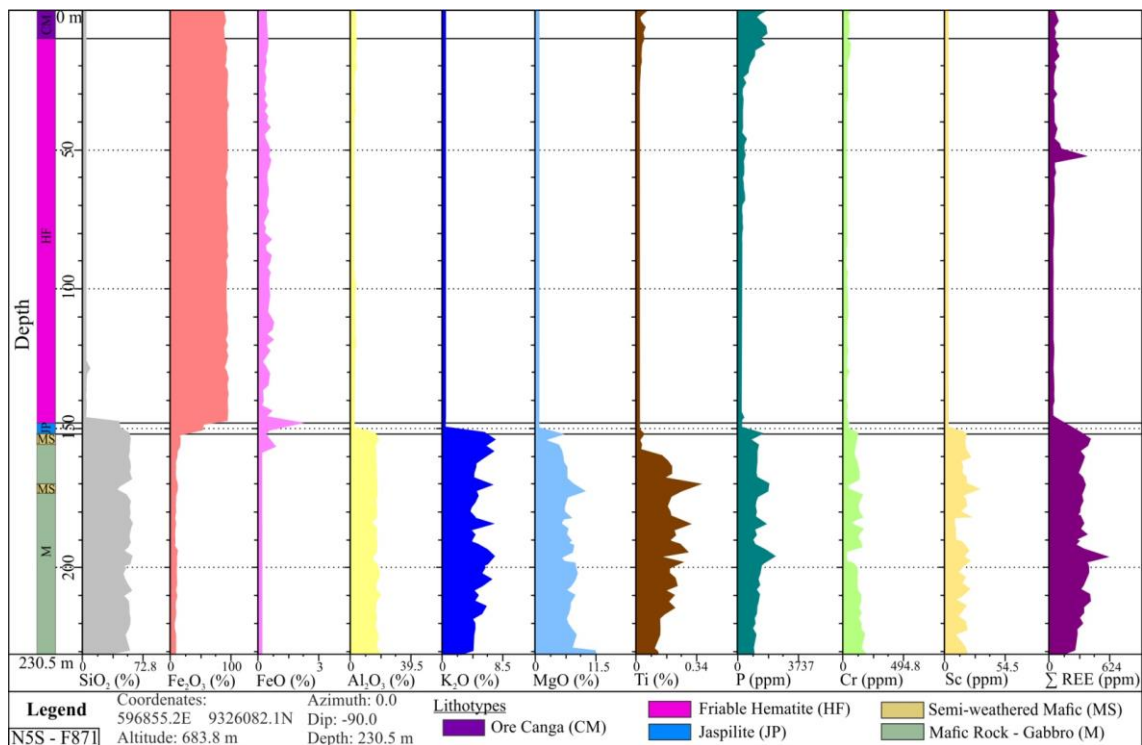


Fig. 7. Scatter plots showing the geochemical variation as a function of the hole depth N5S-F871. The analyzed elements were SiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , Al_2O_3 , K_2O , MgO , Ti , P , Cr , Sc and ΣREE (Rare Earth Elements).

4.2.3. *Jaspilite (JP)*: the most important major elements are Fe_2O_3 and SiO_2 and have an average content of 54% and 44,67%, respectively. It has relatively low average values of P (15.15ppm), especially when compared to the ore and the ore “canga”. The same occurs with the mean value of the elements Pb and Sc. The contents of the REEs do not present great variation, occurring punctually (N5S-F867/89). Analyzing trace elements in iron ore is still a difficult process due to interference with

the absorption and emission peaks of low concentration metals in a matrix extremely rich in iron (Basílio, 2005). For Macambira (2003) the main trace elements that would be qualitatively found in jaspilite would be Co, Pb, Cr, Ni, Cu, and Zn.

4.2.4. Friable hematite (HF): Fe₂O₃ contents reach up to 99%, demonstrating the process of silica leaching and enrichment of iron oxide, in relation to jaspilite (JP - protore). In the contact of the ore (HF) with the protore (JP) occur enrichment peaks in some elements such as MnO, Ba, Co, Pb and REE's. Within the ore layer, richer portions of MnO, Cs, Pb and Zn occur in addition to punctual anomalies of REEs. From the trace elements, the only one that presents a variation between the ore (HF) and the protore (JP) is the Pb and may be associated with regions of enrichment due to hydrothermal and/or supergenic alteration processes (Table 1).

4.2.5. Ore “canga” (CM): a decrease in the Fe₂O₃ content and an increase of the Al₂O₃ content in relation to the ore, expected variation due to the laterization process. For the trace elements and enrichment of P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Ti, Zr, and Hf can be observed, and these can be used to differentiate ore “canga” (CM) from friable hematite (HF). The variation of the ΣREE's during the holes does not present significant values, however, the average value presents an enrichment in relation to the ore (Table 1; Fig.7).

4.3. Reflectance spectroscopy

The spectral parameters obtained by the algorithms of Appendix 2 were used in the spatial analysis of the four drill holes. Five groups of minerals were identified: iron (hydro-)oxide (hematite and goethite), kaolinite, chlorite (composition richer in magnesium and iron rich), gibbsite and mixture of smectite-illite (Fig. 8). The spectral characteristics of the minerals of each lithotype are described below (Fig. 9).

4.3.1. Mafic rock (M): is characterized by the presence of chlorite and smectite-illite mixture, identified by parameters 2335Dcl and 2200Ds/i, respectively (Fig. 9). Within this layer, the presence of kaolinite (2200Dk) occurs and its crystallinity, obtained by parameter 2170SL, can be used to distinguish zones with low crystallinity kaolinites associated with fault zones and fractures. These zones were called brecciated mafic (MB), due to the presence of breccias in the samples analyzed. In the hole N5S-F871, at 170m, a brecciated zone was described, but by reflectance spectroscopy, no clay minerals were detected, which differs from the other brecciated regions in the other holes. According to Beaufort et al. (2005), in oxidizing conditions, the chlorite tends to be more magnesian (clinochlore) and the iron present is fixed in the hematite. However, this relationship was not observed in the survey

reports studied. The acicular hematite associated with the breccia zones was found along with the iron-rich chlorite.

4.2.2. *Semi-weathered mafic rock (MS)*: is characterized by the presence of iron (hydro-)oxides with the hematite-goethite (HG) composition, gibbsite and kaolinite, identified by parameters 900Dfe, 2260Dg e 2200Dk, respectively (Fig. 9). The presence of these clay minerals indicates more supergenic alteration in the mafic rocks as observed by Prado et al. (2016) for N4WS deposit.

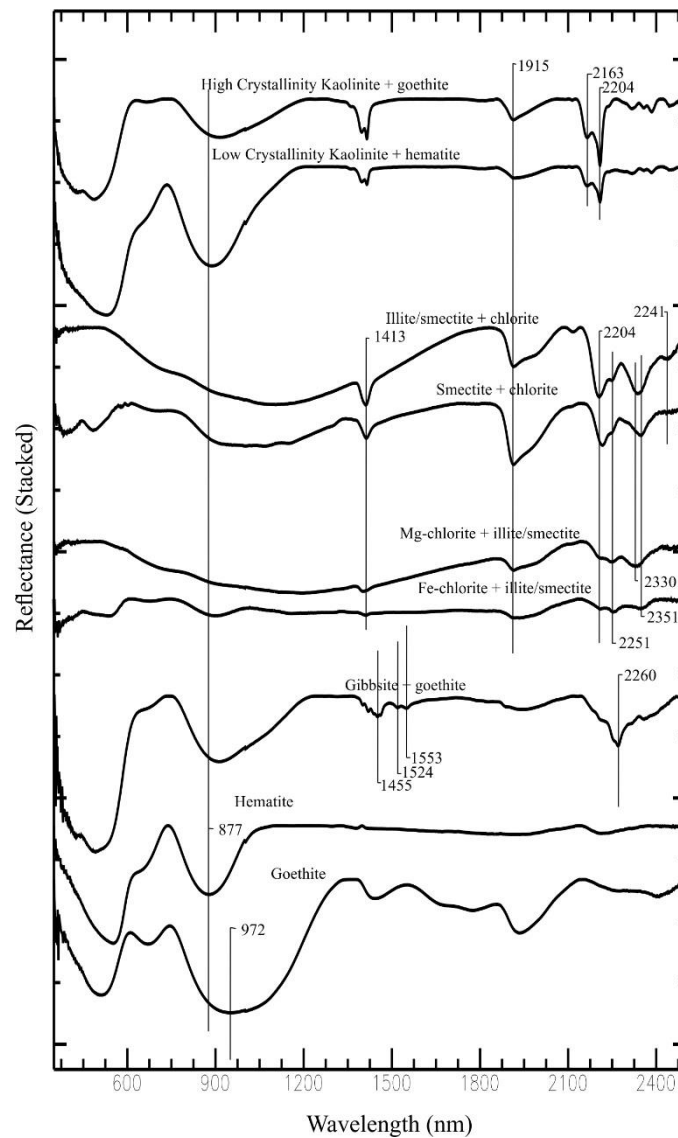


Fig. 8. Stacking of reflectance spectra removed from the continuum of the samples containing iron (hydro-)oxides and phyllosilicates from the N5S deposit, including hematite (N5S-F867/150), goethite (N5S-FH1103/2), kaolinite (N5S (N5S-FH1099/168), illite / smectite (N5S-FH1010/170), gibbsite (N5S-FH1099/14), Fe-chlorite (N5S-FH1099/192) And Mg-chlorite (N5S-F871/182).

4.3.3. *Jaspilite (JP)*: The distribution of the hematite-goethite obtained by the 900Wlv-Fe algorithm allowed the differentiation between the two domains: an hematitic (H) (876-890 nm) and the other

hematitic-goethitic (HG) (> 890 nm). The increase of 900Wlv-Fe may be related to fracture zones, in which percolation of meteoric fluids occurred. In addition, the increase in the position of the 900Wlv-Fe may be related to the change in grain size and shape, orientation, package density, matrix composition (Adams and Filice 1967; Sherman et al., 1982; Morris et al., 1985), and mixing with other minerals with an absorption feature near 900Wlv-Fe, such as magnetite (Prado et al., 2016). The breccia jaspilite zones are characterized by the presence of kaolinite (2200Dk). Eventually, these zones may also present an increase in the goethite composition (900Wlv-Fe) and the presence of smectite-illite (2200Ds/i).

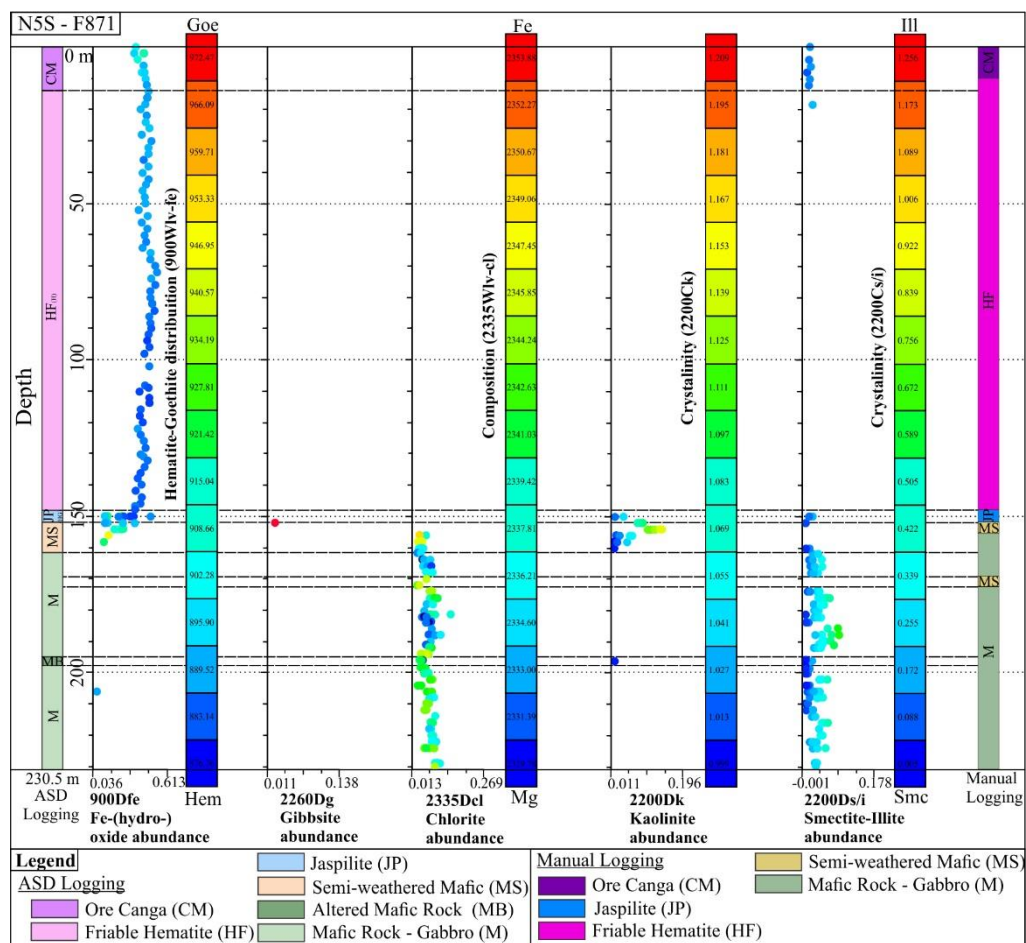


Fig. 9. Mineral abundance results and composition analysis using the reflectance spectroscopy data for the N5S-F871 titer and the lithotypes found during the description of the holes. The scatter plot shows the variation of mineral abundance as a function of depth. The color scale in the abundance iron (hydro)-oxides and chlorite diagrams show the wavelength in nm of the absorption feature of these minerals. The color scale of the abundance diagram of kaolinite and the smectite-illite mixture is colored according to the crystallinity of these minerals. The intervals that have similar mineralogical characteristics were grouped in the same colored horizon.

4.3.4. *Friable Hematite (HF)*: Presents the highest values of iron (hydro)-oxide abundance among the studied lithotypes and has a variation of the 900Dfe algorithm between 0.36 and 0.61 (Fig. 9). In the upper part of the ore package and in the contact with the mafic rocks there is a greater amount of

hematite-goethite, which allowed to differentiate the HF in two domains as well. Punctually the ore presented gibbsite (2260Dg) at the top of the package, next to a semi-decomposed mafic rock.

4.3.5. *Ore “Canga” (CM)*: presents a variation of the abundance of iron (hydro-)oxide (900Dfe) between 0.3 and 0.54 (Fig. 9). The values are like those found in jaspilite and ore, with the presence of gibbsite, smectite, and kaolinite, respectively, identified by the 2260Dg, 2200Ds/i and 2200Dk algorithms, respectively, to differentiate these lithotypes. The crystallinity of the white mica was calculated based on the difference in depth of the absorption characteristics of 2200nm, referring to the presence of AlOH, and the water feature at 1915nm. The increase in crystallinity is related to a deeper feature of the water and lower depth of the AlOH feature. By the index of crystallinity of the white micas, we have that: the muscovite varies from 4,08 to 9,37; the illite ranges from 2.0-4.08; the illite/smectite ranges from 1.0-2.0; the smectite/illite ranges from 0.59-1.0, and the smectite is <0.59. In the spectra obtained in this work, the crystallinity value of the white mica ranged from 0.006 to 1.255, demonstrating both the crystallinity of the micas and the proportion of micas and smectites in the mixture, with the presence of illite/smectite, smectite/illite, and smectite.

In addition, in the higher crystallinity of the white micas one observes the presence of a feature at 2441nm (Fig. 8). The variation of this crystallinity, obtained by parameter 2200Cs/i, can provide vectors towards the higher temperature parts of the hydrothermal system (GMEX, 2008). It is difficult to make an exact differentiation for the crystallinity due to the influence of other argilominerals (kaolinite and gibbsite) at the depth of the water absorption features at 1915 nm and the AlOH at 2200 nm. Although the samples with the other clay minerals have been removed, a mixture and influence on the spectrum can still occur. It is noteworthy that the presence of gibbsite in the ore “cangas” occurs only in the holes (hole N5S-F867), which shows higher levels of Al₂O₃ than in the others.

4.3.6. *Validation of results*: To validate the developed algorithms and to estimate the abundance and composition of the minerals obtained by reflectance spectroscopy, the geochemistry and LOI data were used (Fig. 10, 11, 12 and 13). A first order polynomial was used for the correlation, the error being calculated by root mean square error (RMSE). The spectral behavior of the different rocks analyzed was plotted according to the lithotypes studied. The color of each lithotype matches the pattern used in the geological description. The data were correlated following the analysis made by Prado et al. (2016). The good correlation with the geochemistry will be explained below, while those with low correlation parameters were attributed to non-identification of spectral mixtures and/or a lack of pure spectra (Fig. 8 and 10). This may also be due to the difference in data collection, where spectra were obtained on the surface of the serrated and friable samples, while the XRF was obtained by

spraying the other half of the samples. In addition, the samples used in the infrared analysis may not be completely representative of the sample used in the XRF, which will increase the RMSE.

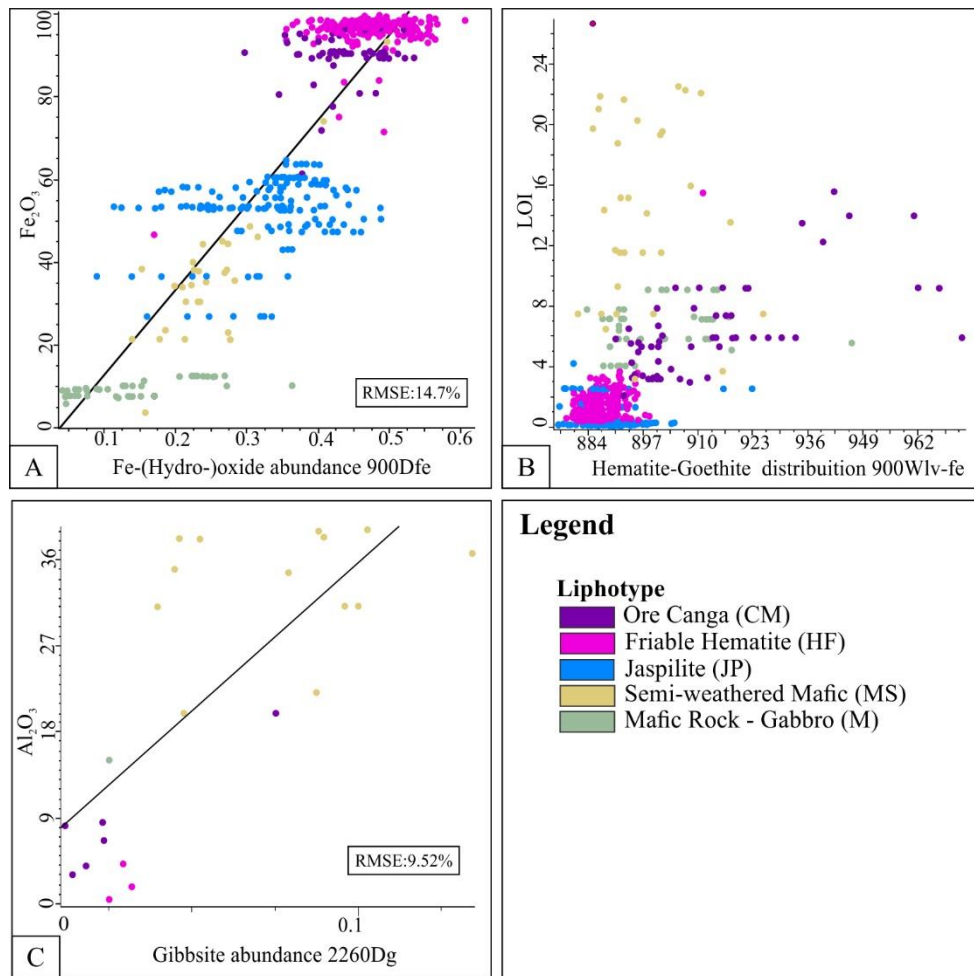


Fig. 10. Correlation graph between the mineral abundance algorithm under study and the geochemical analysis of XRF. The samples are colored according to the lithotype. A. Correlation between the abundance of iron (hydro-)oxide (900Dfe) and Fe₂O₃%. B. Correlation of goethitic-hematitic distribution (900Wlv-fe) and loss by calcination (LOI) at 1000°C. C. Correlation between abundance of gibbsite (2260Dg) and Al₂O₃%.

According to Haest et al. (2012) samples of iron (hydro-)oxide mixed with light minerals will have their absorption pattern overestimated due to albedo, and will not show a good correlation with geochemistry. As the processing to remove the mixed samples resulted in a few samples composed of pure hematite spectra, the analyses were performed considering all samples, which caused an increase in RMSE values. In addition, the graph of figure 11, showing the data of the holes of the N5S, shows that it would not be necessary to withdraw samples containing kaolinite, since it already presents the pattern of increase of the Fe₂O₃% corrected proportional to the increase of the algorithm 900Dfe, for an albedo variation (N1650R).

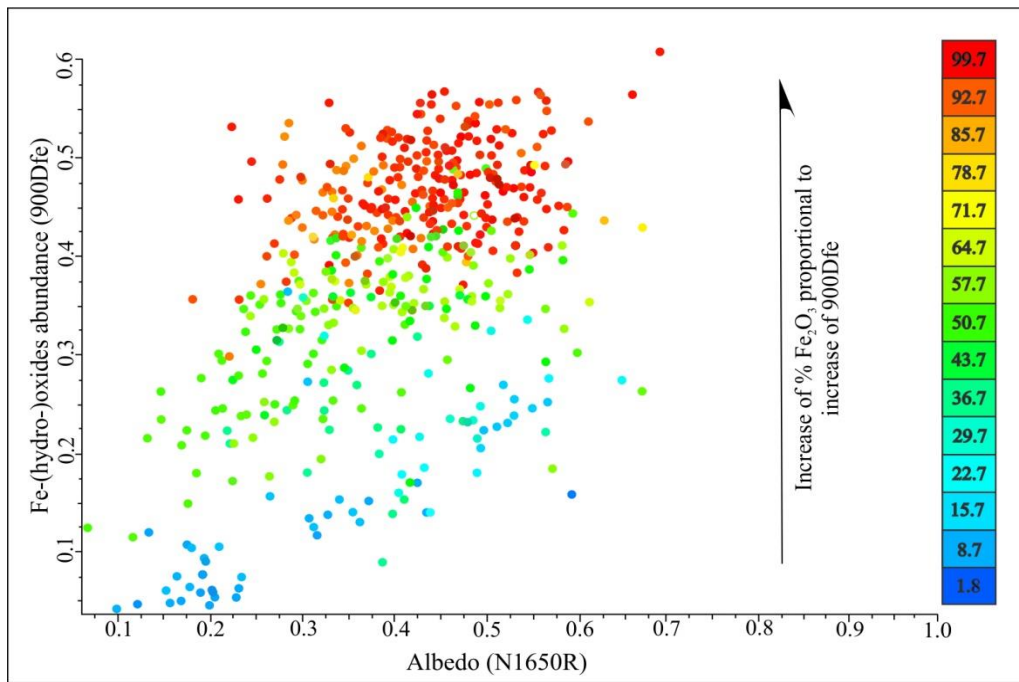


Fig. 11. Correlation between the albedo (N1650R) and the iron (hydro-)oxide (900Dfe) abundance algorithm for iron (hydro-)oxide spectra, including spectra of mixtures with kaolinite. The samples are colored according to Fe₂O₃% of the XRF analyses.

The abundance iron (hydro-)oxides (900Dfe) algorithm was compared with the Fe₂O₃% geochemical analysis of the holes (Fig. 10A) showing an RMSE of 14.7%. It is possible to observe a linear correlation between the iron increase in the sample with the spectral abundance, presenting a differentiation between the lithotypes. The mafic has lower spectral abundances (0 - 0.375) and Fe₂O₃ (4 - 50%), while the jaspilite shows intermediate values of spectral abundance (0.1 - 0.5) and Fe₂O₃ (26 - 65%) and showed high values of spectral abundance (0.35 - 0.6) and Fe₂O₃ (70 - 99%).

The determination of the accuracy of the iron (hydro-)oxide composition algorithm was validated using the calcination loss (LOI) of the samples (Fig. 10B). It is possible to observe the influence of other minerals in the LOI, mainly in the mafic lithotypes. The ore “canga” demonstrates that the presence of goethite increase as LOI increase.

The accuracy of the 2200Dk, 2200Ds/i and 2260Dg algorithms was related to the percentage of Al₂O₃ to measuring the abundance of the aluminous clay minerals: kaolinite, gibbsite and smectite-illite mixture, respectively. It is difficult to observe a linear correlation of these parameters when considering the clay minerals in the same lithotype, but a difference of abundance and Al₂O₃% between the jaspilite/ore/“canga” and the fresh/semi-weathered mafic rock is observed, as expected. Another reason for the lack of fitting of mineral clay may be associated with the number of representative

samples of each mineral being small, as in the case of gibbsite, which presents an RMSE of 9.52% (Fig. 10C).

The chlorite abundance algorithm (2335Dcl) was compared with the percentage of Fe₂O₃ and MgO obtained by the XRF analysis. These analogies did not present a linear correlation, which led to make a relationship between the chlorite composition (2335Wlv-cl) obtained by reflectance spectroscopy (Fig. 12) and the chlorite classification by the microprobe (Fig. 13). The chlorite composition, identified by the 2335Wlv-Cl algorithm, can be used to distinguish the predominant ranges of ferrous and magnesite chlorites (<2335 nm) (Fig. 12). The chemical analyses of chlorite (17 samples) indicated composition predominantly of ripidolite (prochlorite), but containing two samples in the field of corundophylita, one sample classified as pycnochlorite and two as diabandite (Fig. 13). In the N5S gabbro the range of the Fe/(Fe + Mg) ratio is small (0.33-0.46), but has a wide variation in Si content (4.95 - 7.17). In this relation, it is possible to observe in figure 12 that the composition of chlorite by reflectance spectroscopy shows most chlorite samples as Mg-Fe, which can also be observed in figure 13, that the analyzed samples of microbands have a Mg-Fe composition, with a predominance of magnesium.

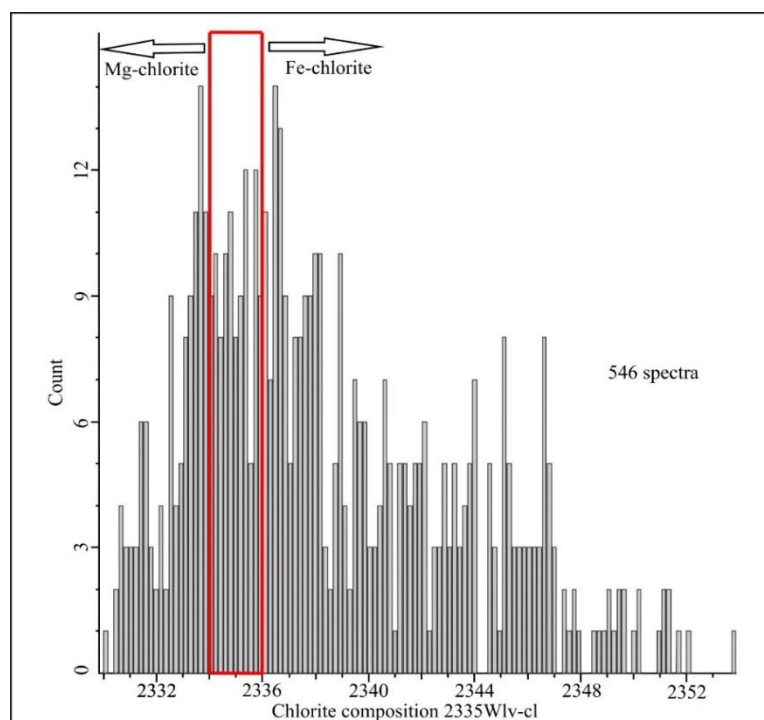


Fig. 12. Histogram of the chlorite composition obtained by the algorithm 2335Wlv-cl. Values above 2335 nm show a more chlorite-ferric composition, while the values below show more magnesian composition.

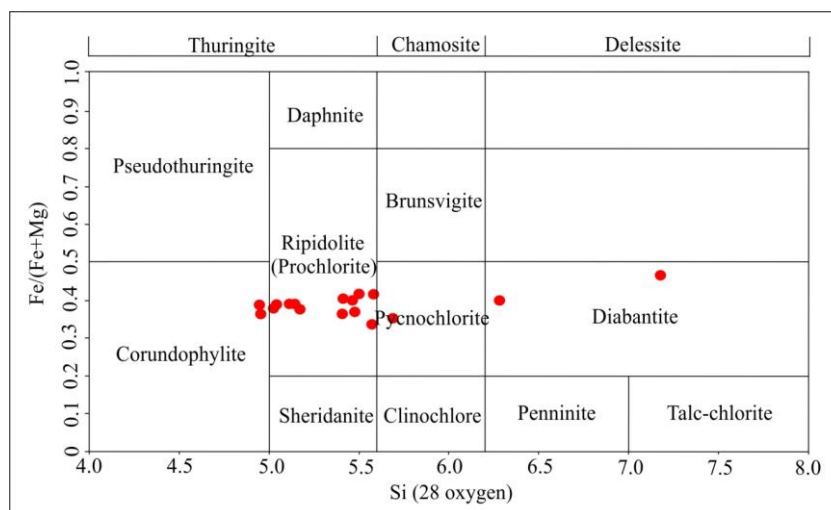


Fig. 13. Classification of the chlorites of the gabions of the N5S body in relation to the content of Fe and Mg obtained by the microprobe analysis and the silica for 28 oxygens (Hey, 1954).

4.4. Physical properties of rocks

The analysis of the histograms showed the existence of contrasting properties for each lithotype studied (Fig. 14). The magnetic susceptibility values did not present a great variation when compared to the ore “canga” (CM), friable hematite (HF) and jaspilite (JP) lithotypes, having a differentiation only in the values of the mafic rocks (M and MS). In general, the data obtained showed values with a marked variation in the analyzed range, that is, samples with values of $0.38 \times 10^{-3} \text{SI}$ up to the maximum of $151.67 \times 10^{-3} \text{SI}$, with an average of $6.20 \times 10^{-3} \text{SI}$. Gabbro (M) has the highest mean magnetic susceptibility of lithotypes with a mean of $10.83 \times 10^{-3} \text{SI}$, while semi-weathered mafic rocks (MS) have the lowest mean values of $0.48 \times 10^{-3} \text{SI}$. In previous works carried out on Carajás iron mineralization, the observed magnetic anomalies are directly associated with fresh jaspilite, with the mean values of magnetic susceptibility being $234.37 \times 10^{-3} \text{SI}$ (Assis, 2013; Ferreira, 2014). In this work, the jaspilite (protore, JP) presents an average susceptibility below the already mapped in N4WS, with a value of $3.42 \times 10^{-3} \text{SI}$. This result can be attributed due to the jaspilite interval is within a zone of change. The friable hematite (HF) has a magnetic susceptibility value with an average of $5.19 \times 10^{-3} \text{SI}$. The ore “canga” (CM) derived from the jaspilite has values with averages of $3.30 \times 10^{-3} \text{SI}$.

Differentiation through the mean values of the magnetic susceptibility was not efficient, due to the proximity of the values, and it is necessary to analyze the numerical variation of the lithotypes, since it still considers the local geological characteristics, such as the level of intemperic processes in tropical climate and local characteristics (Fig. 14, Table 4). Gabbro (M) and semi-weathered mafic rock have the following values: $0.51 - 65.37 \times 10^{-3} \text{SI}$ and $0.21 - 1.15 \times 10^{-3} \text{SI}$, respectively.

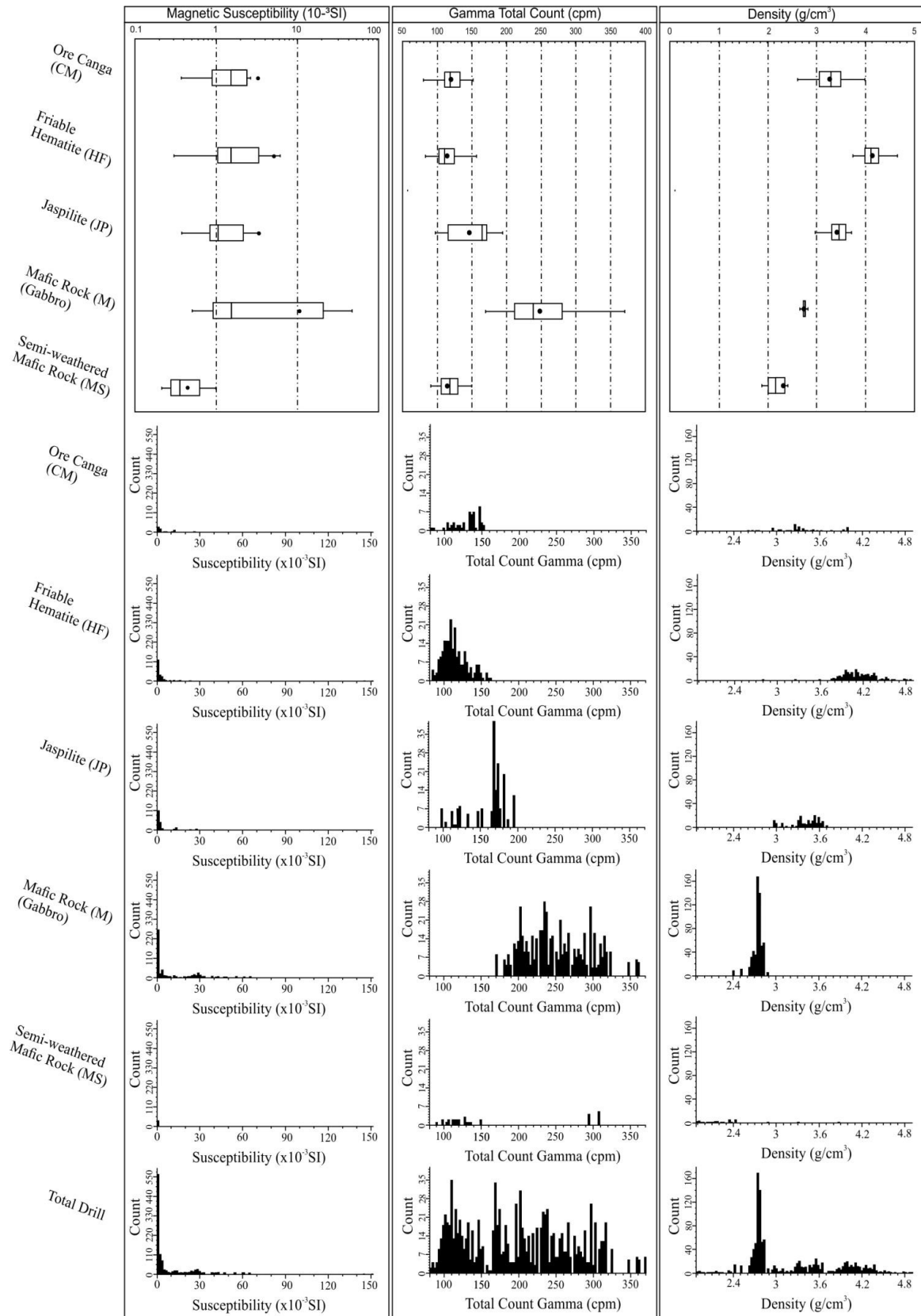


Fig. 14. Box plot showing the values of magnetic susceptibility, total gamma spectrometry and density count of each lithotype and their respective histograms. In addition to, present a total histogram for each method of the physical property of rock.

Although the secondary hematite exsolution is observed in ilmenite in petrography, the anomalous magnetic susceptibility values for the mafic rocks are correlated with the proportion of unaltered magnetite, since that the percentage of ilmenite would not be enough to generate a response (Fig. 5.D). For the studied jaspilite, which are altered, with the martitized magnetite, this variation has values between $0.38-27.03 \times 10^{-3}\text{SI}$. The variation of the iron ore (HF) susceptibility values is large ($0.3-151.67 \times 10^{-3}\text{SI}$), but most the samples have low values ($0.3-10 \times 10^{-3}\text{SI}$), with high values ($> 100 \times 10^{-3}\text{SI}$) found only in the N5S-F871 hole in the ore boundary with the jaspilite. The ore “canga” has a variation of $0.38-26.17 \times 10^{-3}\text{SI}$ and is mostly poor in magnetite, consisting essentially of hematite and goethite. Due to the low number of samples with high values the mean is low (Table 4).

In addition to figure 14, the data obtained using the gamma spectrometer range for the studied lithotypes are shown in table 4, with the mean and range described. The values of the three channels of the radioelements, potassium, uranium and thorium, are arranged in cpm (counts per minute).

The values observed from the potassium channel data from the gamma spectroscopy measurement map the lithologies of the Carajás Formation and the gabbro that is intrusive in this sequence. The average potassium values of the gabbro are 30,75cpm and the iron ore of the Carajás Formation is 1.50cpm. The variation of the potassium values in the jaspilite can be divided into two populations: the first one with the lowest values (0-2.5 cpm) is fractured and in contact with ore, occurring some intercalations of the ore between the jaspilite; and the second one with higher values (2.5-15.3 cpm) are deeper and is composed of jaspilite brecciated with intervals of fractured jaspilite.

The ternary diagram with normalized potassium, uranium and thorium radioelements values were used to compare the data sampled within the N5S body (Fig. 15). For the normalization of the diagram we chose to divide each channel by the sum of all three, that is: $K/(K+eTh+eU)$; $eTh/(K+ eTh+eU)$; $eU/(K+eTh+eU)$. In general, it is possible to map a gamma signature for friable hematite and gabbro, despite the low values of radioelements. Due to the low values, the potassium variation for gabbro samples was associated with a compositional differentiation.

The density of gabbro (M) varies between 2.41g/cm^3 and 2.88g/cm^3 , with an average of 2.74g/cm^3 , presenting values consistent with those found by gamma-gamma. The semi-weathered mafic (MS) presents a large variation of values between 1.88g/cm^3 and 3.89g/cm^3 , with an average of 2.29g/cm^3 . This variation occurs since in this work there was no individualization of the weathered mafic rocks that presented the original structuring of those that were totally altered. The jaspilite (JP) presents a variation between 2.97g/cm^3 and 3.72g/cm^3 , with a mean of 3.4g/cm^3 , being this variation due to breccias regions, or the proportion of oxides bands. The N5S friable hematite (HF) has a mean value that is much higher than the general average of the correction and gamma-gamma, being 4.14g/cm^3

and a variation between 3.25g/cm^3 and 4.91g/cm^3 . This higher mean can be due to the error during the correction, which considers the humidity of the samples equivalent to half the saturation of the pores, that is if the lithotype shows a lower saturation in situ. The corrected samples of the pentapycnometer present an average higher than those found in the other methods (Table 2). The ore “canga” (CM) presents values consistent with the other validation data, the average being 3.27 g/cm^3 and the variation between 2.61g/cm^3 and 3.99g/cm^3 .

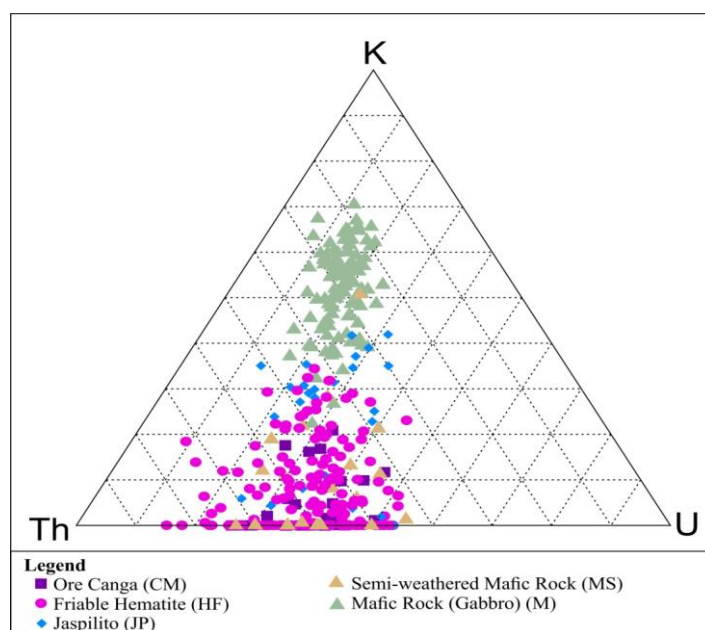


Figure 15. Ternary diagram with the normalization of K, eU, eTh obtained in N5S body reports.

The relationship of the physical properties data of the rocks shows that the density allows mapping the lithotypes found (Fig. 16). Figure 16A shows that the ratio of the total count to the density is not direct, that is, as the density increases there is no variation of the total count. In figure 16B, although a small positive trend is observed in the base values of each lithotype, the magnetic susceptibility scale is logarithmic, which shows very low values to be considered. The correlation of the values of total count and magnetic susceptibility (Fig. 16C), do not have a direct relation, being possible only to differentiate the mafic rocks of the other lithotypes, due to the total count, and to differentiate the weathered mafic rocks, since these have low values of total count and magnetic susceptibility. It is not possible to distinguish between jaspilite, friable hematite, and ore “canga” by analyzing these properties.

The responses of the rock physical properties were presented for the N5S-F871 hole (Fig. 17), following the methodology presented previously. It is possible to observe a correlation with all the analyses made previously for each property studied.

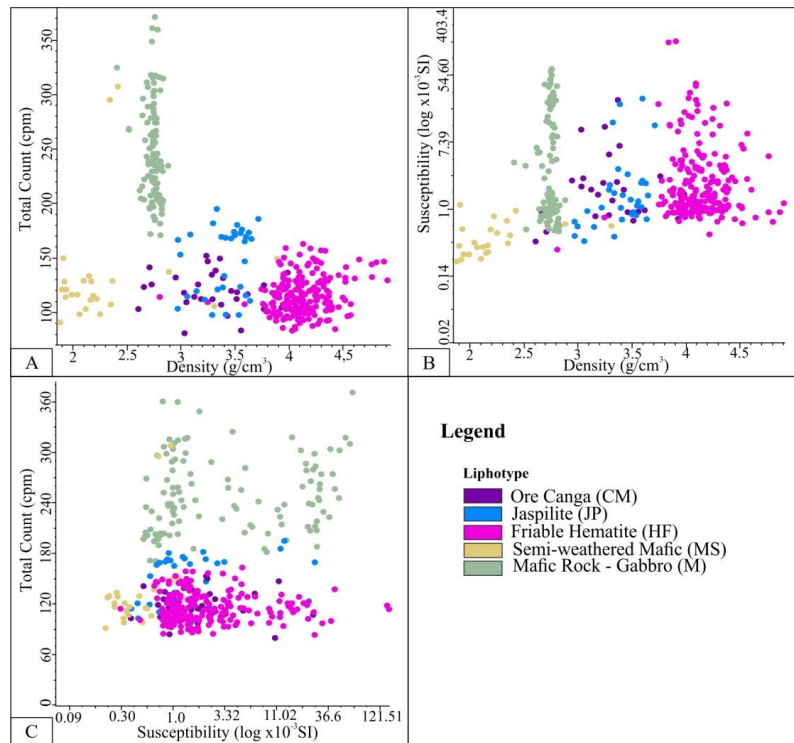


Fig. 16. Correlation diagram between the physical properties of rock, showing the behavior for each lithotype. A. Correlation between density and total gamma spectrometry. B. Correlation between density and magnetic susceptibility on log base. C. Correlation between magnetic susceptibility on log base and total gamma spectrometry.

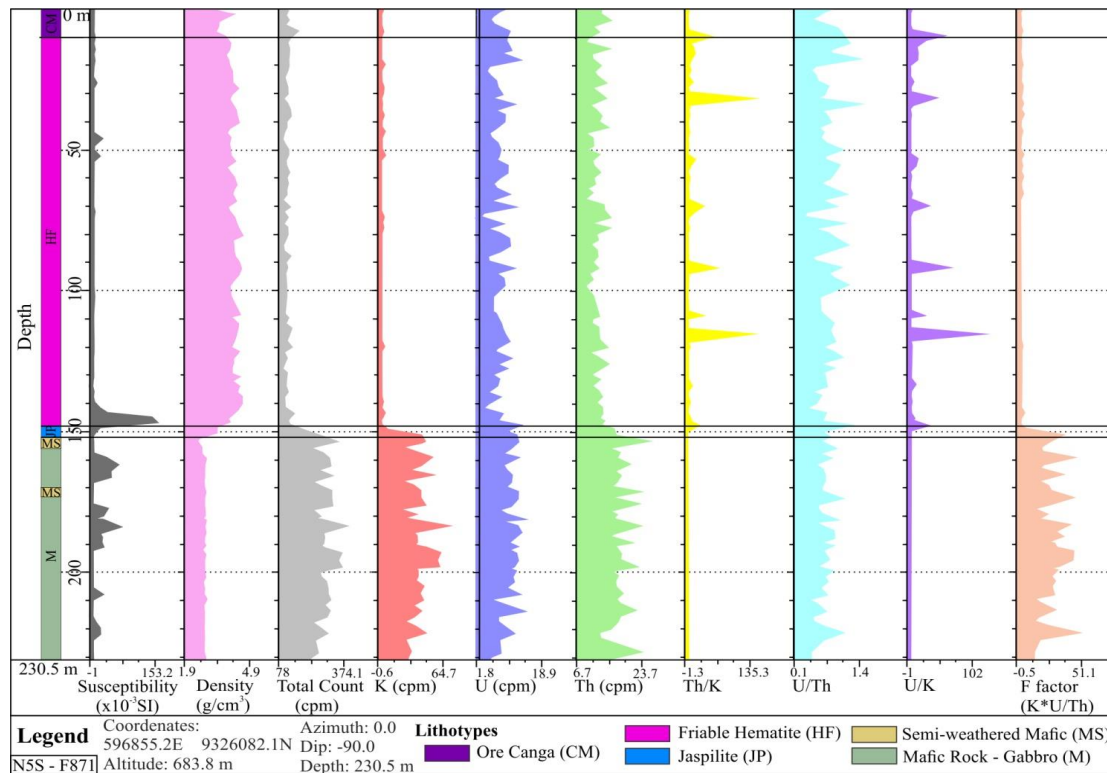


Fig. 17. Scatter plots showing the variation of the physical properties of rock as a function of the depth of the N5S-F871, representing the behavior for each lithotype. Following from left to right is the response of magnetic

susceptibility, density, gamma spectrometry with the total count, potassium, uranium and thorium and their relationships.

4.5. Aerogeophysics

4.5.1. *Magnetometry*: The windowed data of the analytical signal from the anomalous magnetic field (Fig. 18A) present magnetic features and interesting structures from a prospective point of view. Note that mineralized bodies do not have magnetism and therefore cannot be detected directly by magnetometry (Fig. 18B; Table 4). The main reason is the nature of the ore, which is rich in hematite and martite (magnetite change), but poor in magnetite (Fig. 7B). Due to this loss of magnetism, oxidation, and enrichment of iron ore, there are two possibilities for the source of magnetic anomalies: the deep-jaspilite (Ferreira, 2014), or gabbro, as the result of physical properties of magnetic susceptibility demonstrated higher mean values for this lithotype.

The MED of the total anomalous field presents NE-SW features with a small dip, especially for SE, also are EW features with a dip to N and NW-SE features not so well delimited, being better observed in the gravimetric MED (Fig. 18C).

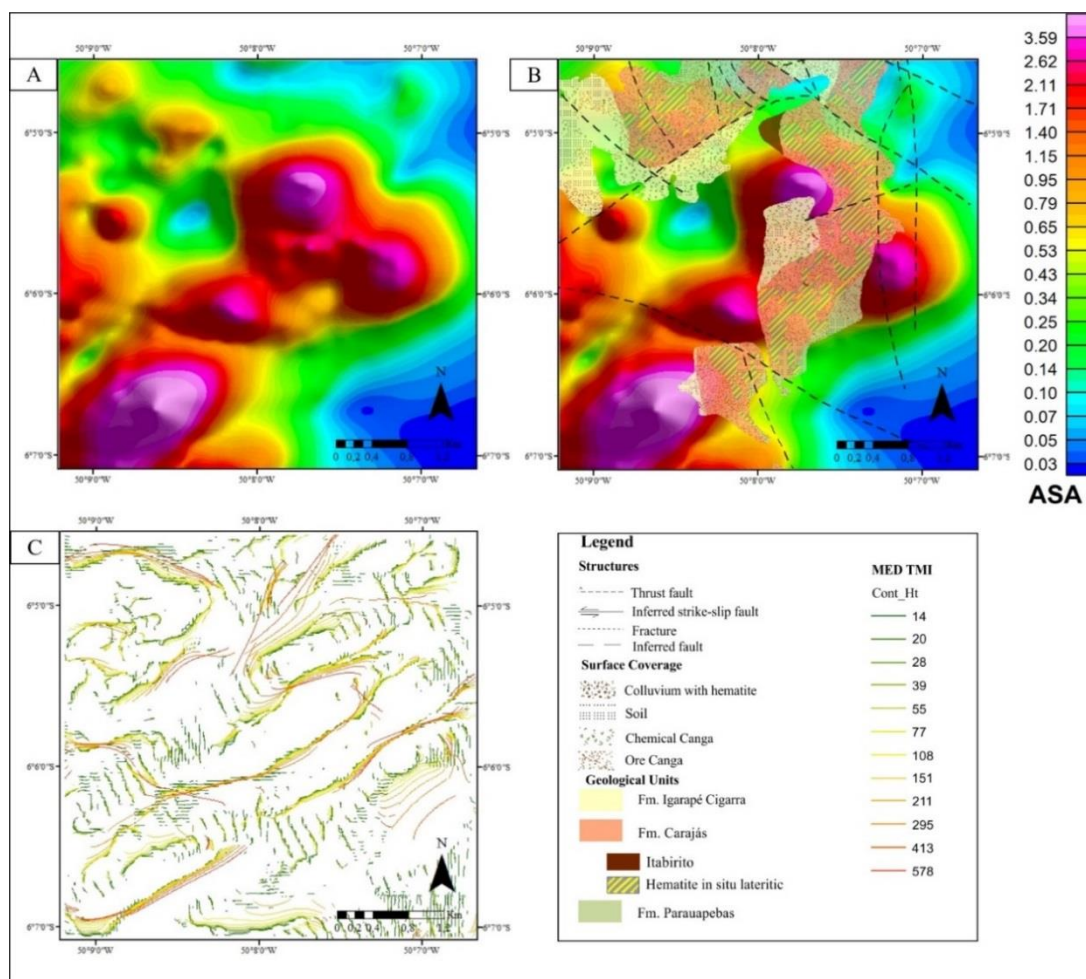


Fig. 18. Products derived from the anomalous magnetic field. A. Analytical Signal Amplitude (ASA) grid. B. Geological map of the N5S body on the ASA grid. C. Magnetic features generated by the application of the Multiscale Edge Detection (MED) algorithm.

4.5.2. *Gamma spectrometry*: For the gamma spectrometric data was used the RGB ternary composition image to define the response of each geological unit of the study area (Fig. 19A, B). Normally, in iron ore prospecting, gamma spectrometric data are more commonly used to map geological units associated with iron formations than to determine their occurrence (Flis, 2008).

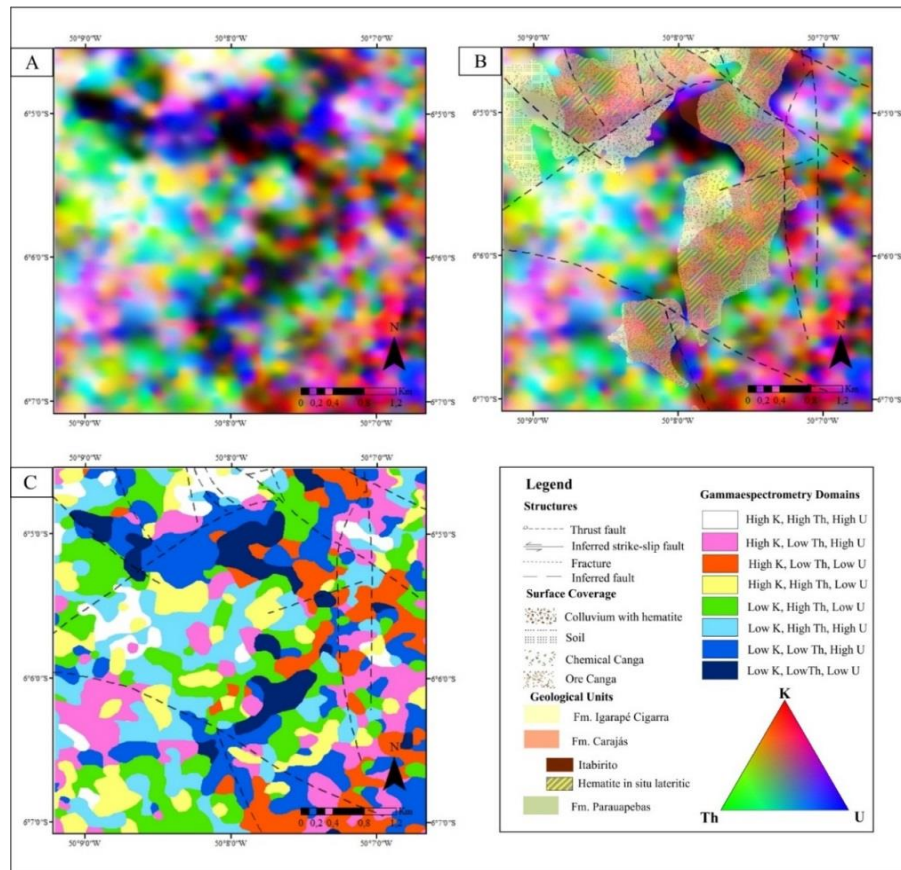


Fig. 19. Gamma spectroscopy product. A. RGB ternary composition (KeUeTh). B. Geological map of the N5S body on the RGB ternary composition grid. C. Lithogeophysical map of the N5S body using unsupervised classification.

A lithogeophysical map was elaborated through an unsupervised classification to facilitate the analysis (Fig. 19C). The classification was performed for eight classes. The ore “canga” associated with the Carajás Formation was individualized by subscribing low contents of the K, eTh, and eU (dark blue and blue) radioelements, showing a correlation with previously mapped outcrops and presenting regions of potassium enrichment (red) (Fig. 19B). The signature of the mafic rocks is enriched in K, eTh and eU, being able to present regions with a decrease of K and/or eU, but it maintains an enrichment of eTh due to its low mobility during pedogenesis (light blue, green, yellow and white). In the NE region of the gamma-spectrometric map (Fig. 19B), there is a high K and eU (magenta) response. As the geological map of greater detail (1: 20,000) does not cover this region, it

is difficult to infer the source of this response and may be associated with a compositional differentiation of the Parauapebas Formation, or a region of greater potassium alteration. In a more regional geological map of the CPRM, a proximity to the Gorotire Formation was observed, in which Ferreira (2014) describes the gamma-spectrometric response with high levels of K and may also be a possibility for the response found.

4.5.3. Gravimetric Gradiometric: The positive anomalies of the Tzz component of the aerogravimetric gradiometric data highlight the anomalous bodies of iron ore and protore (Fig. 20 A and B), associated to the plateaus, due to the density contrast between the main lithotypes in the area (Table 4), while negative anomalies can be associated with mafic rocks.

The lineaments generated from the application of the Multiscale Edge Detection (MED) algorithm using the Tzz component highlight the main linear features and geological contacts. Highlighting the synform structure marked by the distribution of the Carajás Formation. Some structural lineaments obtained are discordant with the geological contacts and may indicate the percolation of denser fluids in the structures (Fig. 20C). Some lineaments are consistent with structures mapped, and others with the lineaments marked by the MED in the total anomalous magnetic field.

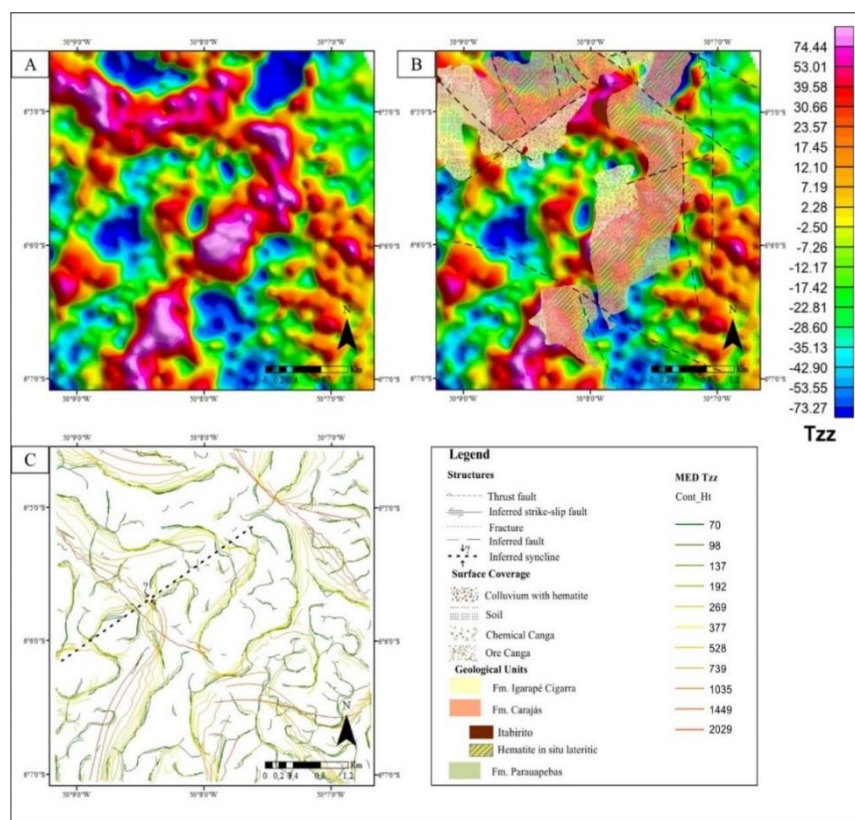


Fig. 20. Products of gradiometric gravimetry. A. Grids of the Tzz component of gradiometric gravimetry. B. Geological map of the body N5S on the grid Tzz. C. General features of the gradiometric gravimetry obtained using the Multiscale Edge Detection (MED) algorithm.

The analysis of the geophysical inversion model was performed using the ENE-WWS vertical section, in accordance with the geological profile (Fig. 21). It is possible to note that most of the denser zones remained in the surface portion of the model and the highest density contrast was approximately 1.17 g/cm^3 . This value in absolute terms is equivalent to a density of 3.87 g/cm^3 , representing the region where the friable hematite and jaspilite occur, which are the densest lithotypes intercepted by the drill holes (Table 4). The model in this region could recover low values of density where mafic rocks occur (M). In the western portion of profile, it is possible to reconcile the geological profile with the geophysical profile, showing the semi-weathered mafic and the chemical “canga” above the orebody. In the central-west region of the profile, the contact of the gabbro with the jaspilite and/or the ore is observed. In the center-east region of the geophysical profile, there is a zone of lower density that does not correspond to the geological profile. This may occur due to attenuation of the gravimetric signal caused by flight altitude and/or a decrease in bulk density due to a larger thickness of the weathered mafic package. With the above results, it is possible to say that the geophysical density model is consistent with the geological model and can be used as an exploratory parameter.

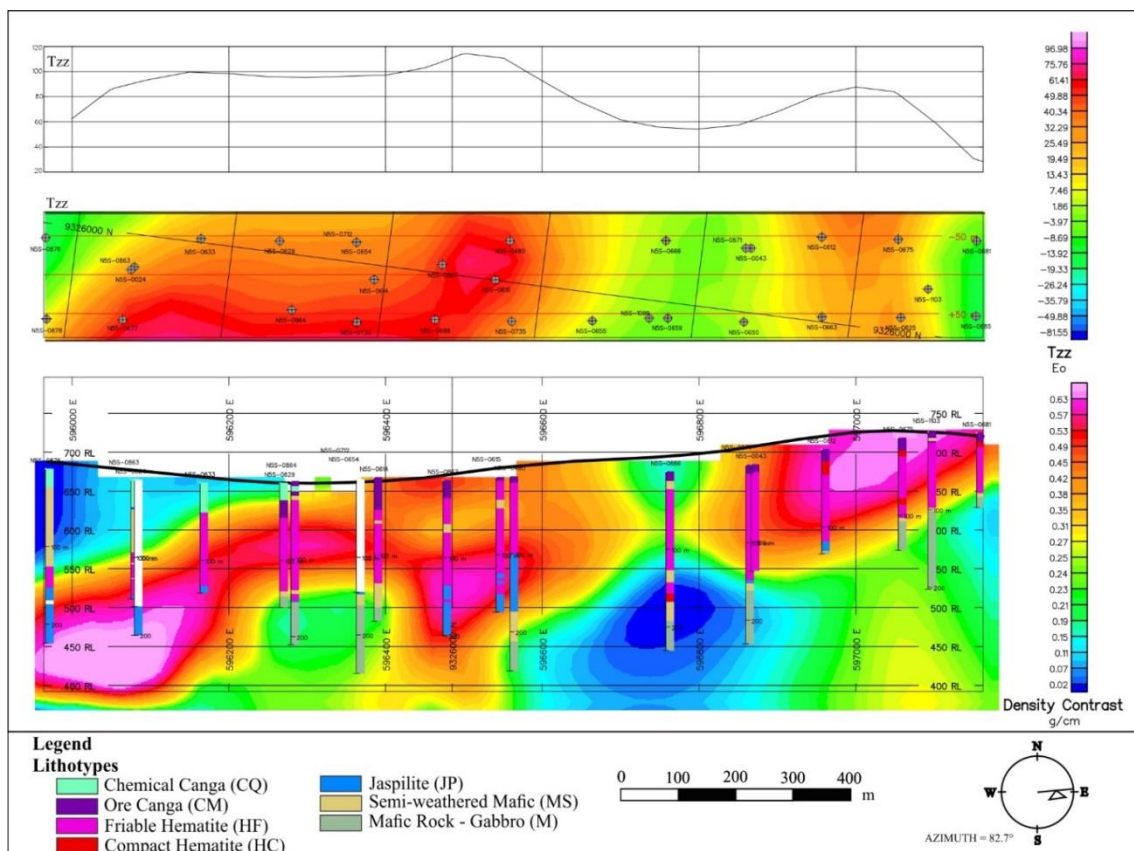


Fig. 21. Section AA' (N82.7°E) showing the holes done and density distribution obtained after the inversion of the FTG data (lower panel). In the upper panel the Tzz component profile is displayed, in the middle panel can be observed grid of the Tzz component.

5. Data Integration and Discussion

The integration was done by two ways: the first one was to analyze the relationship between the different methods used to compose the signature of the lithotypes of the N5S body and the second with the objective of evaluating the compositional change of the minerals detected by the reflectance spectroscopy in the analyzed profiles.

In figure 22 it is possible to observe the relationship between the density, the iron (hydro-)oxide (900Dfe) algorithm and the $\text{Fe}_2\text{O}_3\%$ of the XRF. The density is directly related to the percentage of iron in the less altered samples (gabbro, jaspilite and friable hematite), as well as the abundance of iron detected by reflectance spectroscopy. Despite the increase in iron detected in the most altered rocks (ore “canga” and semi-weathered mafic), both geochemistry and reflectance spectroscopy, the presence of more clay minerals affects the density significantly.

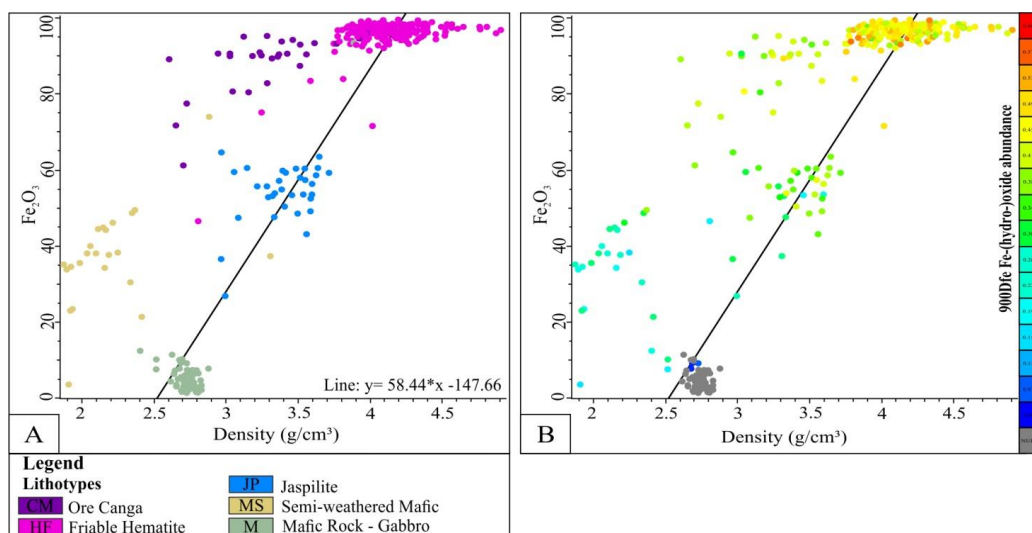


Fig. 22. Correlation between the density (g/cm^3) and $\text{Fe}_2\text{O}_3\%$ of the XRF analysis. A. Samples are colored according to the lithotype. B. Samples are colored according to the iron (hydro-)oxides (900Dfe) abundance algorithm for each spectrum with iron (hydro-)oxides.

The variation of the studied results was performed along the holes in an integrated way and allowed to correlate the characteristics of each lithotype and alteration zones (Fig. 23, Appendix 7, 8 and 9). The change portions of the drill holes were designated by the suffix B (MB and JPB). The nomenclature followed that used in the reflectance spectroscopy response. For the delimitation of the characteristics of these zones, it was necessary to integrate all the data, since it is not clear the presence of all the characteristics. In general, the delimitation of the alteration zones associated mainly with kaolinite (2200Dk) of low crystallinity, an increase in relation to the average percentage of SiO_2 , ETR's,

Hf, Zr, Nb and a decrease in density showed the correlation with fault/fracture zones with the percolation of meteoric fluids, presenting the intertempic processes at greater depths. The signature of the methods for each lithotype was summarized in table 5 for a better visualization and comparison.

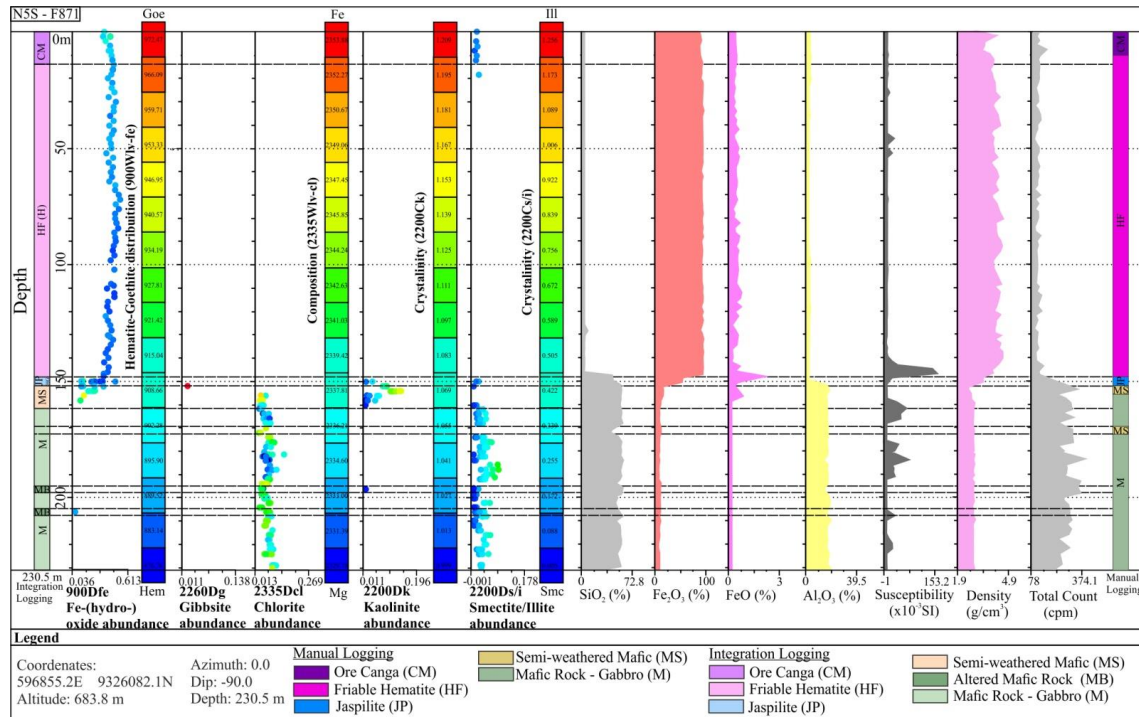


Fig. 23. Scatter plots of the reflectance spectroscopy data, geochemistry, physical properties of rocks, the petrographic description of the N5S-F871 drill hole and the logging interpretation using all integrated data as a function of depth. The color scale in the abundance diagrams of iron (hydro-)oxide and chlorite shows the wavelength in nm of the absorption feature of these minerals. The color scale of the abundance diagram of kaolinite and smectite-illite is colored according to the crystallinity of these minerals. Geochemical variation of SiO₂, Fe₂O₃, FeO and Al₂O₃ elements. Variation of the physical properties of rock with the magnetic susceptibility response, density, gamma spectrometry with the total count.

As previously mentioned, the calculate crystallinity of the smectite-illite mixture (2200Ci/i) may indicate the temperature range of the hydrothermal fluid which altered the rock, the chlorite features wavelength (2335Wlv-cl) indicate the composition of the chlorite and the wavelength of the iron (hydro-)oxide (900Wlv-fe) features indicate zones with hematite and hematite-goethite blend composition. Based on this, the response of the holes was arranged following the drawn profile. For the smectite-illite mixture it is noted that the N5S-FH1103 hole has a higher crystallinity, as well as a greater abundance of minerals with a more illite/smectite composition than the holes located to the west of the section, probably indicating that the fluid that generated this mineral in the N5S region was warmer and probably closer to its source west of the region (Fig. 24).

Table 5. Signature of each lithotype and the altered zones after integration of the data performed in the probes of the N5S body.

Lithotype	Geochemistry	Reflectance spectroscopy	Magnetic Susceptibility (x10 ⁻³ SI)	Gamma spectrometry	Density
Mafic rock (M)	Composition of SiO ₂ (52.64%), Fe ₂ O ₃ (10.90%), FeO (6.13%) and Al ₂ O ₃ (16.0%).	Characterized by the presence of chlorite minerals (2335Dec) and smectite-illite mixture (2200Ds/i). The composition of the chlorite (2335Wlv-Cl) would be Mg-Fe with a predominance of magnesium, being only the chlorites of the hole N5S-FH1099 of a more ferric composition.	It presents most of the values during the low testimonies, with anomalous peaks. Values range from 0.51 - 65.37 x10 ⁻³ SI.	It presents average values of the potassium, uranium and thorium channel with 30,75cpm, 10,12cpm, 15,85cpm, 2.88g/cm ³ and respectively. And an average total count value associated with of 248.74cpm. Within the study region this lithotype is the most potassium and therefore there is a factor F enhancement.	It presents a variation between 2.41g/cm ³ and 2.88g/cm ³ , with lower values associated with altered zones.
Semi-weathered mafic rock (MS)	Composition of SiO ₂ (12.25%), Fe ₂ O ₃ (40.38%), FeO (0.78%) and Al ₂ O ₃ (26.42%), lower values when compared to the original rock.	Characterized by iron (hydro-) oxides of hematite-goethite (HG) composition (900DFe), gibbsite (2260Dg) and kaolinite (2200Dk).	It presents values close to zero, ranging from 0.21-1.15 x10 ⁻³ SI.	It does not present a clear gamma-spectrometric signature varying according to the analyzed testimony.	Because it is a product of mafic rock alteration, it presents lower mean values, with 2.29 g/cm ³ .
Jaspilite (JP)	Composition of SiO ₂ (44.66%), Fe ₂ O ₃ (54.62%), FeO (0.50%) and Al ₂ O ₃ (0.22%), and anomalous peaks of enrichment occur in some elements, such as MnO, Ba, Co, Pb and REE's, in relation to the total hole background, not meaning that they are high values.	Characterized by the presence of iron (hydro-) oxide (900DFe), smectite (2200Ds/i) (low crystallinity mica).	It has a mean susceptibility lower than expected, with a value of 3.42x10 ⁻³ SI. This result can be attributed to the fact that the jaspilite interval is within a zone of alteration.	It presents an increase of potassium in the areas where it is compact, but it does not present clear signature in the compact brecciated regions described in the petrography	The fractured jaspilite varies between 2.97-3.64g/cm ³ . The compact jaspilite varies between 3.49-3.72g/cm ³ . The breccia jaspilite varies between 2.97-3.59g/cm ³ .
Friable hematite (HF)	Composition of SiO ₂ (1.23%), Fe ₂ O ₃ (96.87%), FeO (0.41%) and Al ₂ O ₃ (0.46%)	It is characterized by the higher abundance values of (hydro) oxide (900 Df) between 0.36 and 0.61. And punctually, it presents the gibbsite (2260Dg) at the top of the holes, next to the semi-decomposed mafic rock.	Most of the values obtained presented a variation between 0.68-42.9x10 ⁻³ SI, with two samples larger than 100x10 ⁻³ SI. Throughout the holes, the concentration of the values is smaller than 5x10 ⁻³ SI, with some anomalous peaks without relation and others related to the contact with the mafic rock.	The total count and the radioelements can be considered constant inside the layer and presents/displays values of factor F low, demonstrating that it does not hear potassium enrichment	It presents a variation of values similar to the fractured jaspilite, with a lower value of the increase of potassium channel and greater of the thorium channel.
Ore "Canga" (CM)	Mean composition of SiO ₂ (0.57%), Fe ₂ O ₃ (88.78%), FeO (0.35%) and Al ₂ O ₃ (3.59%)	Characterized by the presence of iron (hydro-) oxide (900DFe), gibbsite (2260Dg), smectite-illite mixture (2200Ds/i), kaolinite (2200Dk)	It presents values close to zero, with anomalous peaks.	It presents a variation of the total count similar to the friable hematite and the fractured jaspilite, with a lower value of the increase of potassium channel and greater of the thorium channel.	It presents lower values than those found for fresh rock.
Altered zones (MB and JPB)	It presents an increase of SiO ₂ , ETRs, Hf, Zr, Nb, P in relation to the background of the total hole, not signifying that they are high values, and a decrease of Al ₂ O ₃ , MnO, FeO and Cr.	They present increased wavelength of (900Wlv-Fe) with more hematite-goethite composition, besides kaolinite (2200Dk) and smectite-illite mixture (2200Ds/i)	It does not have a defined Fe signature.	It does not have a defined signature.	It presents lower values than those found for fresh rock.

The composition of chlorite (2335Dcl) in gabbro also shows a variation in the profile, showing a more magnesian composition to the east and more iron to the west (Fig. 25). According to Beaufort et al. (2005), in oxidizing conditions chlorite tends to be more magnesian (clinochlore) and the iron present is fixed in the hematite, but in the holes more to the west, it was observed to the formation of acicular hematite in the thin sections of the breccia zones, and chlorites of the gabbro in the hole N5S-FH1099 presented a more ferric composition. This analysis cannot be generalized to the two holes in the east due to a decrease in the size and frequency of breccias, in addition to the absence of acicular hematite in breccia regions.

In the gabbro of the drill hole located more to the west of the body N5S (N5S-FH1099), an abundance of iron (hydro-)oxide (900Dfe) was detected by the reflectance spectroscopy, and that is absent in the holes positioned in the east portion of this body (N5S-FH1103). This variation is justified by the greater impregnation of iron (hydro-)oxide in the gabbro samples of the western portion, which appear pink in a hand sample. Apparently, there is a limitation of the technique in the detection of martitized magnetite, which is present as an accessory mineral in the gabbro of all holes studied (Fig. 26). The more goethite composition at the beginning of the holes is mainly related to the supergenic alteration. In figure 26 it is possible to observe that to the west of the section the weathering profile is greater than in the east region.

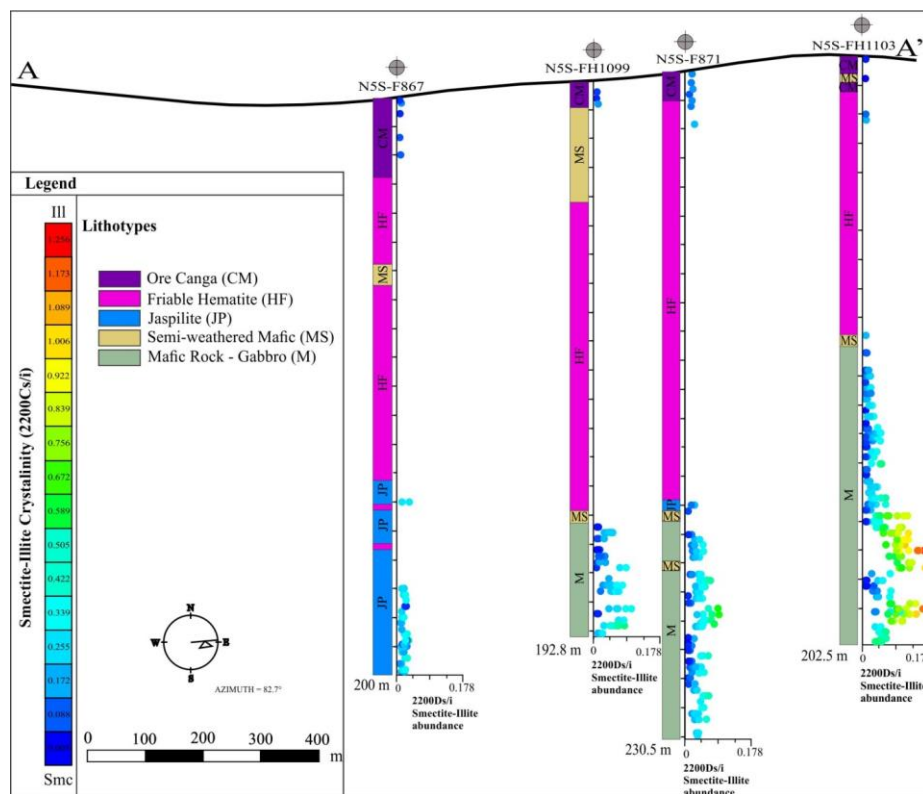


Fig. 24. Variation of the abundance (2200Ds/i) on the x-axis and color crystallinity (2200Ci/i) of the smectite-illite mixture in the N82.7°E profile, showing the location of the samples studied in the profile, with vertical exaggeration of 5x.

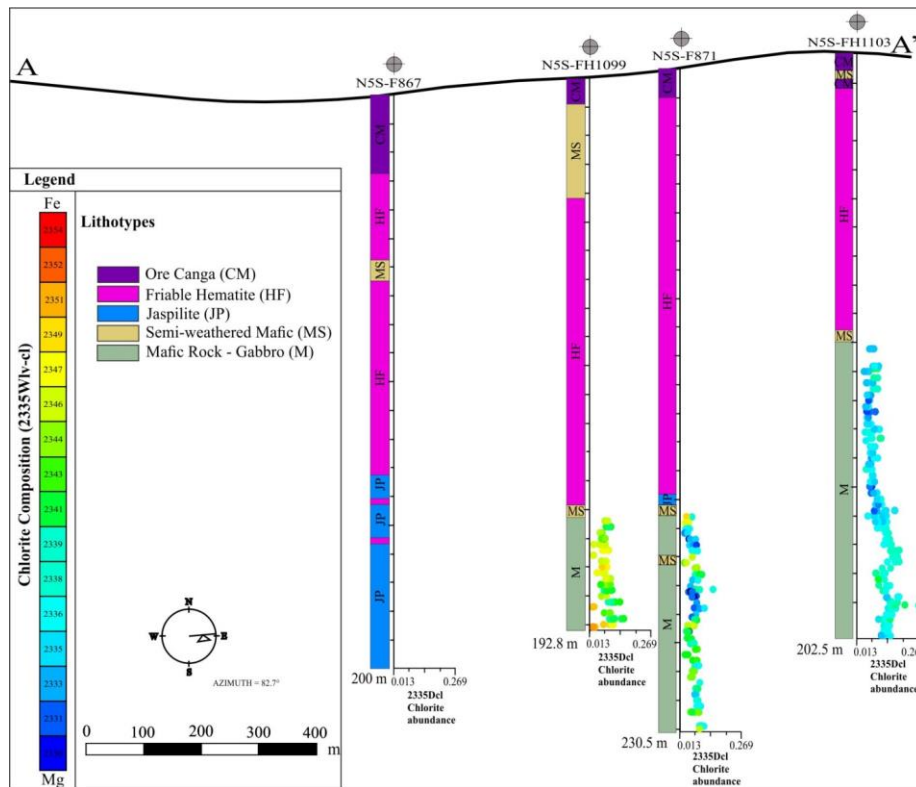


Fig. 25. Variation of the abundance (2335Dcl) in the x-axis and color composition (2335Wlv-cl) of the chlorite in the profile N82,7°E, showing the location of the studied samples in the profile, with a vertical exaggeration of 5x.

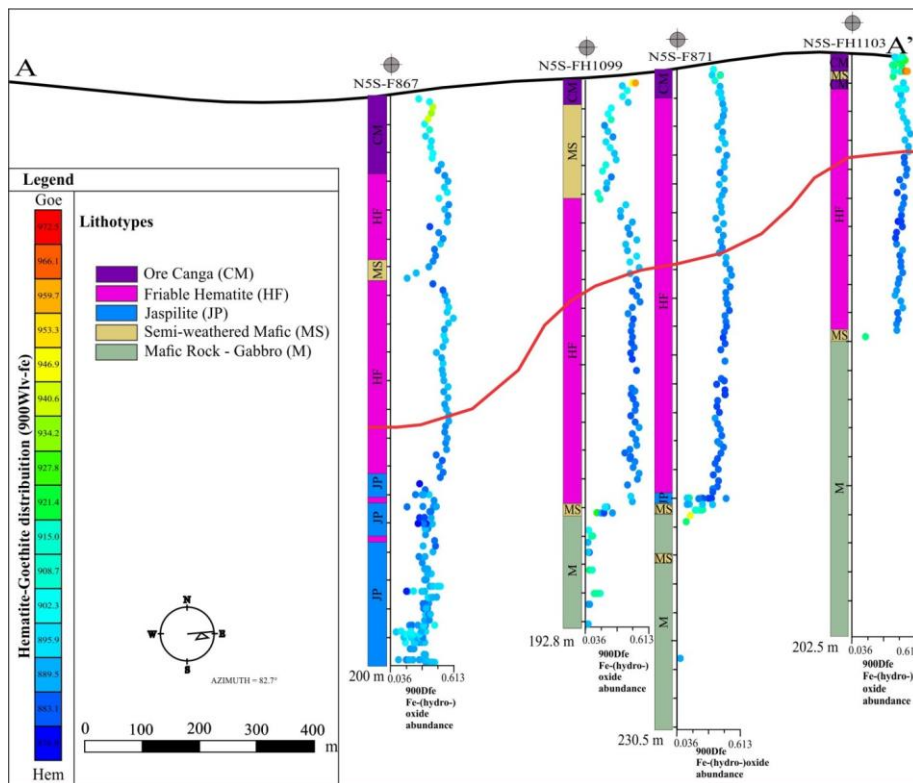


Fig. 26. Variation of the abundance (900Dfe) in the x-axis and color composition (900Wlv-fe) of the iron (hydro-)oxide in the profile N82,7°E, showing the location of the studied samples in the profile, with a vertical exaggeration of 5x. The red line indicates the weathering profile, where a hematite-goethite composition prevails over the hematite composition.

To corroborate the weathering profile, the response of the iron (hydro-)oxide of the reflectance spectroscopy was compared with the variation in the hole of the geochemical elements P and Sc and of the physical properties of gamma spectrometry of the potassium channel and factor F (Fig. 27). Although subtle, it is possible to observe a difference of the characteristics in the region with greater goethite composition, and the interesting one is that this variation is within the same lithotype.

The result of the integration and signature of the lithotypes was also presented in profile. The holes on western of the profile (N5S-F867 and N5S-FH1099) present larger thicknesses and alteration zones than the eastern holes (N5S-F871 and N5S-FH1103) (Fig. 28). When comparing visual field description loggings and interpreted loggings after integration of reflectance, geochemistry, and physical rock spectrometry data, it is possible to observe a greater differentiation among the lithotypes, as well as the existence of distinct zones not previously identified in all lithotypes.

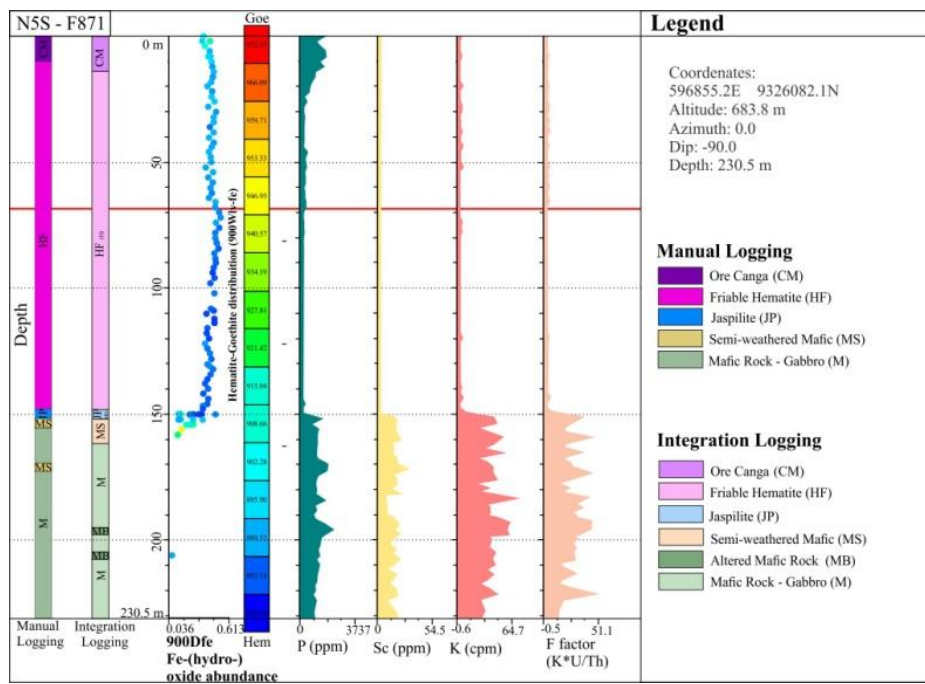


Fig. 27. Variation of the hematite-goethite composition in the hole N5S-F871 and correlation with the geological data, the result of the integration, the chemical elements P and Sc and the properties of gamma spectrometry of the potassium channel (K) and factor F. With emphasis on the red line, which represents the delimitation at the beginning of the hole of the composition more goethite.

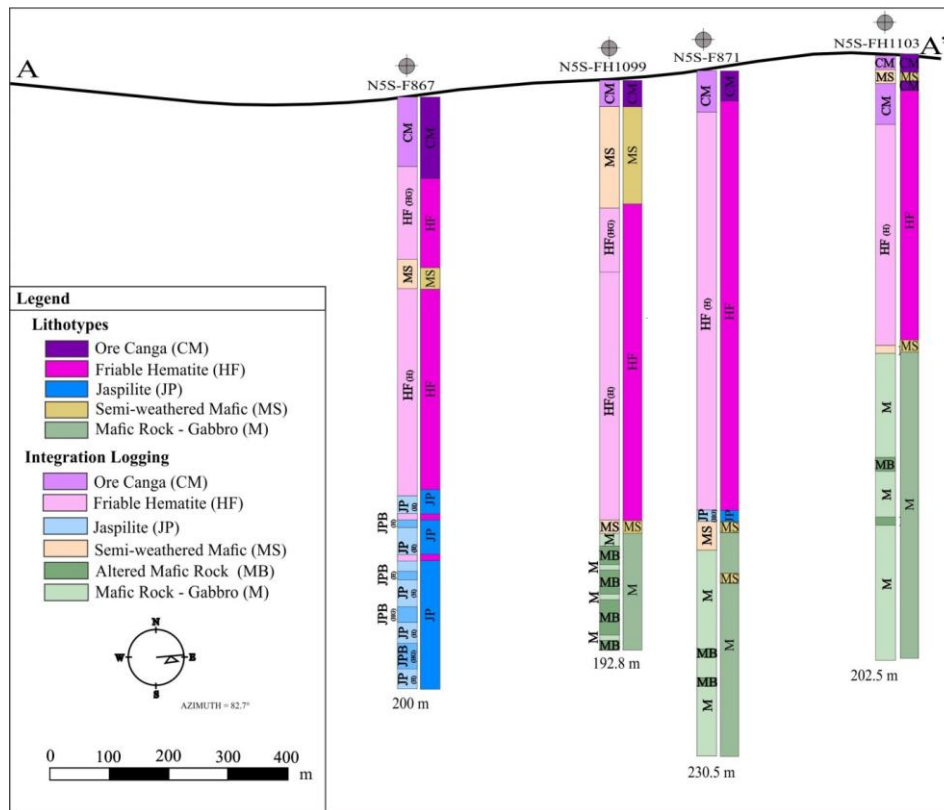


Fig. 28. Profile showing the location and description of the studied samples (right) and the logging resulting from the interpretation of the integration of reflectance spectroscopy data, geochemistry and rock physical properties (left) for each hole, with vertical exaggeration of 5x.

6. Conclusion

The elaboration of the geological profile from the description of the drill holes and the petrographic characterization of the different lithotypes, provided support for the data integration and assisted in the analysis of the results found in each phase of this study.

The analysis of the geochemical profile of the drill holes identified the elements that differentiate each lithotype and assisted in the delimitation of the brecciated zones domains during the integration of the data. In addition, these results agree with reflectance spectroscopy data and physical properties of rocks (gamma spectrometry, magnetic susceptibility and density).

The algorithms obtained in the reflectance spectroscopy allow the identification of secondary minerals such as kaolinite, smectite-illite and gibbsite, not recognized in the petrographic analysis, demonstrating that the method is effective to characterize and evaluate the mineralogy distribution of an iron deposit. The analysis of the parameters obtained by the algorithms allowed the differentiation of the various lithotypes and allowed the detailing of the following zones: differentiation between zones with predominance of hematite and zones with predominance of goethite in jaspilite and friable hematite; identification and differentiation of zones with different chlorite compositions in gabbro; in

the identification of the crystallinity of the smectite-illite and its distribution in the drill holes and in the geological profile. The parameters of mineral abundance obtained in this work show that this method can be very useful for a quickly estimation of iron content and some minerals related to the deposit. This helps in the identification of contaminants, such as clay minerals, which facilitates ore processing.

The physical properties, gamma spectrometry, and magnetic susceptibility did not provide information to distinguish the altered zones during the integrated analysis, but when analyzed individually, gamma spectrometry differentiated the geological units such as Carajás Formation and gabbro. The best results of physical property were reached by the density, which showed the difference between the lithotypes and variation in the zones.

The evaluation of airborne products of gradiometric gravimetry, magnetometry and gamma spectrometry was useful to identify and characterize the N5S deposit. Airborne magnetometry presents magnetic anomalies whose sources may be correlated with the protore or gabbro. Iron ore is composed essentially of hematite, a non-magnetic mineral and, therefore, does not respond directly to the applied method. Aeromagnetometry also provided data for the delimitation of in-depth and surface lineaments. The aerogammaspectrometry is efficient in the definition of the different geological units of the region. In the ternary images, it is possible to individualize the outcropping iron formations, from the signature of low contents of the radioelements K, eTh and eU, the results show a high correlation with the outcrops mapped previously. The lithogeophysical map generated for N5S allowed to conclude that it is possible to identify the iron formations and the host rock formations through the classification not supervised by gamma spectrometric domains. The gradiometric gravimetry was useful for the delimitation of the Carajás Formation, besides defining the synform structure of the area and lineaments not described in geology and aeromagnetometry. The model presented can be used both in the initial phase of prospecting, providing information about the response pattern of the airborne products, as well as on the continuity and progress of the mine.

The inversion of the gradiometric gravimetry data recovered dense bodies compatible with the mineralized package and separated the iron formation of the hosting rocks, besides demonstrating an initial integration of the aerogeophysics with the density measured in the drill holes. With the above results, it is possible to say that the geophysical density model is consistent with the geological model and can be used as an exploratory parameter.

The individual analysis of each technique applied in this work provided satisfactory results, however each one has an acceptable limit of results. The integration of these data exceeds this limit,

aiding in the characteristics of each lithotype and regions of change. The integration made it possible to create a geochemical and geophysical signature of the lithotypes found in the N5S body holes. Moreover, the representation of the results of the mixture of the smectite-illite, the chlorite, the iron (hydro-) oxide and the logging of integration of the profile data allowed to differentiate regions with different compositions and characteristics in the N5S. The crystallinity of the smectite-illite mixture (2200Cs/i) indicated that the eastern region of the profile was warmer. The composition of chlorite (2335Dcl) shows a more magnesian composition to the east and more ferritic to the west, demonstrating that the Mg-chlorite composition is related to illite/smectite. The abundance of iron (hydro-)oxide (900Dfe) presents in gabbro is relationship with iron impregnation on the rocks and not with the presence of magnetite and hematite crystals, showing a technical limitation of the equipment. Detection of iron (hydro-)oxide indicated that the holes on western have a large layer with the composition hematitic-goethitic, demonstrating that the supergenic alteration is deeper in this region than in the eastern of the profile.

The detailed differentiation between the lithotypes represents the efficiency of the integration and application of the methods used in this work. With the association of this tools discussed, it is possible to help decision making and direct the exploratory work, so as to make better use of human and financial resources.

7. Acknowledgements

We would like to thank Vale SA for its support in the elaboration of this research, through the promotion of the project Generation of Prospective Models for Iron Ore (Technical and Scientific Cooperation Agreement between Vale and UnB), including a 5-month scholarship for the first author. To CNPq for the award of 19 months of master's degree scholarship to H.S. Pereira and the scholarship of scientific productivity of Prof. A.M. Silva. To the facilities of the Institute of Geosciences and the Faculty of Technology of the University of Brasilia (UnB) for providing additional support for this research, especially to the Laboratory of Applied Geophysics and the Laboratory of Geotechnics.

8. References

- Adams, J.B., and Filice, A.L., 1967, Spectral reflectance 0.4 to 2.0 microns of silicate rock powders: *Journal of Geophysical Research*, v. 72, p. 5705–5715.
- ALS Schedule of Services and Fees, 2017 (<https://www.alsglobal.com/-/media/als/resources/services-and-products/geochemistry/fee-schedules/als-geochemistry-fee-schedule-usd.pdf>).

- Araújo, O.J.B., and Maia R.G.N. 1991. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás: Subprojeto Recursos Minerais, Sierra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. Brasília, DNPM/Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais-CPRM, 152 p.
- Araújo, O. J. B., Maia, R. G. N., Jorge João, X. S., and Costa, J. B. S., 1988, A megaestrutura archeana da Folha Sierra dos Carajás: Anais do Congresso Latino-Americano de Geologia, v. 7, p. 324-338.
- Archibald, N.J., Gow P., and Boschetti F., 1998, Multiscale edge analysis of potential field data: Exploration Geophysics, v.30, p.38-44.
- Assis, L.M., 2013, Geração de modelo exploratório para o minério de ferro da Província Mineral de Carajás através da integração de dados multifonte: Unpublished M.Sc. thesis, Brasília, Brazil, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 154p.
- Básilio, M.S., 2005, Geoquímica dos sedimentos associados aos minérios de ferro da região leste-sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG e seu potencial para adsorção e dessorção de metais traço: Unpublished Ph.D thesis, Ouro Preto, Brazil, Universidade Federal de Ouro Preto, 230p.
- Beaufort, D., Patrier, P., Laverret, E., Bruneton, P., and Mondy, J., 2005, Clay alteration associated with Proterozoic unconformity-type uranium deposits in the East Alligator River uranium field (Northern Territory, Australia): Economic Geology, v. 100, n. 3, p. 515–536.
- Beisiegel, V.R., 1982, Distrito ferrífero da Serra dos Carajás: Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, Annals, v. 1, p. 21–46.
- Beisiegel, V.R., Bernardelli, A.L., Drummond, N.F., Ruff, A.W., and Tremaine, J.W., 1973, Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás: Revista Brasileira de Geociências, v. 3, p. 215-242.
- Beukes, N.J., Gutzmer, J., and Mukhopadhyay, J., 2002, The geology and genesis of high-grade hematite iron ore deposits: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series, v.7, p. 23-29.
- Braga, M. A., 2009, Aplicação de aeroradiometria 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): Unpublished Ph.D. thesis, Rio de Janeiro, Brazil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 271p.
- Cudahy, T., and Ramanaidou, E.R., 1997, Measurement of the hematite:goethite ratio using field visible and near-infrared reflectance spectrometry in channel iron deposits, Western Australia: Aust. J. Earth Sci., v. 44, p. 411–420.

- Dalstra, H., Guedes, S. 2004, Giant hydrothermal hematite deposits with Mg-Fe metasomatism: A comparison of the Carajás, Hamersley, and other iron ores: *Economic Geology*, v. 99, p. 1793-1800.
- Dalstra, H., and Flis, M., 2008, High-grade iron ore exploration in an increasingly steel-hungry world: The past, current and future role of exploration models and technological advances: *Reviews in Economic Geology*, v. 15, p. 393-409.
- Dardenne, M.A., and Schobbenhaus, C., 2001, *Metalogênese do Brasil*: Brasília, Editora Universidade de Brasília, 392 p.
- Dentith, M., and Mudge, T.S., 2014, *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*: London, Cambridge University Press, 454p.
- DNPM, 2014, *Sumário Mineral 2014*: Brasília, Brasil, Departamento Nacional de Produção Mineral, v.33, 137p.
- Docegeo, 1988, *Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás*: Proceedings of Congresso Brasileiro de Geologia, 35th, Belém, Brazil, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 11-54.
- Ducart, D.F., Crósta, A.P., Souza Filho, C.R., e Coniglio, J., 2006, Alteration mineralogy at the Cerro La Mina Epithermal prospect, Patagonia, Argentina: Field mapping, short-wave infrared spectroscopy, and ASTER Images: *Economic Geology*, v. 101, p. 981–996.
- Ferreira, V.M., 2014, *Caracterização de formações ferríferas bandadas através de dados de propriedades físicas de rocha e sua integração com dados aerogeofísicos: o estudo de caso do corpo N4WS, Serra Norte – Província Mineral de Carajás*: Unpublished M.Sc. thesis, Brasília, Brazil, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 204p.
- Figueiredo and Silva, R. C., 2004, *Caracterização petrográfica e geoquímica de jaspilitos e minérios de ferro dos depósitos N1, N4W, N4E e N5E, Província Mineral Carajás, Pará: implicações para a mineralização de ferro*: M.Sc. thesis, Belo Horizonte, Brasil, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 155.
- Figueiredo and Silva, R.C., 2009, *Evolução e gênese do minério de ferro hidrotermal nos depósitos da Serra Norte, Província Mineral Carajás*: Unpublished Ph.D. thesis, Belo Horizonte, Brazil, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, 236 p.
- Flis, M., 2008, *Advances in Geophysics Applied to the Search for Banded Iron Formation-Related, High-Grade Hematite Iron Ore*: *Reviews in Economic Geology*, v. 15, p. 381-392.

- FritzGerald, D and Paterson, R., 2013, Getting the best value from gravity gradiometry: Society of Exploration Geophysicist Annual Meeting, Houston, Extended Abstracts, p. 1-4.
- Gibbs, A.K., Wirth, K.R., Hirata, W.K., and Olszewski, W.S., 1986, Age and composition of the Grão Pará group volcanics, Serra dos Carajás: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16(2), p. 201-211.
- GMEX, 2008, Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration, Epithermal Alteration Systems: AusSpec International Ltd., Edition 3, 59 p.
- Gross, G.A., 1980, A classification of iron-formation based on depositional environments: *Canadian Mineralogist*, v. 18, p. 215–222.
- Guedes, S.G., 2000, Evidências de alteração hidrotermal na formação ferrífera bandada e minérios de ferro de N4, N5 e Serra Leste, Serra dos Carajás-Pará, Brasil: Unpublished Ph.D. thesis qualification, Belo Horizonte, Brazil, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, 61p.
- Guedes, S.G., Rosière, C.A., Barley, M., and Lobato, L.M., 2002, The importance of carbonate alteration associated with the Carajás high-grade hematite deposits, Brazil: Melbourne, Australia, Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series 7, p. 63–66.
- Haest, M., Cudahy T., Laukamp, C. and Gregory, S., 2012, Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. I. Validation of mineral abundance and composition scripts at the Rocklea Dome channel iron deposit in Western Australia: *Economic Geology*, v. 107, p. 209 – 228.
- Haest, M., Cudahy, T., Laukamp, C., and Gregory, S., 2012, Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. II. Three-dimensional mineralogical characterization of the Rocklea channel iron deposit, Western Australia: *Economic Geology*, v. 107, p. 229 – 249.
- Hey, M.H., 1954, A new review of the chlorites: *Mineralog Magazine*, v.30, p.277-292.
- Hinze, P.W.J., Von Frese, R.R.B., and Saad, A.H., 2013, Gravity and Magnetic Exploration-Principles, Practices, and Applications: London, Cambridge University Press, 502p.
- IAEA, International Atomic Energy Agency, 2003, Guidelines for radioelement using gamma ray spectrometry data, Viena, 173p.
- Justo, A. P., 2014, Programa Geologia do Brasil - PGB Serra dos Carajás - SB.22-Z-A-II Estado do Pará - Carta Geológica: CPRM, 2014, Belém, Scale 1:100.000.
- Laakso, K., Peter, J. M., Rivard, B., and White, H. P., 2016, Short-Wave Infrared Spectral and Geochemical Characteristics of Hydrothermal Alteration at the Archean Izok Lake Zn-Cu-Pb-Ag

- Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Nunavut, Canada: Application in Exploration Target Vectoring: *Economic Geology*, v. 111, n. 5, p. 1223 – 1239.
- Li, Y., 2001, 3D inversion of gravity gradiometry data: Expanded Abstract, 71th Annual International Meeting of Society of Exploration Geophysics, Tulsa, v.20, p.1470–1474.
- Lobato, L.M., Rosière, C.A., Silva, R.C.F., Zucchetti. M., Baars, F.J., Seoane, J.C.S., Rios, F.J., Pimentel, M., Mendes, G.E., and Monteiro, A.M., 2005a, A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província, in Marini, O. J., Queiroz, E. T., Ramos, B. W., Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia: DNPM/CTMineral/FINEP/ADIMB, Brasília, p. 25-92.
- Lobato, L. M., Figueiredo and Silva, R. C., Rosière, C. A., Zucchetti, M., Baars, F. J., Pimentel, M. M., Rios, F. J., Seoane, J. C. S., and Monteiro, A. M., 2005b, Hydrothermal origin for the iron mineralization, Carajás Province, Pará state, Brazil: *Iron Ore 2005*, The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series v. 8, Australia, p. 99-110.
- Macambira, J. B., 1992, Os possíveis microfósseis da Formação Carajás – Pará, in Congresso Brasileiro de Geologia, 37th, São Paulo, Brazil, 1992, v. 2., p. 483-484.
- Macambira, J.B., 2003, O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. Unpublished Ph.D thesis, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 217p.
- Macambira, J.B., and Silva, V.F., 1995, Estudo petrológico, mineralógico e caracterização das estruturas sedimentares e diagenéticas preservadas na Formação Carajás, Estado do Pará: *Boletim Museu Para, Emílio Goeldi, Série Ciência da Terra*, v. 7, p. 363-387.
- Macambira, J.B., Ramos, J.F.F., Assis, J.F.P., and Figueiras, A.J.M., 1990, Projetos Serra Norte e Pojuca, Relatório final: Convênio DNPM/DOCEGEO/UFPA, Belém.
- Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh, T.E., and Lindenmayer, D., 1991, U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil: *Precambrian Research*, v. 49, p. 329-354.
- Meirelles, M.R., 1986, Geoquímica e petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás, Pará: Unpublished M.Sc. thesis, Brasília, Brasil, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 171p.
- Morris, R.V., Lauer, H.V., Lawson, C.A., Gibson, E.K., Nace, G.A., and Stewart, C., 1985, Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite (α Fe₂O₃), maghemite

- (gamma Fe₂O₃), magnetite (Fe₃O₄), goethite (alpha FeOOH) and lepidocrocite (gamma FeOOH): *Journal of Geophysical Research Solid Earth and Planets*, v. 90, p. 3126–3144.
- Murphy, R. J. and Monteiro, S. T., 2013, Mapping the distribution of ferric iron minerals on a vertical mine face using derivative analysis of hyperspectral imagery (430-970 nm): *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v.75, p. 29-39.
- Oldenburg, D.W., and Li.Y, 2007, *Inversion for Applied Geophysics: A Tutorial*, EOS, Vancouver, Canadá, 85p.
- Oliveira, J.R., Silva Neto, C.S., and Costa, E.J.S. 1994, Serra Pelada; folha SB.22.X.C. Estado do Pará, escala 1:250.000, in *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil*, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 220 p.
- Olszewski, W. J., Wirth, K. R., Gibbs, A. K., and Gaudette, H. E., 1989, The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks. Serra dos Carajás, Brazil: *Archean continental volcanism and rifting: Precambrian Research*, v. 42, p. 229-254.
- Pereira, W. R., Carlos, D. U., Braga, M. A. S., Galbiatti, H. F., 2016, Evaluation of gamma-gamma well logging data applied to iron ore exploration – Vale geophysical well logging test facility: *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 34, n. 2.
- Prado, E.M.G., Silva A.M., Ducart D.F., Toledo C.L.B., and Assis L.M. 2016, Reflectance spectroradiometry applied to a semi-quantitative analysis of the mineralogy of the N4ws deposit, Carajás Mineral Province, Pará, Brazil: *Ore Geology Reviews*, v. 78, p. 101-119.
- Ramanaidou, E., Wells, M., Belton, D., Verrall, M., and Ryan, C., 2008, Mineralogical and Microchemical Methods for the Characterization of High-Grade Banded Iron Formation-Derived Iron Ore: *Reviews of Economic Geology*, v.15, p. 129-156.
- Resende, N.P., and Barbosa, A.L.M., 1972, *Relatorio de pesquisa de minério de ferro, distrito ferrífero da Serra dos Carajás, estado do Pará: AMZA, final report of research*, v. 1, 248 p., v. 2, maps and geological profile, 119p.
- Rosière, C.A., Seoane, J.C.S., Baars, F.J., and Lobato, L.M., 2004, *Estruturação da província de Carajás e sua influência na mineralização de ferro*, PA: ADIMB, *Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral*, Ouro Preto, CD-ROM.
- Rosière, C. A., Baars, F. J., Seoane, J. C., Lobato, L. M., da Silva, L. L., De Souza, S. R. C., and Mendes, G. E., 2006, Structure and iron mineralisation of the Carajás province: *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, v. 115, p.126–136.

- Sherman, D.M., Burns, R.G., and Burns, V.M., 1982. Spectral characteristics of the iron oxides with application to the Martian Bright region mineralogy: *Journal of Geophysical Research*, v. 87, p. 169–180.
- Singh, M., Singhal, J., Prasad, K. A., Rajesh, V. J., Ray, D., and Sahoo, P., 2016, Spectral characteristics of banded iron formation in Singhbhum craton, eastern India: Implications for hematite deposits on Mars: *Geoscience Frontiers*, v.7, p. 927-936.
- Souza, J.P.G., Silva, A. M., Toledo, C. L. B., and Assis, L.M., 2016, Inversão de dados FTG e magnetometria do depósito N4WS utilizando dados petrofísicos coletados nos testemunhos de sondagem. – Carajás – Brasil: Simpósio Brasileiro de Geofísica, 7th, Ouro Preto, Brazil, Extended Abstracts.
- Spier, C.A., Oliveira, S.M.B., Sial, A.N. and Rios F.J., 2006, Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: *Precambrian Research*, v.152, p. 170 – 206.
- Tassinari, C.C.G., 1996, O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos: Unpublished Ph.D thesis, São Paulo, Brazil, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 139p.
- Tavares, F. M., 2014. Programa Geologia do Brasil – PGB, Rio Verde - SB.22-Z-A-III, Estado do Pará - Carta Geológica. Belém: CPRM, 2014, Scale 1:100.000
- Tavares, F.M., 2015, Evolução geotectônica do nordeste da Província Carajás: Unpublished Ph.D. thesis, Rio de Janeiro, Brasil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 115p.
- Thompson, A.J.B., Hauff, P.L., and Robitaille, A.J., 1999, Alteration Mapping in Exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy: *SEG Newsletter*, n. 39, p. 15 – 27.
- Tolbert, G.E., Tremaine, J.W., Melcher, G.C., and Gomes, C.B., 1971, The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil: *Economic Geology*, v. 7, p. 985-994.
- Trendall, A.F., Basei, M.A.S., de Laeter, J.R., and Nelson, D.R., 1998, Ion microprobe zircon, U-Pb results from the Carajás area of the Amazon Craton: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 11, p. 265–276.
- Vale S.A., 2015, Relatório de produção do segundo trimestre (<http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/conheca-nossos-resultados-operacionais-segundo-trimestre-2015.aspx>)

Vasquez M.L., Rosa Costa L.T., Silva C.M.G., Klein E.L., 2008. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Organizadores, Marcelo Lacerda Vasquez, Lúcia Travassos da Rosa-Costa. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM, 2008.

Wirth, K.R., Gibbs, A.K., and Olzewski, Jr., W.J., 1986, U-Pb zircon ages of the Grão Pará Group and Serra dos Carajás granite: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, p. 195–200.

Zacchi, E. N. P., Silva, A. M., Rolim, V. K., 2010, Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Sierra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG: *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28, p. 643-656.

9. Attachment

Annex 1. Nomenclature to describe the survey testimonies used by Vale S.A.

Litotipo	Descrição	Nomenclatura usual	Sigla
Sterile lateritic cover	It occupies the top of the planes, marking the old planing horizon of the Carajás Province, covering the regolith of the mafic rocks or associated with mature and cemented colluvial deposits. It has a colloform structure and high porosity	Chemical Canga	CQ
Mineralized lateritic cover	Colluvionar and / or eluvionar Deposit on the outcrops of in situ ore. The thickness can reach more than 20m. It has high Fe content and relatively low contaminants, allowing its potential exploitation as ore. It is an indicator of the occurrences of iron ore	Ore Canga	CM
Friable Hematitite	Typology of iron ore that is brittle, with high porosity, and with an average content of 66% Fe. Color black to dark gray, sometimes reddish due to change to goethite. The inherited jaspilite bundle is partially to fully obliterated due to leaching of jasper / chalcedony / carbonate	Friable hematite	HF
Compact Hematitite	Typology of compact ore, generated from the cementation by goethite when associated to lateritization processes and locally by hydrothermal fluids, when associated to tectonic structures. It has coloration ranging from black to reddish brown. The porosity is high and the Fe content is concentrated between 60.15 and 68.09%	Compact Hematite	HC
Manganese Hematitite	Typology of ore rich in Fe and with Mn contents higher than 2%, usually positioned at the base of the hematite bodies, probable area of accumulation of leached Mn of the weathered horizon	Manganese Hematite	HMN
Aluminous Hematitite	Typology of ore with iron contents higher than 55% and alumina higher than 3%, usually present at the top of the iron formation	Aluminous Hematite	HAL
Iron Manganese	Partly weathered jaspilite enriched in manganese	Iron Manganese	FMN
Jaspilite	Banded iron formation (BIF), with millimeter centimetric laminations between levels of jasper / chalcedony / carbonate and magnetite / hematite. It represents the proto ore in the region, with Fe content between 20 to 40%.	Jaspilite	JP
Regolith very weathered	Regolith of the mafic rocks, with total loss of the original structure of the rock. Its depth is directly related to the level of weathering	Weathered Mafic	MS
Regolith weathered	partially Regolith of the mafic rocks presenting relics of the original plot of the rock, but already with deep mineralogical transformation	Semi-weathered Mafic	MSD
Mafic Rock	Basalts, gabbros and diabases little affected at all by weathering, systematically chloritized. It presents dark green coloration, sometimes with typical volcanic structures like tonsils filled by quartz, carbonates and chlorites and possibly by sulphides.	Mafic Rock	M
Sandstone	Massive sedimentary rock of whitish color, constituted mainly by grains of quartz and arkose matrix	Sandstone	AET
Conglomerate	A clastic sedimentary rock of a psamitic character, it has whitish to yellowish coloration, constituted mainly by angular fragments to sub-rounded ones of quartzites, jaspilite, cherts and mafic volcanic rock	Conglomerate	CGL
Mudstone/Siltstone	Sedimentary rock of fine granulometry, consisting of layers of silt and or clay, presenting locally mottled	Mudstone/Siltstone	AGT

10. Appendix

Appendix 1. Chemical analysis of chlorite.

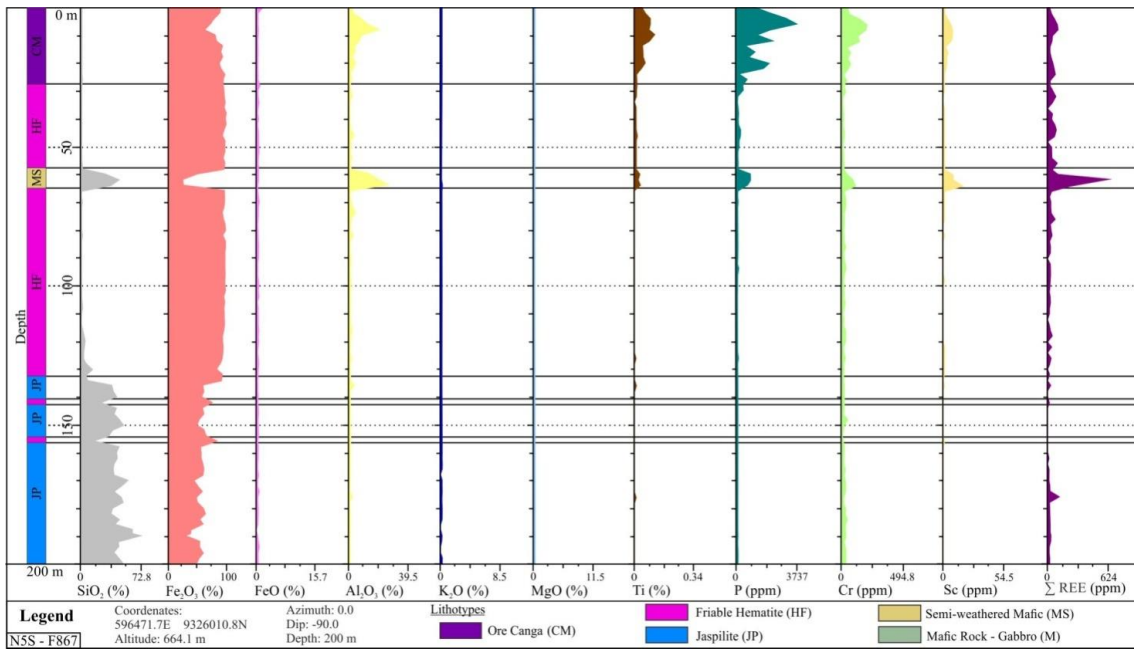
Sample %	F871									FH1099							
	98/02	98/03	98/04	98/05	98/06	98/07	98/08	98/09	98/10	79/01	79/02	79/03	79/04	79/05	79/06	79/07	79/08
SiO₂	41.69	27.02	28.26	28.70	28.01	27.56	36.07	27.40	27.80	30.02	29.74	29.17	30.19	31.65	29.94	31.40	30.34
TiO₂	0.15	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.22	0.31	0.00	0.07	0.14	0.21	0.20
Al₂O₃	6.39	15.83	15.76	14.02	16.03	15.48	9.72	15.36	14.96	14.63	15.74	17.59	16.70	14.48	14.96	14.17	15.18
FeO	18.92	20.14	19.77	19.59	19.93	19.61	18.22	18.71	19.78	19.16	21.15	20.82	21.83	18.83	21.82	17.19	19.10
MnO	0.68	0.75	0.72	0.81	0.62	0.86	0.57	0.55	0.69	0.60	0.63	0.88	0.62	0.64	0.67	0.68	0.73
MgO	15.84	23.17	22.65	23.85	22.83	23.69	19.97	23.80	22.75	24.42	23.15	22.54	22.47	25.43	22.49	24.89	23.85
SrO	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.09	0.01	0.04	0.01	0.03	0.02	0.03
CaO	7.46	0.13	0.07	0.08	0.05	0.09	3.95	0.01	0.10	0.07	0.05	0.09	0.07	0.10	0.05	0.10	0.07
Na₂O	0.31	0.00	0.01	0.01	0.04	0.01	0.18	0.04	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.00
K₂O	0.16	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.08	0.04	0.02	0.05	0.07	0.02	0.03	0.09	0.05	0.12	0.08
Cl	0.08	0.00	0.01	0.00	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.11	0.15	0.00	0.02	0.10	0.36	0.03	0.09
V₂O₃	0.09	0.00	0.05	0.05	0.03	0.05	0.01	0.00	0.08	0.00	0.04	0.14	0.02	0.07	0.04	0.00	0.01
OH	8.26	12.87	12.69	12.80	12.46	12.63	11.20	14.06	13.74	10.95	8.99	8.42	8.00	8.53	9.51	11.16	10.35
Total	100.03	99.98	100.00	99.99	100.04	100.04	100.00	100.00	99.99	100.02	100.03	99.99	100.00	100.02	100.08	100.01	100.03
Cations recalculated to 28 oxygens (PUFF)																	
Si	7.17	4.95	5.14	5.17	5.11	5.02	6.28	4.95	5.04	5.41	5.46	5.41	5.58	5.69	5.50	5.57	5.48
Ti	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.06	0.00	0.01	0.02	0.04	0.03
Al	0.28	0.73	0.72	0.63	0.73	0.71	0.42	0.69	0.68	0.66	0.72	0.82	0.77	0.65	0.69	0.63	0.69
Fe²⁺	2.26	2.56	2.50	2.46	2.53	2.48	2.21	2.35	2.49	2.40	2.70	2.68	2.80	2.35	2.79	2.12	2.40
Mn	0.08	0.10	0.09	0.10	0.08	0.11	0.07	0.07	0.09	0.08	0.08	0.11	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09
Mg	2.62	4.07	3.96	4.13	4.00	4.15	3.34	4.13	3.96	4.22	4.09	4.01	3.99	4.39	3.97	4.24	4.14
Sr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	1.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.56	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Na	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H	0.16	0.26	0.26	0.26	0.25	0.26	0.22	0.28	0.28	0.22	0.18	0.17	0.16	0.17	0.19	0.22	0.21
Cations	13.67	12.70	12.68	12.77	12.71	12.74	13.11	12.48	12.57	13.00	13.30	13.29	13.40	13.37	13.26	12.92	13.05
Fe/(Fe+Mg)	0.46	0.39	0.39	0.37	0.39	0.37	0.40	0.36	0.39	0.36	0.40	0.40	0.41	0.35	0.41	0.33	0.37

Appendix 2. Algorithms extracted from the spectral data (band radius, absorption depth, minimum wavelength, etc.) of each absorption feature.

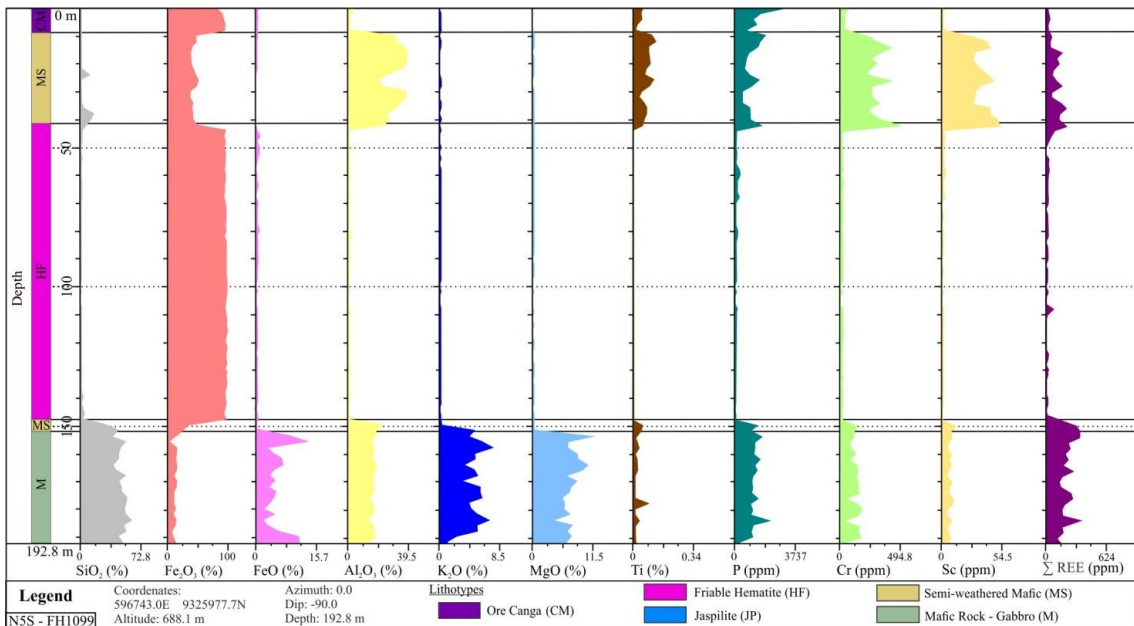
Parameter	Function	TSG Core algorithm
600-740SL	Identify Fe (hydro-)oxides	PFIT: Continuum slope ranging between 600 and 740 nm
900Dfe	Identify and quantify Fe (hydro-)oxides	PFIT: Depth of the continuum removed spectrum calculated using a sixth-degree polynomial from 735 to 1290 nm, with focus ranging between 830 and 1020 nm
900Wlv-fe	Differentiate hematite-goethite	PFIT: Wavelength of the continuum removed spectrum calculated using an eighth-degree polynomial 735 to 1290 nm, with focus ranging between 830 and 1020 nm
N1650R	Albedo	PROFILE: Mean reflectance at 1650 ± 100 nm
2164Dk	Identify kaolinite	PFIT: Depth of the continuum removed spectrum calculated using a sixth-degree polynomial from 2152 to 2180 nm, with focus ranging between 2160 and 2170 nm
2200Dk	Identify and quantify kaolinite	PFIT: Depth of the continuum removed spectrum calculated using an eighth-degree polynomial from 2130 to 2245 nm, with focus ranging between 2200 and 2215 nm
2170SL	Kaolinite crystallinity index	ARITH: (R2180/2166)
2170Ck	Kaolinite crystallinity	ARITH: (2170SL+2200Dk)
1450Dg	Identify gibbsite	PFIT: Depth of the continuum removed spectrum calculated using an eleventh-degree polynomial from 1350 to 1710 nm, with focus ranging between 1430 and 1467 nm
2260Dg	Identify and quantify gibbsite	PFIT: Depth of the continuum removed spectrum calculated using a sixth-degree polynomial from 2115 to 2475 nm, with focus ranging between 2240 and 2300 nm
2251Dcl	Identify chlorite	PFIT: Depth of the continuum removed spectrum calculated using a sixth-degree polynomial from 2236 to 2268 nm, with focus ranging between 2243 and 2258 nm
2335Dcl	Identify and quantify chlorite	PFIT: Depth of the continuum removed spectrum calculated using a seventh-degree polynomial from 2280 to 2408 nm, with focus ranging between 2328 and 2360 nm
2335Wlv-cl	Chlorite composition	PFIT: Wavelength of the continuum removed spectrum calculated using a sixth-degree polynomial 2272 to 2381 nm, com with focus ranging between 2310 and 2370 nm
1500SL	Identify Fe ²⁺	ARITH: (R1650/R1350)
1915Ds/i	Identify smectite-illite	PFIT: Depth of the continuum removed spectrum calculated using an eighth-degree polynomial from 1830 to 2140 nm, with focus ranging between 1890 and 1950 nm
2200Ds/i	Identify and quantify smectite-illite	PFIT: Depth of the continuum removed spectrum calculated using a third-degree polynomial from 2150 to 2238 nm, with focus ranging between 2198 and 2220 nm
2200Cs/i	Smectite-illite crystallinity	ARITH: (2200Ds/i)/(1915Ds/i)
2200Wlv-s/i	Smectite-illite composition	PFIT: Wavelength of the continuum removed spectrum calculated using a third-degree polynomial 2150 to 2238 nm, with focus ranging between 2198 and 2220 nm

Appendix 3. Spectral products applied in this study to extract abundance and mineral composition data from N5S Body testimonies.

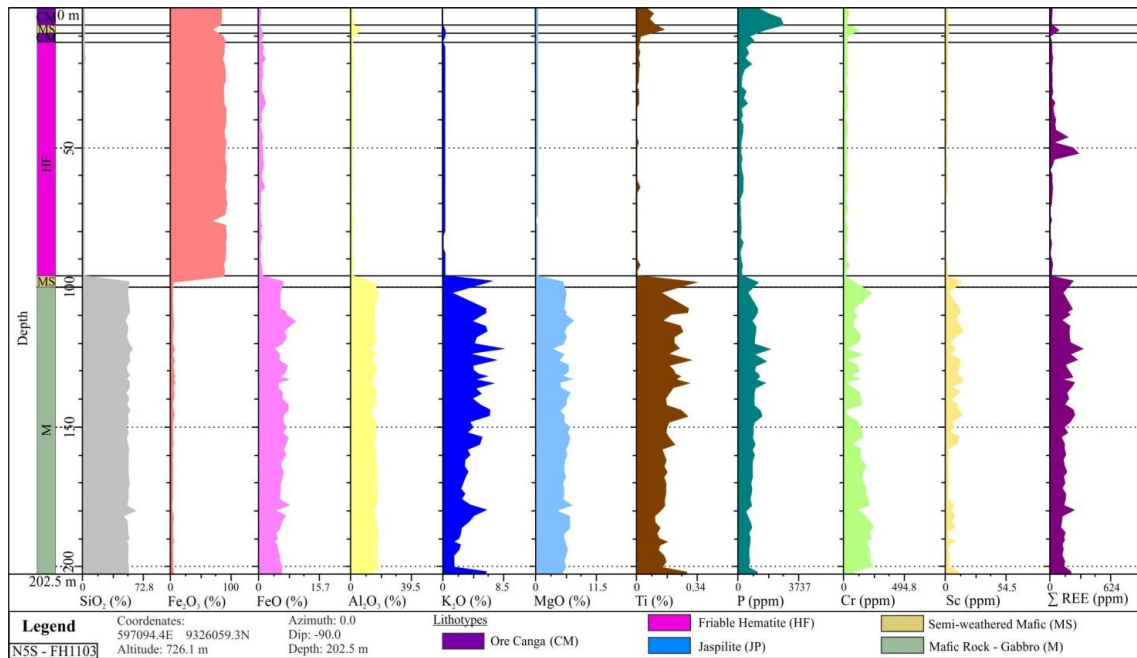
Name	Detected minerals	Base algorithm	Filters/Masks	Correlation trend
Abundance of Fe (hydro-)oxides	Hematite, goethite	900DFe	900Dfe>0.025 600-740SL>1.979 2200Dk>0.1	% Fe ₂ O ₃ = 205.26 x (900DFe) – 7.735 Accuracy: 14.7% Fe ₂ O ₃
Hematite-goethite distribution	Hematite, goethite ratio	9000Wlv-Fe	600-740SL>1.979	
Abundance kaolinite	Kaolinite	2200Dk	2200Dk>0.0129 2164Dk>0.00112 Gibbsite abundance= 0	% Al ₂ O ₃ = 88.253 x (2200Dk) + 7.723 Accuracy: 6.14% Al ₂ O ₃
Kaolinite crystallinity	Kaolinite	2170Ck	2200Dk>0.0129 2164Dk>0.00112 2260Dg<0.012 Gibbsite abundance= 0	
Abundance gibbsite	Gibbsite	2260Dg	2260Dg>0.012 1450Dg>0.0143	% Al ₂ O ₃ = 310.84 x (2260Dg) + 4.659 Accuracy: 9.52% Al ₂ O ₃
Abundance chlorite	Chlorite	2335Dcl	2335Dcl>0.0159 2251Dcl>0.005 2260Dg<0.012 Gibbsite abundance =0	% Fe ₂ O ₃ = -31.291 x (2335Dcl) + 6.772 Accuracy: 12.37% Fe ₂ O ₃
Chlorite composition	Chlorite	2335Wlv-Cl	2335Dcl>0.0159 2251Dcl>0.005 2260Dg<0.012 Gibbsite abundance =0	% MnO = -1.137 x (2335Dcl) + 6.159 Accuracy: 1.26% MnO
Abundance smectite-illite	Smectite, illite	2200Ds/i	2200Ds/i>0.00112 1915Ds/i>0.0241 2200Dk<0.018 2260Dg<0.012 Kaolinite, gibbsite abundance = 0	% Al ₂ O ₃ = 66.54 x (2200Ds/i) + 11.391 Accuracy: 5.39% Al ₂ O ₃
Smectite-illite crystallinity	Smectite, illite	2200Cs/i	2200Ds/i>0.00112 1915Ds/i>0.0241 2200Dk<0.018 2260Dg<0.012 Kaolinite, gibbsite abundance = 0	



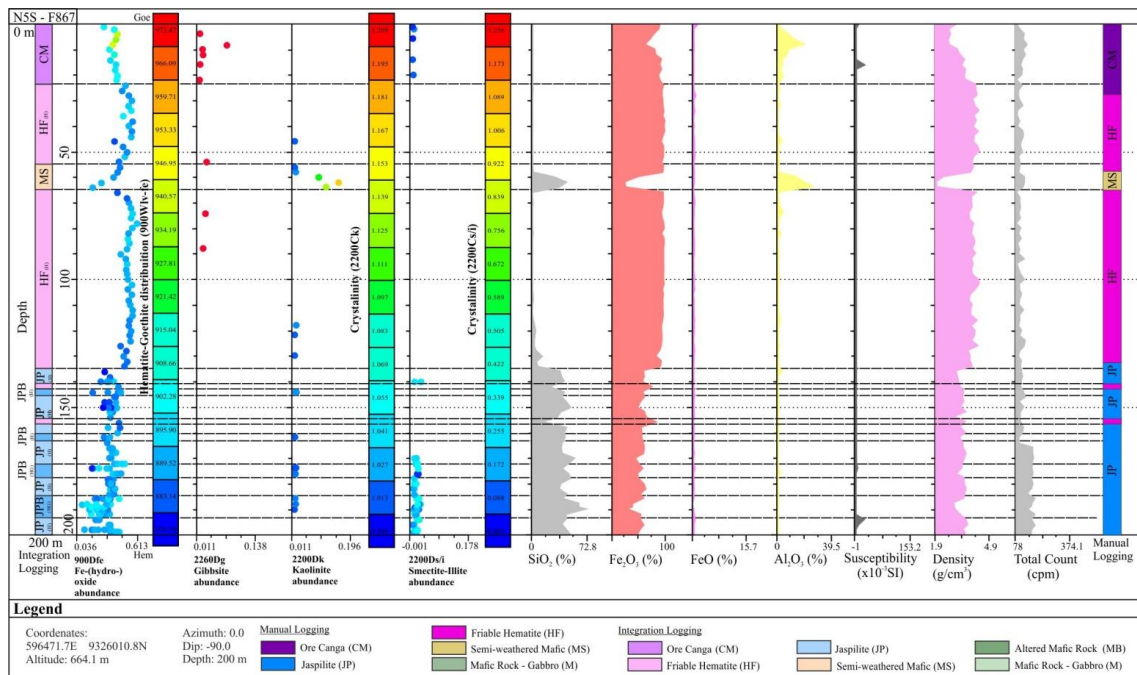
Appendix 4. Scatter plots showing the geochemical variation as a function of the depth of the N5S-F867 hole. The analyzed elements are SiO₂, Fe₂O₃, FeO, Al₂O₃, K₂O, MgO, Ti, P, Cr, Sc and ΣREE (rare earth elements).



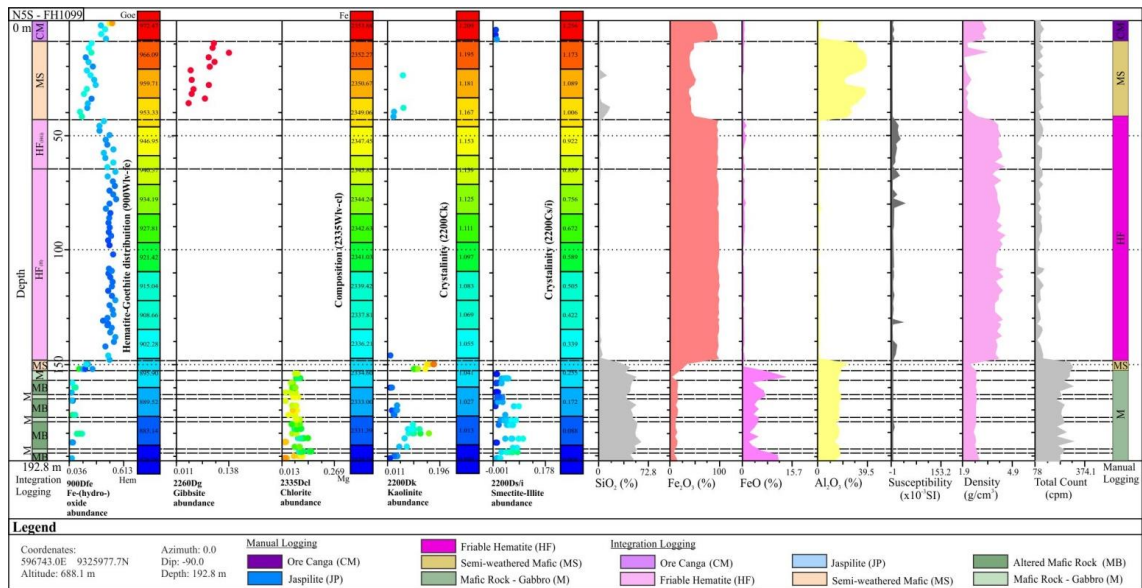
Appendix 5. Scatter plots showing the geochemical variation as a function of the depth of the N5S-FH1099 hole. The analyzed elements are SiO₂, Fe₂O₃, FeO, Al₂O₃, K₂O, MgO, Ti, P, Cr, Sc and ΣREE (rare earth elements).



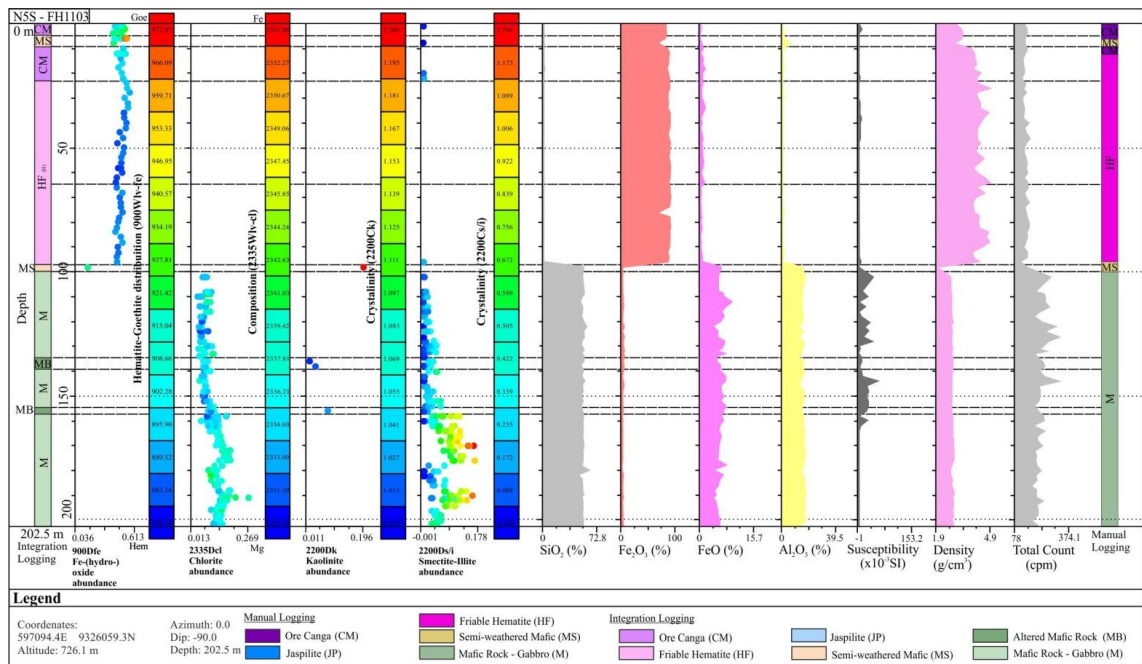
Appendix 6. Scatter plots showing the geochemical variation as a function of the depth of the N5S-FH1103 hole. The analyzed elements are SiO₂, Fe₂O₃, FeO, Al₂O₃, K₂O, MgO, Ti, P, Cr, Sc and ΣREE (rare earth elements).



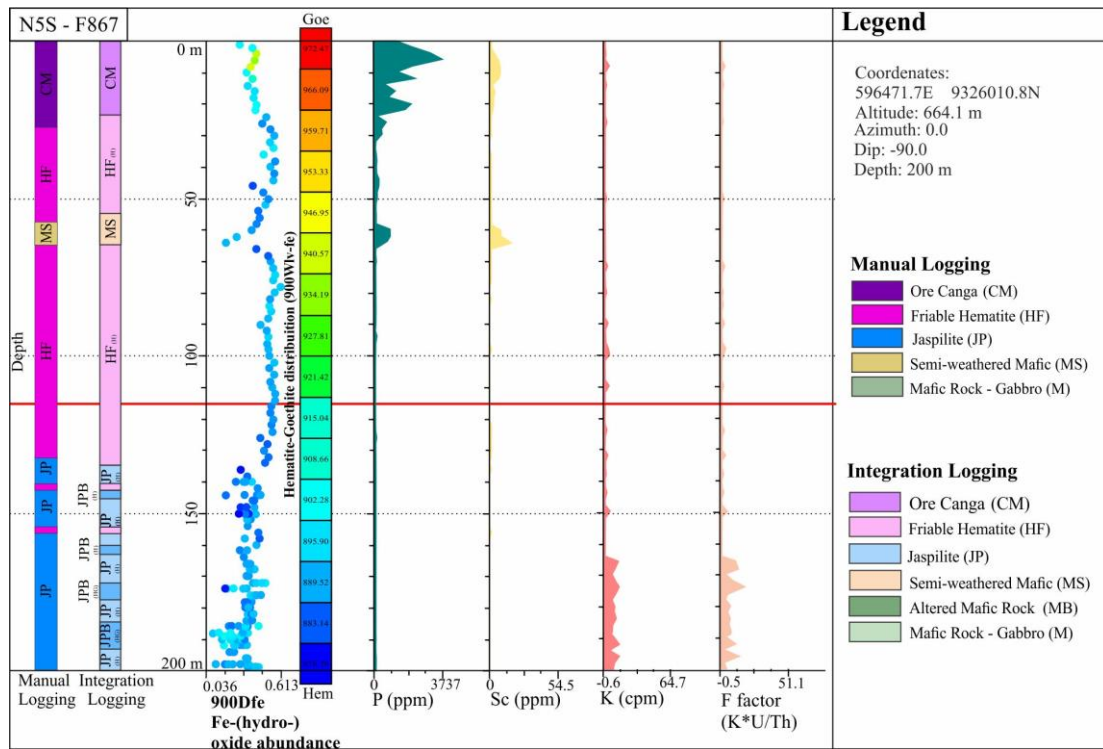
Appendix 7. Scatter plots of reflectance spectrometry data, geochemistry, physical properties of rocks, the petrographic description of the N5S-F867 hole and the interpretation of logging using all depth-integrated data. The color scale in the abundance diagrams of iron (hydro)-oxide and chlorite shows the wavelength in nm of the absorption feature of these minerals. The color scale of the abundance diagram of kaolinite and smectite-illite is colored according to the crystallinity of these minerals. Geochemical variation of SiO₂, Fe₂O₃, FeO and Al₂O₃ elements. Variation of the physical properties of rock with the magnetic susceptibility response, density, gamma spectrometry with the total count.



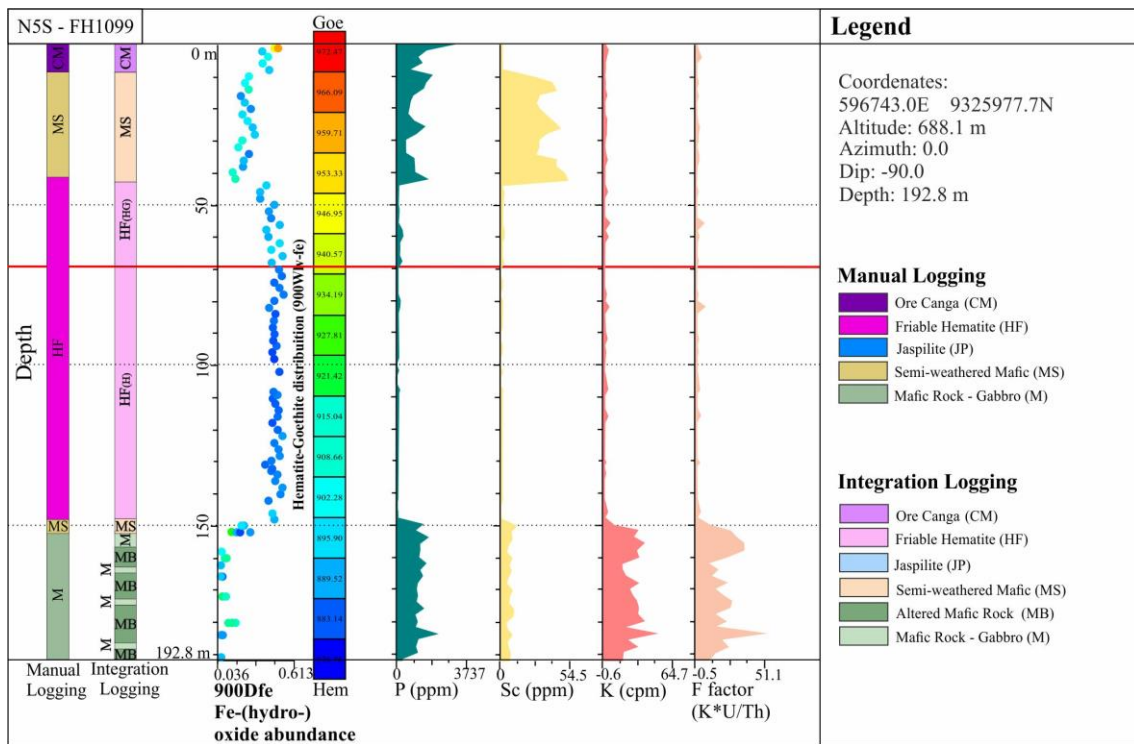
Appendix 8. Scatter plots of the reflectance spectrometry data, geochemistry, physical properties of rocks, the petrographic description of the N5S-FH1099 hole and the interpretation of logging using all the integrated data as a function of depth. The color scale in the abundance diagrams of iron (hydro-)oxide and chlorite shows the wavelength in nm of the absorption feature of these minerals. The color scale of the abundance diagram of kaolinite and smectite-illite is colored according to the crystallinity of these minerals. Geochemical variation of SiO_2 , Fe_2O_3 , FeO and Al_2O_3 elements. Variation of the physical properties of rock with the magnetic susceptibility response, density, gamma spectrometry with the total count.



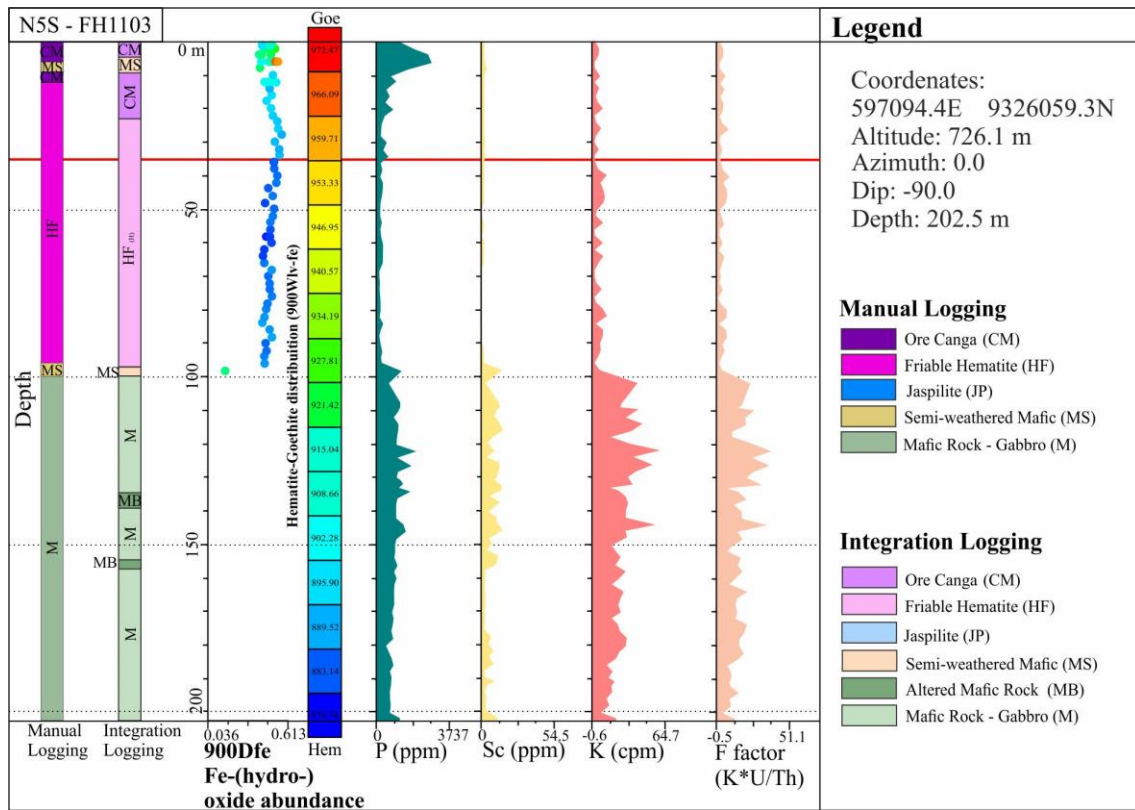
Appendix 9. Scatter plots of reflectance spectrometry data, geochemistry, physical properties of rocks, the petrographic description of the N5S-FH1103 hole and the interpretation of logging using all integrated data as a function of depth. The color scale in the abundance diagrams of iron (hydro-)oxide and chlorite shows the wavelength in nm of the absorption feature of these minerals. The color scale of the abundance diagram of kaolinite and smectite-illite is colored according to the crystallinity of these minerals. Geochemical variation of SiO_2 , Fe_2O_3 , FeO and Al_2O_3 elements. Variation of the physical properties of rock with the magnetic susceptibility response, density, gamma spectrometry with the total count.



Appendix 10. Variation of the hematite-goethite composition in the N5S-F867 hole and correlation with the geological data, the result of the integration, the chemical elements P and Sc and the properties of gamma spectrometry of the potassium channel (K) and factor F. With emphasis on the delimitation at the beginning of the hole of the more goethitic composition.



Appendix 11. Variation of the hematite-goethite composition in the N5S-FH1099 hole and correlation with the geological data, the result of the integration, the chemical elements P and Sc and the properties of gamma spectrometry of the potassium channel (K) and factor F. With emphasis on the delimitation at the beginning of the hole of the more goethitic composition.



Appendix 12. Variation of the hematite-goethite composition in the N5S-FH1103 hole and correlation with the geological data, the result of integration, the chemical elements P and Sc and the properties of gamma spectrometry of the potassium channel (K) and factor F, With emphasis on the delimitation at the beginning of the hole of the more goethitic composition.

CAPÍTULO III – DISCUSSÃO

CAPÍTULO III – DISCUSSÃO

Diferentes respostas são observadas entre os dados coletados no corpo N5S e N4WS. Para a espectrometria de reflectância a principal diferença seria a composição mineralógica das regiões brechadas e das vênulas das regiões citadas. O corpo N4WS apresenta alterações de contato normal, com a formação de talco e carbonato, enquanto no N5S tem-se alterações de carácter intrusivo, somente com a presença de quartzo. Prado *et al.* (2016) subdividiu os litotipos em domínios de acordo com a composição mineralógica obtida pela espectrometria de reflectância, sendo seguida a metodologia neste trabalho. Uma relação observada no N4WS seria que as regiões com maiores valores de susceptibilidade magnética (0,75SI) estão relacionadas com o domínio de presença de carbonato e talco, porém a espectroscopia de reflectância não mostra um aumento de abundância de (hidro-)óxido e ferro nessas regiões, como proposto por Lobato *et al* (2005b) e Rosière *et al* (2006) para zonas brechadas. Nos domínios de hematita (H) e hematita-goethita (HG) os valores de susceptibilidade são baixos tanto no N4WS, quanto no N5S demonstrando a alteração dos "porphirotopes" de magnetita em hematita e a perda da magnetização. Como no N5S os furos de sondagem não demonstram o domínio de talco e carbonato, os valores de susceptibilidade magnética na região são baixos, podendo indicar que o fluido que atingiu o N4WS não atingiu o corpo N5S ou que provavelmente os furos estudados não atingiram este domínio.

Outra diferença espectrométrica e geoquímica observada entre o N4WS e o N5S é a composição da clorita, que é mais férrica (Mg-chamosita) no N4WS e mais magnésiana (Fe-clinocloro) no N5S, seguindo a resposta observada no perfil, já que o corpo N4WS se encontra mais a oeste que o corpo N5S e muito distante.

O corpo N4WS apresenta valores médios de contagem total, potássio, urânio e tório (Tabela I.8) maiores que do corpo N5S (Tabela II.4), com exceção para a rocha máfica que apresenta valores médios de potássio mais elevados. Isto pode indicar a diferença composicional original entre os basaltos do N4WS e os gabros do N5S ou uma maior potassificação nos gabros. As análises geoquímicas demonstraram que os teores de K₂O nos basaltos do corpo N4WS variam entre 1,23 e 2,81%, e dos gabros do corpo N5S varia entre 1,13% e 8,39%, confirmando os dados obtidos na gamespectrometria.

A densidade encontrada para a canga de minério (CM), o jaspilito (JP) e a rocha máfica (M) dos corpos mineralizados N5S e N4WS, apresentam valores médios próximos com exceção para o hematitito friável (HF) e para a máfica semi-decomposta (MS), que demonstram uma variação média de valores de aproximadamente 0,3 g/cm³ maior no corpo N5S (Tabela III.1). A diferença de densidade do hematitito friável (HF) pode ser explicada pela maior lixiviação da sílica que

promoveu a concentração de óxidos. Além disso, essa diferença pode ser resultado da metodologia aplicada para a correção da densidade do pentapicnômetro, uma vez que se considera um valor médio de saturação (50%). Caso as rochas *in situ* apresentem menor saturação dos poros por água, os valores obtidos de densidade serão maiores após a correção. Considerando esses fatos se conclui que houve uma maior lixiviação da sílica ou a rocha *in situ* apresenta menor saturação dos poros no corpo N5S. No grupo das rochas máficas semi-decompostas (MS) não houve a diferenciação entre os níveis de alteração, devido a isto, ocorre a variação da densidade conforme o número de amostras mais decompostas, ou seja, quanto maior o número de amostras muito decompostas, menor a média da densidade. Seguindo esta análise conclui-se que as rochas máficas semi-decompostas do corpo N4WS se encontram mais intemperizadas e a presença de talco descrita por Prado *et al.* (2016) corrobora para essa interpretação.

Tabela III.1. Densidade média dos litotipos dos corpos N4WS e N5S.

Litotipo	Densidade média	
	N4WS (g/cm ³)	N5S (g/cm ³)
CM	3,17	3,27
HF	3,84	4,14
JP	3,40	3,40
MS	2,03	2,29
M	2,70	2,74

CAPÍTULO IV – CONCLUSÕES

CAPÍTULO IV – CONCLUSÕES

A elaboração do perfil geológico a partir da descrição dos testemunhos de sondagem e da petrografia dos diferentes litotipos, forneceu subsídios para a integração dos dados e auxiliou na análise dos resultados encontrados em cada fase deste estudo.

A análise do perfil geoquímico dos furos de sondagem identificou os elementos que diferenciam cada litotipo e auxiliou na delimitação dos domínios de zonas brechadas durante a integração dos dados. Além disso, esses resultados estão de acordo com os dados espectrorradiométricos e de propriedades físicas de rochas (gamaespectrometria, susceptibilidade magnética, densidade).

Os algoritmos obtidos na espectrometria de reflectância possibilitam a identificação de minerais secundários tais como caolinita, esmectita-illita e gibbsita, não reconhecidos na análise petrográfica demonstrando que o método é eficaz para caracterizar e avaliar a distribuição da mineralogia de um depósito de ferro. A análise dos parâmetros obtidos pelos algoritmos possibilitou a diferenciação dos diversos litotipos e permitiu o detalhamento das seguintes zonas: diferenciação entre as zonas com predomínio de hematita e zonas com predomínio de goethita no jaspilito e hematitito friável; identificação e diferenciação de zonas com diferentes composições de clorita nos gabros; na identificação da cristalinidade da esmectita-illita e sua distribuição nos furos de sondagem e no perfil geológico. Os parâmetros de abundância mineral obtidos neste trabalho mostram que este método pode ser de grande utilidade para uma estimativa rápida do conteúdo de ferro e de alguns minerais relacionados ao depósito. Isto auxilia na identificação de contaminantes, como argilominerais, o que facilita o beneficiamento do minério.

As propriedades físicas, gamaespectrometria e susceptibilidade magnética, não forneceram muitas informações para a análise integrada, apresentando apenas resultados individuais satisfatórios para o corpo N5S. A gamaespectrometria foi importante para diferenciar as unidades geológicas, como a Formação Carajás e o gabro. A baixa susceptibilidade magnética foi comprovada na petrografia como resultado da alteração da magnetita e sua desmagnetização. O melhor dado de propriedade física de rocha analisado foi o da densidade que demonstrou diferença entre os litotipos e variação nas zonas alteração, auxiliando tanto na integração de dados quanto na inversão geofísica.

A avaliação sumária dos produtos aéreos de gravimetria gradiométrica, magnetometria e gamaespectrometria janelados foi útil para identificar e caracterizar o depósito N5S. A aerogravimetria gradiométrica se mostrou útil para a delimitação da Formação Carajás, além de definir a estrutura sinformal da área e lineamentos não descritos na geologia e na

aeromagnetometria. A magnetometria aérea apresenta anomalias magnéticas coincidentes com o protominério. O minério de ferro é composto essencialmente por hematita, mineral não magnético e, portanto, não responde de forma efetiva ao método aplicado. As feições magnéticas observadas são associadas ao jaspilito, sendo a magnetometria uma ferramenta apropriada para a prospecção indireta do minério de ferro. A aeromagnetometria também forneceu dados para a delimitação de lineamentos em profundidade e superficiais. A aerogamaespectrometria se mostrou uma ferramenta eficiente na definição das diferentes unidades geológicas da região. Nas imagens ternárias foi possível individualizar as formações ferríferas aflorantes, a partir da assinatura de baixos teores dos radioelementos K, eTh e eU, e os resultados mostram uma alta correlação com os afloramentos mapeados anteriormente. O mapa litogeofísico gerado para N5S permitiu concluir que é possível identificar as formações ferríferas e as encaixantes através da classificação não supervisionada por domínios gamaespectrométricos. O modelo apresentado pode ser utilizado tanto na fase inicial de prospecção, fornecendo informações acerca do padrão de resposta dos produtos aéreos, como também na continuidade e avanço da mina.

A inversão dos dados de FTG recuperou corpos densos compatíveis com o pacote mineralizado e individualizou a formação ferrífera das encaixantes, além de demonstrar uma integração inicial da aerogeofísica com a densidade medida nos furos de sondagem. Com os resultados acima é possível dizer que o modelo geofísico de densidade se apresenta condizente com o modelo geológico, podendo ser utilizado como parâmetro exploratório.

A análise individual de cada técnica aplicada nesta dissertação proporcionou resultados satisfatórios, porém cada uma possui um limite aceitável de resultados. A integração desses dados ultrapassa esse limite, auxiliando nas características de cada litotipo e regiões de alteração hidrotermal e de anomalias interessantes. A integração possibilitou criar uma assinatura geoquímica e geofísica dos litotipos encontrados nos furos do corpo N5S. Com a associação das ferramentas discutidas neste trabalho, acredita-se que seja possível auxiliar a tomada de decisão e direcionar os trabalhos exploratórios, para o melhor aproveitamento dos recursos humanos e financeiros.

A representação dos resultados da mistura da esmectita-illita, da clorita, do (hidro-)óxido de ferro e do *logging* de integração dos dados em perfil possibilitou diferenciar regiões com diferentes composições e características no N5S. A cristalinidade da mistura da esmectita-illita (2200Cs/i) indicou que a região leste do perfil estava mais aquecida e provavelmente mais próxima de sua fonte. A composição da clorita (2335Dcl) mostra uma composição mais magnésiana a leste e mais férrica a oeste, demonstrando que a composição Mg-clorita está relacionada com a illita/esmectita. A abundância de (hidro-)óxido de ferro (900Dfe) apresenta nos gabros uma relação maior com a

impregnação do ferro nas rochas, do que com a presença de grãos de magnetita e hematita, mostrando uma limitação técnica do aparelho. A detecção de (hidro-)óxido de ferro indicou que os furos a oeste possuem uma maior impregnação de (hidro-)óxido ferro, provavelmente demonstrando que o perfil de alteração supergênica é mais profundo nesta região do que a leste do perfil. A composição mais goethítica está relacionada principalmente com a alteração supergênica. Os furos a oeste do perfil (N5S-F867 e N5S-FH1099) apresentam espessuras e quantidades de zonas de alteração maiores do que os furos a leste (N5S-F871 e N5S-FH1103) (Figura II.4). A diferenciação detalhada entre os litotipos representa a eficiência da integração e aplicação dos métodos utilizados nesse trabalho.

As diferentes respostas entre os dados coletados no corpo N5S e N4WS corroboraram com as observações feitas nos perfis do corpo N5S. A diferença de composição mineralógica obtida na espectrometria de reflectância das regiões brechadas e das vênulas das regiões citados, mostram que o corpo N4WS apresenta alterações com a formação de talco e carbonato, enquanto no N5S tem-se somente a presença de quartzo. A correlação dos valores de susceptibilidade magnética com os domínios com presença de carbonato e talco no corpo N4WS, sem aumento da abundância de (hidro-)óxido de ferro (Prado *et al.*, 2016). No N5S os furos de sondagem não demonstram o domínio de carbonato e talco, isto pode indicar que o processo de alteração que afetou o corpo N4WS não atingiu o corpo N5S ou que os furos estudados não atingiram a profundidade necessária para interceptar este domínio. Outra diferença espectrométrica e geoquímica observada é a composição da clorita, que é mais férrica (Mg-chamosita) no N4WS e mais magnésiana (Fe-clinocloro) no N5S. Os valores médios de contagem total, potássio, urânio e tório maiores no corpo N4WS indicam a diferença composicional original entre os basaltos do N4WS e os gabros do N5S.

CAPÍTULO V – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO V – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, J.B., and Filice, A.L., 1967, Spectral reflectance 0.4 to 2.0 microns of silicate rock powders: *Journal of Geophysical Research*, v. 72, p. 5705–5715.
- ALS Schedule of Services and Fees, 2017 (<https://www.alsglobal.com/-/media/als/resources/services-and-products/geochemistry/fee-schedules/als-geochemistry-fee-schedule-usd.pdf>).
- Araújo, O.J.B., and Maia R.G.N. 1991. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás: Subprojeto Recursos Minerais, Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. Brasília, DNPM/Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais-CPRM, 152 p.
- Araújo, O. J. B., Maia, R. G. N., Jorge João, X. S., and Costa, J. B. S., 1988, A megaestrutura arqueana da Folha Serra dos Carajás: *Anais do Congresso Latino-Americano de Geologia*, v. 7, p. 324-338.
- Archibald, N.J., Gow P., and Boschetti F., 1998, Multiscale edge analysis of potential field data: *Exploration Geophysics*, v.30, p.38-44.
- Assis, L.M., 2013, Geração de modelo exploratório para o minério de ferro da Província Mineral de Carajás através da integração de dados multifonte: Unpublished M.Sc. thesis, Brasília, Brazil, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 154p.
- Básilio, M.S., 2005, Geoquímica dos sedimentos associados aos minérios de ferro da região leste-sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG e seu potencial para adsorção e dessorção de metais traço: Unpublished Ph.D thesis, Ouro Preto, Brazil, Universidade Federal de Ouro Preto, 230p.
- Beaufort, D., Patrier, P., Laverret, E., Bruneton, P., and Mondy, J., 2005, Clay alteration associated with Proterozoic unconformity-type uranium deposits in the East Alligator River uranium field (Northern Territory, Australia): *Economic Geology*, v. 100, n. 3, p. 515–536.
- Beisiegel, V.R., 1982, Distrito ferrífero da Serra dos Carajás: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, Belém, Annals, v. 1, p. 21–46.
- Beisiegel, V.R., Bernardelli, A.L., Drummond, N.F., Ruff, A.W., and Tremaine, J.W., 1973, Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 3, p. 215-242.
- Beukes, N.J., Gutzmer, J., and Mukhopadhyay, J., 2002, The geology and genesis of high-grade hematite iron ore deposits: *Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series*, v.7, p. 23-29.

- Boyle, R.W., 1982, Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits: Developments in Economic Geology, v. 16, p. 71-78.
- 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): Unpublished Ph.D. thesis, Rio de Janeiro, Brazil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 271p.
- Bubner, G., Dentith, M., Dhu T., and Hillis, R., 2003, Geophysical exploration for iron ore in the Middleback Ranges, South Australia: Geophysical Signatures of South Australian Mineral Deposits, p. 29-46.
- Clark, D.A., 1997, Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys: Australian Geological Survey Organization in Journal of Australian Geology and Geophysics, v. 17 (2), p. 83-103.
- Clark, R.N., and Roush, T.L., 1984, Reflectance spectroscopy quantitative analysis techniques for remote sensing applications: Journal of Geophysical Research, v. 89, p. 6329–6340.
- Cudahy, T., and Ramanaidou, E.R., 1997, Measurement of the hematite:goethite ratio using field visible and near-infrared reflectance spectrometry in channel iron deposits, Western Australia: Aust. J. Earth Sci., v. 44, p. 411–420.
- Dalstra, H. and Guedes, S. 2004, Giant hydrothermal hematite deposits with Mg-Fe metasomatism: A comparison of the Carajás, Hamersley, and other iron ores: Economic Geology, v. 99, p. 1793-1800.
- Dalstra, H., and Flis, M., 2008, High-grade iron ore exploration in an increasingly steel-hungry world: The past, current and future role of exploration models and technological advances: Reviews in Economic Geology, v. 15, p. 393-409.
- Dardenne, M.A., and Schobbenhaus, C., 2001, Metalogênese do Brasil: Brasília, Editora Universidade de Brasília, 392 p.
- Dentith, M., and Mudge, T.S., 2014, Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist: London, Cambridge University Press, 454p.
- DNPM, 2014, Sumário Mineral 2014: Brasília, Brasil, Departamento Nacional de Produção Mineral, v.33, 137p.
- Docegeo, 1988, Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás: Proceedings of Congresso Brasileiro de Geologia, 35th, Belém, Brazil, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 11-54.

- Ducart, D. F., Crósta, A. P., Souza Filho, C. R., and Coniglio, J., 2006, Alteration Mineralogy at the Cerro La Mina Epithermal Prospect, Patagonia, Argentina: Field Mapping, Short Wave Infrared Spectroscopy, and ASTER Images: *Economic Geology*, v. 101, p. 981–996.
- Ferreira, V.M., 2014, Caracterização de formações ferríferas bandadas através de dados de propriedades físicas de rocha e sua integração com dados aerogeofísicos: o estudo de caso do corpo N4WS, Serra Norte – Província Mineral de Carajás: Unpublished M.Sc. thesis, Brasília, Brazil, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 204p.
- Figueiredo e Silva, R. C., 2004, Caracterização petrográfica e geoquímica de jaspilitos e minérios de ferro dos depósitos N1, N4W, N4E e N5E, Província Mineral Carajás, Pará: implicações para a mineralização de ferro: M.Sc. thesis, Belo Horizonte, Brasil, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 155.
- Figueiredo e Silva, R.C., 2009, Evolução e gênese do minério de ferro hidrotermal nos depósitos da Serra Norte, Província Mineral Carajás: Unpublished Ph.D. thesis, Belo Horizonte, Brazil, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, 236 p.
- Flis, M., 2008, Advances in Geophysics Applied to the Search for Banded Iron Formation-Related, High-Grade Hematite Iron Ore: *Reviews in Economic Geology*, v. 15, p. 381-392.
- FritzGerald, D and Paterson, R., 2013, Getting the best value from gravity gradiometry: Society of Exploration Geophysicist Annual Meeting, Houston, Extended Abstracts, p. 1-4.
- Gibbs, A.K., Wirth, K.R., Hirata, W.K., and Olszewski, W.S., 1986, Age and composition of the Grão Pará group volcanics, Serra dos Carajás: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16(2), p. 201-211.
- GMEX, 2008, Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration, Epithermal Alteration Systems: AusSpec International Ltd., Edition 3, 59 p.
- Gomes, C.B, 2007, Geologia USP - 50 ANOS: Editora da Universidade de São, Instituto de Geociências, 544 p.
- Gouvêa, L.J., and Da Costa e Silva M., 1995, Geofísica de prospecção: Belém, EDUFPA, 311p.
- Gross, G.A., 1980, A classification of iron-formation based on depositional environments: *Canadian Mineralogist*, v. 18, p. 215–222.
- Guedes, S.G., 2000, Evidências de alteração hidrotermal na formação ferrífera bandada e minérios de ferro de N4, N5 e Serra Leste, Serra dos Carajás-Pará, Brasil: Unpublished Ph.D. thesis qualification, Belo Horizonte, Brazil, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, 61p.

- Guedes, S.G., Rosière, C.A., Barley, M., and Lobato, L.M., 2002, The importance of carbonate alteration associated with the Carajás high-grade hematite deposits, Brazil: Melbourne, Australia, Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series 7, p. 63–66.
- Haest, M., Cudahy T., Laukamp, C. and Gregory ,S., 2012, Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. I. Validation of mineral abundance and composition scripts at the Rocklea Dome channel iron deposit in Western Australia: *Economic Geology*, v. 107, p. 209 – 228.
- Haest, M., Cudahy, T., Laukamp, C., and Gregory, S., 2012, Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. II. Three-dimensional mineralogical characterization of the Rocklea channel iron deposit, Western Australia: *Economic Geology*, v. 107, p. 229 – 249.
- Hey, M.H., 1954, A new review of the chlorites: *Mineralog Magazine*, v.30, p.277-292.
- Hinze, P.W.J., Von Frese, R.R.B., and Saad, A.H., 2013, *Gravity and Magnetic Exploration-Principles, Practices, and Applications*: London, Cambridge University Press, 502p.
- Hunt, G.R., 1977, Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared: *Geophysics*, v. 42, p. 501–513.
- IAEA, International Atomic Energy Agency, 2003, *Guidelines for radioelement using gamma ray spectrometry data*, Viena, 173p.
- Justo, A. P., 2014, Programa Geologia do Brasil - PGB Serra dos Carajás - SB.22-Z-A-II Estado do Pará - Carta Geológica: CPRM, 2014, Belém, Scale 1:100.000.
- Killeen, P.G., 1979, Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration – application and interpretation: in P.J. Hood, ed., *Geophysics and Geochemistry in Search for Metallic Ores*: Geological Survey of Canada, *Economic Geology Report*, v. 31, p. 163-230.
- Laakso, K., Peter, J. M., Rivard, B., and White, H. P., 2016, Short-Wave Infrared Spectral and Geochemical Characteristics of Hydrothermal Alteration at the Archean Izok Lake Zn-Cu-Pb-Ag Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Nunavut, Canada: *Application in Exploration Target Vectoring*: *Economic Geology*, v. 111, n. 5, p. 1223 – 1239.
- Li, Y., 2001, 3D inversion of gravity gradiometry data: Expanded Abstract, 71th Annual International Meeting of Society of Exploration Geophysics, Tulsa, v.20, p.1470–1474.
- Lobato, L.M., Rosière, C.A., Silva, R.C.F., Zucchetti. M., Baars, F.J., Seoane, J.C.S., Rios, F.J., Pimentel, M., Mendes, G.E., and Monteiro, A.M., 2005a, A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogénica da

- província, in Marini, O. J., Queiroz, E. T., Ramos, B. W., Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia: DNPM/CTMineral/FINEP/ADIMB, Brasília, p. 25-92.
- Lobato, L. M., Figueiredo e Silva, R. C., Rosière, C. A., Zucchetti, M., Baars, F. J., Pimentel, M. M., Rios, F. J., Seoane, J. C. S., and Monteiro, A. M., 2005b, Hydrothermal origin for the iron mineralization, Carajás Province, Pará state, Brazil: Iron Ore 2005, The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series v. 8, Australia, p. 99-110.
- Lovborg, L., and Mose, E., 1987, Counting statistics in radioelement assaying with a portable spectrometer: Geophysics, v. 52, n. 4, p. 555-563.
- Macambira, J. B., 1992, Os possíveis microfósseis da Formação Carajás – Pará, in Congresso Brasileiro de Geologia, 37th, São Paulo, Brazil, 1992, v. 2., p. 483-484.
- Macambira, J.B., 2003, O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. Unpublished Ph.D thesis, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 217p.
- Macambira, J.B., and Silva, V.F., 1995, Estudo petrológico, mineralógico e caracterização das estruturas sedimentares e diagenéticas preservadas na Formação Carajás, Estado do Pará: Boletim Museu Para, Emílio Goeldi, Série Ciência da Terra, v. 7, p. 363-387.
- Macambira, J.B., Ramos, J.F.F., Assis, J.F.P., and Figueiras, A.J.M., 1990, Projetos Serra Norte e Pojuca, Relatório final: Convênio DNPM/DOCEGEO/UFPA, Belém.
- Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh, T.E., and Lindenmayer, D., 1991, U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil: Precambrian Research, v. 49, p. 329-354.
- Meirelles, M.R., 1986, Geoquímica e petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás, Pará: Unpublished M.Sc. thesis, Brasília, Brasil, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 171p.
- Morris, R.V., Lauer, H.V., Lawson, C.A., Gibson, E.K., Nace, G.A., and Stewart, C., 1985, Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite (α Fe₂O₃), maghemite (γ Fe₂O₃), magnetite (Fe₃O₄), goethite (α FeOOH) and lepidocrocite (γ FeOOH): Journal of Geophysical Research Solid Earth and Planets, v. 90, p. 3126–3144.
- Murphy, R. J. and Monteiro, S. T., 2013, Mapping the distribution of ferric iron minerals on a vertical mine face using derivative analysis of hyperspectral imagery (430-970 nm): ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v.75, p. 29-39.

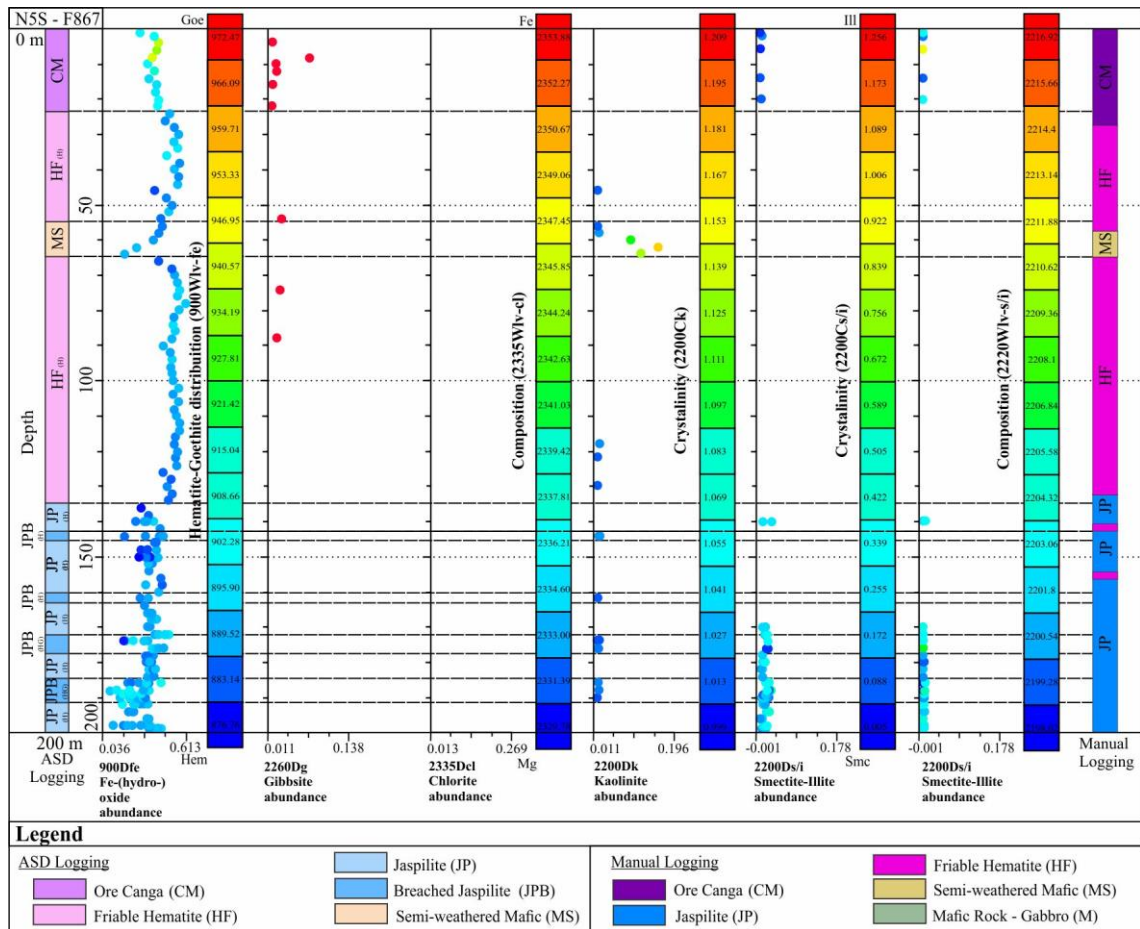
- Oldenburg, D.W., and Li.Y, 2007, Inversion for Applied Geophysics: A Tutorial, EOS, Vancouver, Canadá, 85p.
- Oliveira, J.R., Silva Neto, C.S., and Costa, E.J.S. 1994, Serra Pelada; folha SB.22.X.C. Estado do Pará, escala 1:250.000, in Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 220 p.
- Olszewski, W. J., Wirth, K. R., Gibbs, A. K., and Gaudette, H. E., 1989, The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks. Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting: *Precambrian Research*, v. 42, p. 229-254.
- Pereira, W. R., Carlos, D. U., Braga, M. A. S., Galbiatti, H. F., 2016, Evaluation of gamma-gamma well logging data applied to iron ore exploration – Vale geophysical well logging test facility: *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 34, n. 2.
- Prado, E.M.G., Silva A.M., Ducart D.F., Toledo C.L.B., and Assis L.M. 2016, Reflectance spectroradiometry applied to a semi-quantitative analysis of the mineralogy of the N4ws deposit, Carajás Mineral Province, Pará, Brazil: *Ore Geology Reviews*, v. 78, p. 101-119.
- Ramanaidou, E., Wells, M., Belton, D., Verrall, M., and Ryan, C., 2008, Mineralogical and Microchemical Methods for the Characterization of High-Grade Banded Iron Formation-Derived Iron Ore: *Reviews of Economic Geology*, v.15, p. 129-156.
- Resende, N.P., and Barbosa, A.L.M., 1972, Relatório de pesquisa de minério de ferro, distrito ferrífero da Serra dos Carajás, estado do Pará: AMZA, final report of research, v. 1, 248 p., v. 2, maps and geological profile, 119p.
- Rosière, C.A., Seoane, J.C.S., Baars, F.J., and Lobato, L.M., 2004, Estruturação da província de Carajás e sua influência na mineralização de ferro, PA: ADIMB, Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, Ouro Preto, CD-ROM.
- Rosière, C. A., Baars, F. J., Seoane, J. C. ., Lobato, L. M., da Silva, L. L., De Souza, S. R. C., and Mendes, G. E., 2006, Structure and iron mineralisation of the Carajás province: *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, v. 115, p.126–136.
- Sherman, D.M., Burns, R.G., and Burns, V.M., 1982. Spectral characteristics of the iron oxides with application to the Martian Bright region mineralogy: *Journal of Geophysical Research*, v. 87, p. 169–180.

- Silva, S. M. P., 2009, Espectrometria de imageamento e gamaespectrometria aérea e terrestre de pegmatitos e granitos da porção sul da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), nordeste do Brasil: Unpublished Ph.D. thesis, Campinas, Brazil, Universidade Estadual de Campinas, 173p.
- Singh, M., Singhal, J., Prasad, K. A., Rajesh, V. J., Ray, D., and Sahoo, P., 2016, Spectral characteristics of banded iron formation in Singhbhum craton, eastern India: Implications for hematite deposits on Mars: *Geoscience Frontiers*, v.7, p. 927-936.
- Souza, J.P.G., Silva, A. M., Toledo, C. L. B., and Assis, L.M., 2016, Inversão de dados FTG e magnetometria do depósito N4WS utilizando dados petrofísicos coletados nos testemunhos de sondagem. – Carajás – Brasil: Simpósio Brasileiro de Geofísica, 7th, Ouro Preto, Brazil, Extended Abstracts.
- Spier, C.A., Oliveira, S.M.B., Sial, A.N. and Rios F.J., 2006, Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: *Precambrian Research*, v.152, p. 170 – 206.
- Tassinari, C.C.G., 1996, O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos: Unpublished Ph.D thesis, São Paulo, Brazil, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 139p.
- Tavares, F. M., 2014. Programa Geologia do Brasil – PGB, Rio Verde - SB.22-Z-A-III, Estado do Pará - Carta Geológica. Belém: CPRM, 2014, Scale 1:100.000
- Tavares, F.M., 2015, Evolução geotectônica do nordeste da Província Carajás: Unpublished Ph.D. thesis, Rio de Janeiro, Brasil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 115p.
- Thompson, A.J.B., Hauff, P.L., and Robitaille, A.J., 1999, Alteration Mapping in Exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy: *SEG Newsletter*, n. 39, p. 15 – 27.
- Tolbert, G.E., Tremaine, J.W., Melcher, G.C., and Gomes, C.B., 1971, The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil: *Economic Geology*, v. 7, p. 985-994.
- Trendall, A.F., Basei, M.A.S., de Laeter, J.R., and Nelson, D.R., 1998, Ion microprobe zircon, U-Pb results from the Carajás area of the Amazon Craton: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 11, p. 265–276.

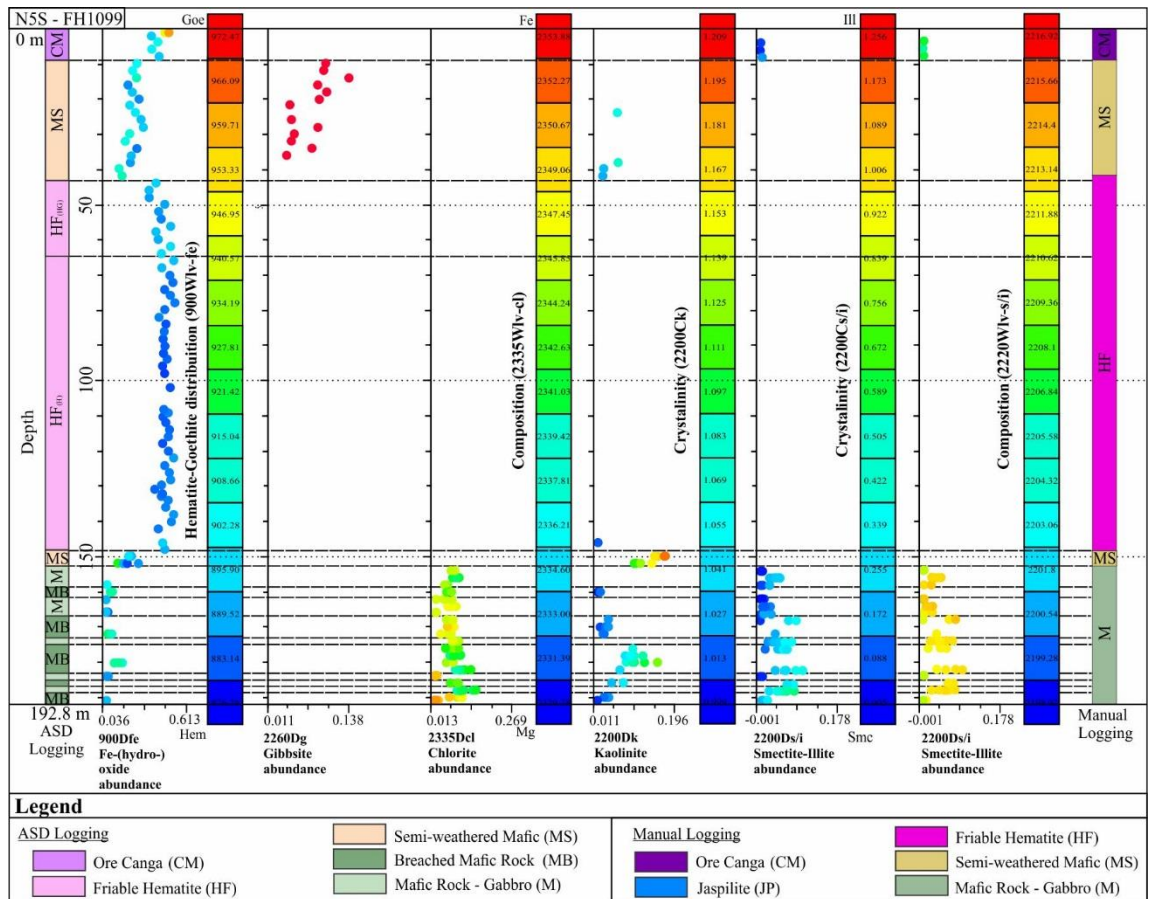
- Vale S.A., 2015, Relatório de produção do segundo trimestre (<http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/conheca-nossos-resultados-operacionais-segundo-trimestre-2015.aspx>)
- Van der Meer, F., 2004. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery: *International Journal of Earth Observation and Geoinformation Science*, v. 5 (1), p. 55– 68.
- Vasquez M.L., Rosa Costa L.T., Silva C.M.G., Klein E.L., 2008. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Organizadores, Marcelo Lacerda Vasquez, Lúcia Travassos da Rosa-Costa. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM, 2008.
- Wirth, K.R., Gibbs, A.K., and Olzewski, Jr., W.J., 1986, U-Pb zircon ages of the Grão Pará Group and Serra dos Carajás granite: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, p. 195–200.
- Wu, Y., and Shi, Y.T., 2014, Visual C++ Call MATLAB Multi-Scale Edge Detection: *Applied Mechanics and Materials*, v. 631-632, p. 598-601.
- Zacchi, E. N. P., Silva, A. M., Rolim, V. K., 2010, Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG: *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28, p. 643-656.
- Zucchetti M. 2007. Rochas máficas do Supergrupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, (PA): Unpublished Ph.D. thesis, Belo Horizonte, Brazil, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geologia, 125p.

CAPÍTULO VI – APÊNDICES

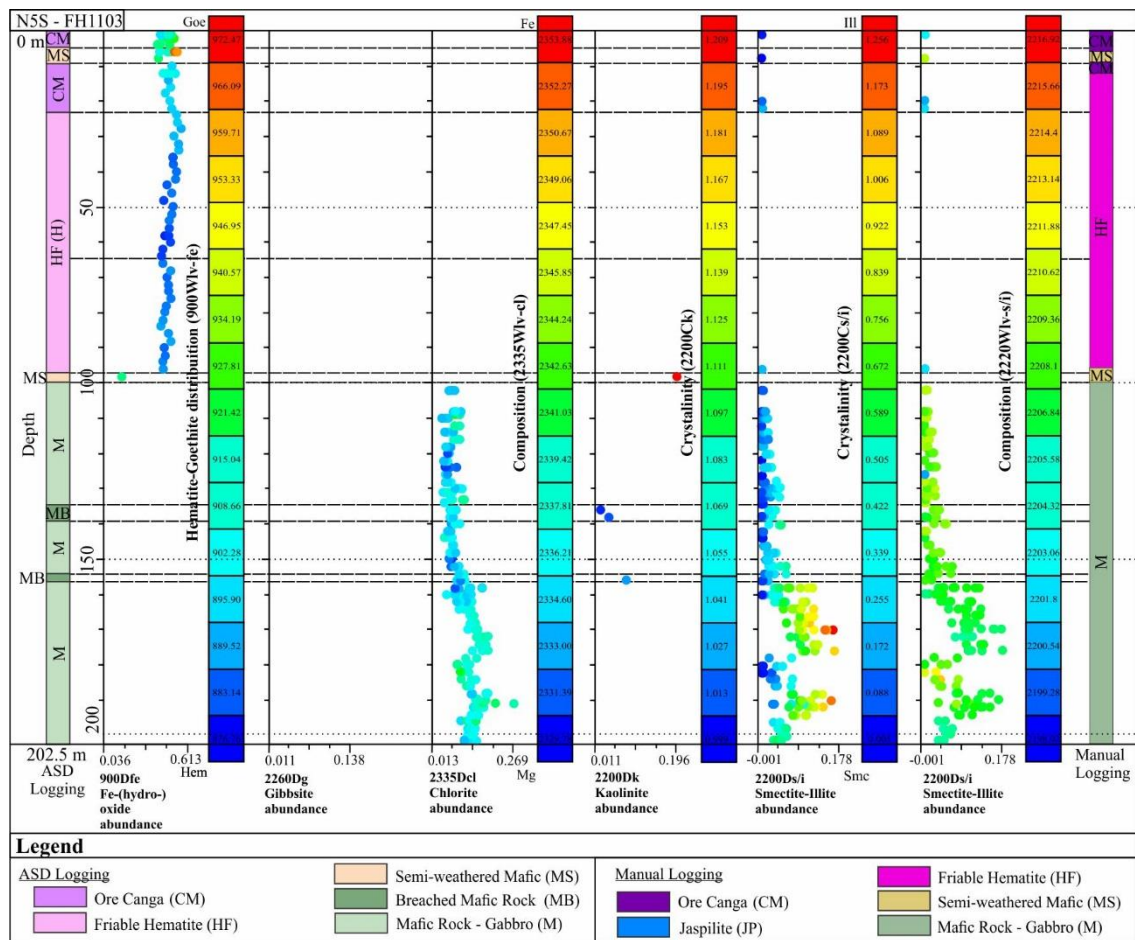
CAPÍTULO VI – APÊNDICES



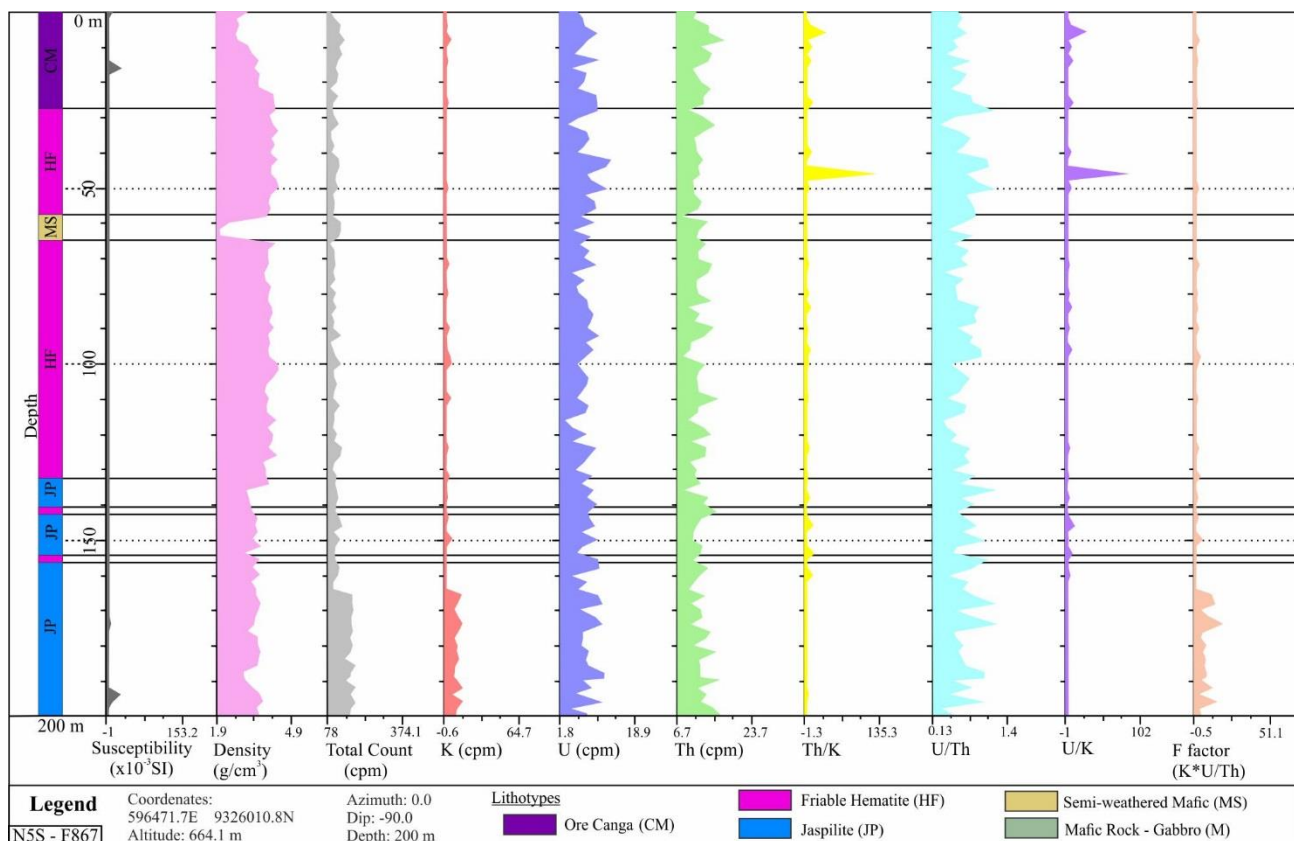
Apêndice VI.1. Resultados da abundância mineral e análise de composição utilizando os dados de espectrometria de refletância para o testemunho N5S-F867 e os litotipos encontrados durante a descrição dos furos. O *scatter plot* mostra a variação da abundância mineral em função da profundidade. A escala de cores nos diagramas de abundância (hidro-)óxidos de ferro, clorita e mistura esmectita-illita mostra o comprimento de onda em nm da feição de absorção desses minerais. A escala de cores do diagrama de abundância da caulinita e da mistura esmectita-illita é colorido de acordo com a cristalinidade destes minerais. Os intervalos que tem características mineralógicas similares foram agrupados no mesmo horizonte colorido.



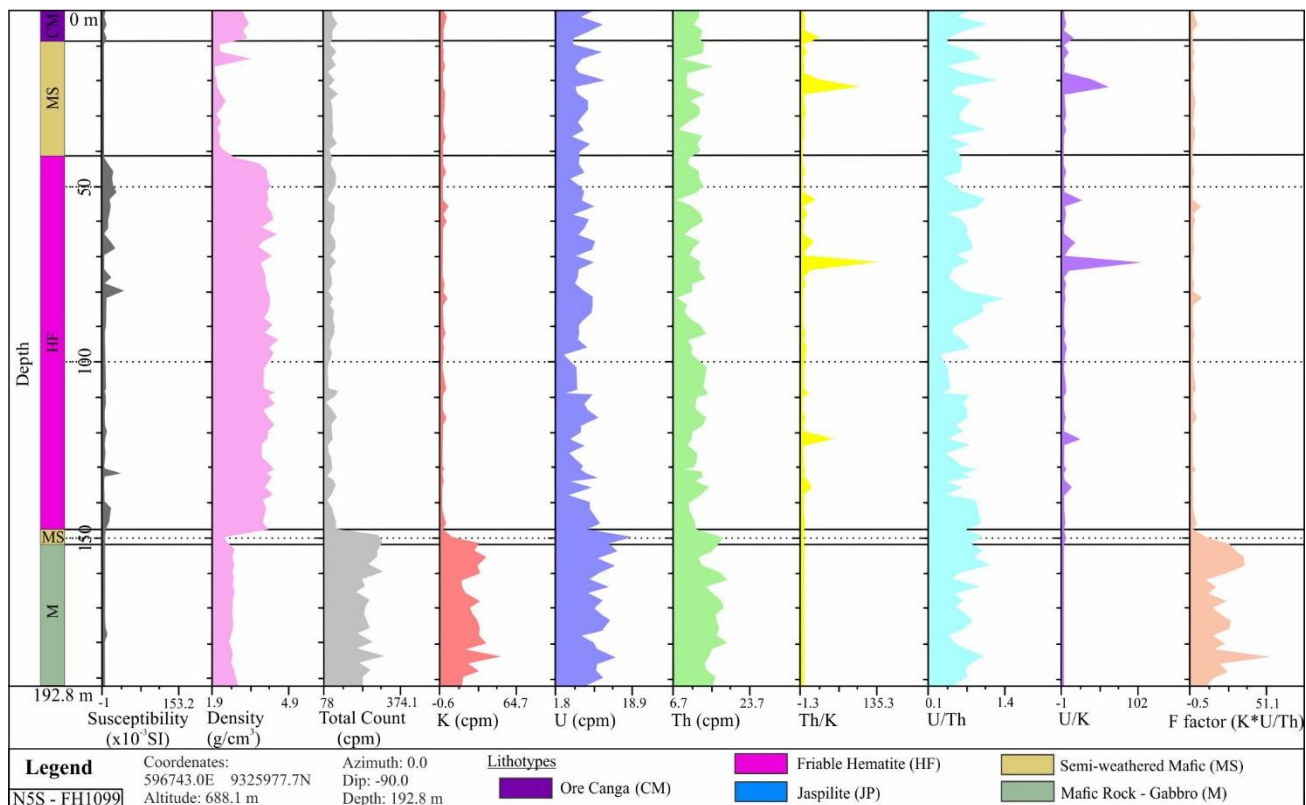
Apêndice VI.2. Resultados da abundancia mineral e analise de composição utilizando os dados de espectrometria de refletância para o testemunho N5S-FH1099 e os litotipos encontrados durante a descrição dos furos. O *scatter plot* mostra a variação da abundância mineral em função da profundidade. A escala de cores nos diagramas de abundância (hidro-)óxidos de ferro, clorita e mistura esmectita-illita mostra o comprimento de onda em nm da feição de absorção desses minerais. A escala de cores do diagrama de abundância da caolinita e da mistura esmectita-illita é colorido de acordo com a cristalinidade destes minerais. Os intervalos que tem características mineralógicas similares foram agrupados no mesmo horizonte colorido.



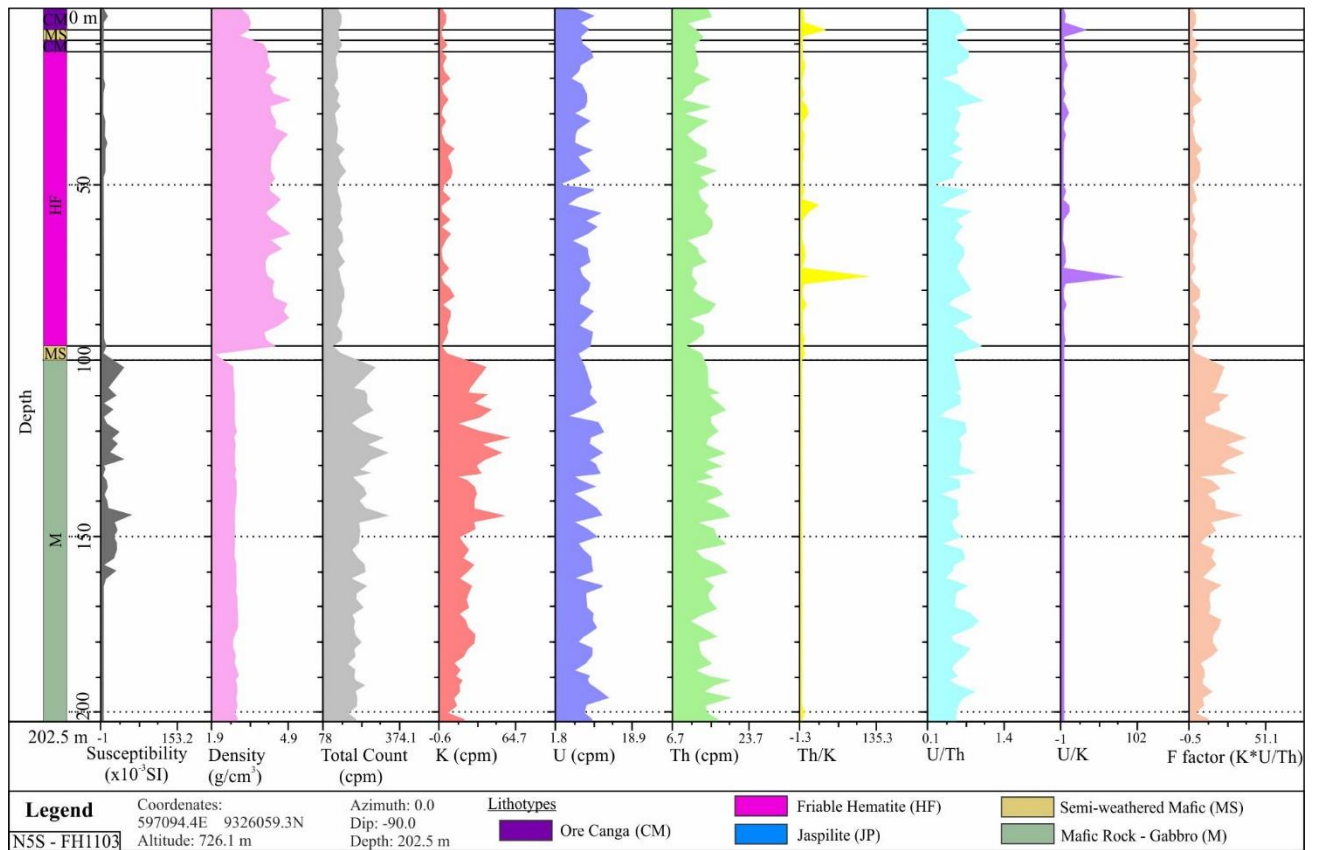
Apêndice VI.3. Resultados da abundância mineral e análise de composição utilizando os dados de espectrometria de refletância para o testemunho N5S-FH1103 e os litotipos encontrados durante a descrição dos furos. O *scatter plot* mostra a variação da abundância mineral em função da profundidade. A escala de cores nos diagramas de abundância (hidro-)óxidos de ferro, clorita e mistura esmectita-illita mostra o comprimento de onda em nm da feição de absorção desses minerais. A escala de cores do diagrama de abundância da caulinita e da mistura esmectita-illita é colorido de acordo com a cristalinidade destes minerais. Os intervalos que tem características mineralógicas similares foram agrupados no mesmo horizonte colorido.



Apêndice VI.4. *Scatter plots* apresentando a variação das propriedades físicas de rocha em função da profundidade do testemunho N5S-F867, representando o comportamento para cada litotipo. Seguindo da esquerda para a direita tem-se a resposta da susceptibilidade magnética, densidade, gamaespectrometria com contagem total, potássio, urânio e tório e suas relações.



Apêndice VI.5. *Scatter plots* apresentando a variação das propriedades físicas de rocha em função da profundidade do testemunho N5S-FH1099, representando o comportamento para cada litotipo. Seguindo da esquerda para a direita tem-se a resposta da susceptibilidade magnética, densidade, gamaespectrometria com contagem total, potássio, urânio e tório e suas relações.



Apêndice VI.6. *Scatter plots* apresentando a variação das propriedades físicas de rocha em função da profundidade do testemunho N5S-FH1103, representando o comportamento para cada litotipo. Seguindo da esquerda para a direita tem-se a resposta da susceptibilidade magnética, densidade, gamaespectrometria com contagem total, potássio, urânio e tório e suas relações.

Apêndice VI.7. Tabela resumida de integração com observações, valores e variações da espectroscopia de reflectância, geoquímica, propriedades físicas de rocha e petrografia dos furos N5S-F867, N5S-F871, N5S-FH1099 e N5S-FH1103.

Amostra	Depth	RX	Espectroscopia	CT ****	Picos das razões U/K Tb/K	Picos de fator F	Suscep. Mag. ****	Dens. ****	Geoquímica*	Microscopia		Observações
										Mineralogia	Texturas e Estruturas	
F867/01	0,00	CM	OxFe+Smc	80,90			10,80	3,03	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR			Densidade é muito boa para diferenciar os litotipos
F867/02	2,00	CM	OxFe+Smc	103,4			0,38	2,61	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR			
F867/03	4,00	CM	OxFe+Gib	125,7			1,48	2,73	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR; *Enriquecimento Al ₂ O ₃ *Diminuição do Fe ₂ O ₃			
F867/04	6,00	CM	OxFe+Smc	123,7			0,94	2,66	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR; *Enriquecimento em Al ₂ O ₃ *Diminuição do Fe ₂ O ₃			
F867/05	8,00	CM	OxFe+Gib	141,6			0,51	2,71	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR; *Enriquecimento em Al ₂ O ₃ *Diminuição do Fe ₂ O ₃			
F867/06	10,00	CM	OxFe+Gib	125,6			0,80	3,16	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR; *Enriquecimento em Al ₂ O ₃ *Diminuição do Fe ₂ O ₃			
F867/07	12,00	CM	OxFe+Gib	134,5			0,83	3,29	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR; *Enriquecimento em Al ₂ O ₃ *Diminuição do Fe ₂ O ₃			
F867/08	14,00	CM	OxFe+Smc	118,8			0,71	3,52	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR; *Enriquecimento em Al ₂ O ₃ *Diminuição do Fe ₂ O ₃			
F867/09	16,00	CM	OxFe+Gib	107,1			26,17	3,37	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR			
F867/10	18,00	CM	OxFe	116,3			0,97	3,62	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR			

F867/11	20,00	CM	OxFe+Smc	112,6			0,86	3,52	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR			
F867/12	22,00	CM	OxFe+Gib	83,80			0,93	3,56	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR			
F867/13	24,00	HF	OxFe	119,1			1,60	4,18				
F867/14	26,00	HF	OxFe	100,1			0,47	4,22				
F867/15	28,00	HF	OxFe	97,40			0,89	4,24				
F867/16	30,00	HF	OxFe	104,9			1,45	4,06				
F867/17	32,00	HF	OxFe	117,7			1,09	4,14				
F867/18	34,00	HF	OxFe	92,30			1,77	4,35				
F867/19	36,00	HF	OxFe	94,40			0,79	4,12				
F867/20	38,00	HF	OxFe	104,6			1,03	4,20				
F867/21	40,00	HF	OxFe	92,90			0,96	4,08				
F867/22	42,00	HF	OxFe	116,6			0,98	4,37				
F867/23	44,00	HF	OxFe	124,9			0,91	4,10				
F867/24	46,00	HF	OxFe+Kao	111			1,09	4,06				
F867/25	48,00	HF	OxFe	110,3			1,02	4,25				
F867/26	50,00	HF	OxFe	119,9			1,09	4,36				
F867/27	52,00	HF	OxFe	100,5			0,96	4,06				
F867/28	54,00	HF	OxFe+Gib	104,4			0,90	3,93				
F867/29	56,00	HF	OxFe+Kao+Smc	102,7			1,32	4,03				
F867/30	58,00	HF	OxFe+Kao	98,1			1,17	3,91				
F867/31	60,00	MS	OxFe+Kao	129,1			0,46	2,37	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR; * Enriquecimento em SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO *Diminuição do Fe ₂ O ₃			
F867/32	62,00	MS	OxFe+Kao	128,2			0,22	1,92	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR; * Enriquecimento em SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO *Diminuição do Fe ₂ O ₃			

F867/33	64,00	MS	OxFe+Kao	121		0,26	1,94	*Enriquecimento em P, Cr, Sc, V, Ga, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR; * Enriquecimento em SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, MnO *Diminuição do Fe ₂ O ₃			
F867/34	66,00	HF	OxFe	87,9		1,82	4,22				
F867/35	68,00	HF	OxFe	103		0,90	3,98				
F867/36	70,00	HF	OxFe	103,1		1,58	3,97				
F867/37	72,00	HF	OxFe	107,9		1,26	3,95				
F867/38	74,00	HF	OxFe+Gib	100,5		1,16	3,79				
F867/39	76,00	HF	OxFe	108,3		0,88	3,84				
F867/40	78,00	HF	OxFe	84,7		0,80	4,06				
F867/41	80,00	HF	OxFe	106,5		0,90	3,99				
F867/42	82,00	HF	OxFe	99,3		1,01	3,92				
F867/43	84,00	HF	OxFe	109,10		0,88	4,06				
F867/44	86,00	HF	OxFe	95,3		1,05	4,09				
F867/45	88,00	HF	OxFe+Gib	103,2		0,85	4,00				
F867/46	90,00	HF	OxFe	100,5		1,03	4,18				
F867/47	92,00	HF	OxFe	126,4		0,70	3,94				
F867/48	94,00	HF	OxFe	86,9		1,21	4,06				
F867/49	96,00	HF	OxFe	96,4		0,96	3,97				
F867/50	98,00	HF	OxFe	109,7		0,90	4,02				
F867/51	100,00	HF	OxFe	127		0,97	4,30				
F867/52	102,00	HF	OxFe	101,9		0,78	4,34				
F867/53	104,00	HF	OxFe	102,2		1,03	4,13				
F867/54	106,00	HF	OxFe	113,8		0,90	3,89				
F867/55	108,00	HF	OxFe	101,3		1,24	3,81				
F867/56	110,00	HF	OxFe	97,1		0,97	3,98				
F867/57	112,00	HF	OxFe	122,4		1,16	3,91				
F867/58	114,00	HF	OxFe	100,6		1,84	3,89	* Enriquecimento em Rb e Cs			
F867/59	116,00	HF	OxFe	105,1		1,05	4,25	* Enriquecimento em Rb e Cs			
F867/60	118,00	HF	OxFe+Kao	96,4		0,91	3,88	* Enriquecimento em Rb e Cs			
F867/61	120,00	HF	OxFe	111,6		0,76	4,13	* Enriquecimento em Rb e Cs			
F867/62	122,00	HF	OxFe+Kao	102,1		1,15	4,09	* Enriquecimento em Rb e Cs			
F867/63	124,00	HF	OxFe	131,9		1,12	3,94	* Enriquecimento em Rb e Cs			
F867/64	126,00	HF	OxFe	127,7		1,19	4,27	* Enriquecimento em Rb e Cs			
F867/65	128,00	HF	OxFe	108,2		1,15	3,76	* Enriquecimento em Rb e Cs			
F867/66	130,00	HF	OxFe+Kao	95,5		0,81	3,82	* Enriquecimento em Rb e Cs			

F867/67	132,00	HF	OxFe	114,9			1,07	3,87	* Enriquecimento em Rb e Cs			
F867/68	134,00	HF	OxFe	105,8			1,05	4,00	** Enriquecimento em Rb e Cs *Aumento de MnO			Com a mudança do minério para o protominério há um aumento da SiO ₂ e uma diminuição do Fe ₂ O ₃
F867/69	136,00	JP	OxFe	114,8			0,38	3,06	** Enriquecimento em Rb e Cs *Anomalia de Ga, Nb, Tl, Zr, Hf, Pb, Lu, Yb, Tm, Er.	Quartzo cripto-microcristalino, hematita primária, magnetita matitizada e jaspe	Bandas de jaspe e óxidos com contato brusco e retilíneo, com presença de falhas descontínuas e fraturas descontínuas preenchidas por jaspe e quartzo.	Jaspilito fraturado
F867/70	138,00	JP	OxFe	119,6			0,58	3,15	* Enriquecimento em Rb e Cs			Jaspilito fraturado
F867/71	140,00	JP	OxFe+Smc	111,5			1,05	3,22	* Enriquecimento em Rb e Cs			Jaspilito fraturado
F867/72	142,00	HF	OxFe	109,6			0,79	3,25	* Enriquecimento em Rb e Cs *Anomalia de Fe ₂ O ₃ *Diminuição da SiO ₂			
F867/73	144,00	JP	OxFe+Kao	123,8			1,10	3,55				Jaspilito fraturado
F867/74	146,00	JP	OxFe	133,4			1,03	3,40				Jaspilito fraturado
F867/75	148,00	JP	OxFe	97,9			0,85	3,54				Jaspilito fraturado
F867/76	150,00	JP	OxFe	121,1			0,44	3,34	*Anomalia de MnO			Jaspilito fraturado
F867/77	152,00	JP	OxFe	110,5			0,73	3,64				Jaspilito fraturado
F867/78	154,00	JP	OxFe	103,2			0,45	2,97				Jaspilito fraturado
F867/79	156,00	HF	OxFe	107,7			1,06	3,59	*Anomalia de Fe ₂ O ₃ *Diminuição da SiO ₂			
F867/80	158,00	JP	OxFe	121,6			1,62	3,34				Jaspilito fraturado
F867/81	160,00	JP	OxFe	116,1			2,34	3,60				Jaspilito fraturado
F867/82	162,00	JP	OxFe+Kao	97,8			1,78	3,29				Jaspilito fraturado
F867/83	164,00	JP	OxFe	98,2			1,53	3,42				Jaspilito fraturado; Esferulitos e outras feições preservadas
F867/84	166,00	JP	OxFe	174,2			1,32	3,49		Quartzo cripto-microcristalino, hematita primária, magnetita matitizada, pirrotita, jaspe	Bandamente ondulado, com presença de fraturas preenchidas por quartzo e feições de sobrecarga com adelgaçamento da camada de óxido e início de "boudinagem"	Jaspilito compacto; 60% de bandas de jaspe, 30% bandas de óxidos e 10% chert
F867/85	168,00	JP	OxFe	173,4			2,15	3,63				Jaspilito compacto
F867/86	170,00	JP	OxFe+Smc	176,1			1,25	3,56				Jaspilito compacto; com falhas e dobras de carga
F867/87	172,00	JP	OxFe+Smc	168,7			0,74	3,41		Quartzo microcristalino, "porthrotopes" de magnetita matitizada, hematita primária, jaspe	Bandamento constante, levemente ondulado com estruturas do tipo flame pontuais	Jaspilito compacto; laminado, com fraturas centimétricas preenchidas por hematita
F867/88	174,00	JP	OxFe+Smc+Kao	169,4			3,30	3,37				Jaspilito compacto
F867/89	176,00	JP	OxFe+Smc+Kao	171,7			0,95	3,09	*Anomalia dos	Quartzo, hematita primária,	Bandamento constante e	Jaspilito compacto;

								ETR pesados (Sm-Lu)+ Y	"porthrotopes" de magnetita matitzada, feldspato (muito pouco), jaspe, goethita e hematita acicular secundária	levemente ondulado, com feições de sobrecarga. Vênulas de "porthrotopes" de magnetita matitzada cortando o bandamento e também fraturas preenchidas por quartzo	brechado e intemperizado	
F867/90	178,00	JP	OxFe+Smc	170,6			0,84	3,50			Jaspilito fragmentado	
F867/91	180,00	JP	OxFe+Smc	173,2			0,89	3,55			Jaspilito fragmentado	
F867/92	182,00	JP	OxFe+Smc	167,7			1,48	3,65		Hematita primária, jaspe, quartzo, "porthrotopes" de magnetita matitzada	Bandamento constante e levemente ondulado, com feições de sobrecarga, com presença de magnetita matitzada no contato entre o jaspe e o óxido e esferulitos. Vênulas de "porthrotopes" de magnetita matitzada cortando o bandamento e também fraturas preenchidas por quartzo e jaspe	Jaspilito compacto; laminado
F867/93	184,00	JP	OxFe+Smc	147,2			2,18	3,59		Hematita primária, jaspe, quartzo, "porthrotopes" de magnetita matitzada, goethita	Bandamento constante e levemente ondulado, com feições de sobrecarga, com presença de magnetita matitzada no contato entre o jaspe e o óxido e esferulitos. Vênulas de "porthrotopes" de magnetita matitzada cortando o bandamento e também fraturas preenchidas por quartzo e jaspe	Jaspilito compacto; bandado
F867/94	186,00	JP	OxFe+Smc+Kao	181,1			0,91	3,52				Jaspilito fragmentado
F867/95	188,00	JP	OxFe+Smc+Kao	167,1			0,69	2,97	* Enriquecimento em MnO, SiO ₂ *Diminuição do Fe ₂ O ₃ *Enriquecimento em Ba e Co	Hematita primária, hematita acicular secundária, jaspe, quartzo, "porthrotopes" de magnetita matitzada	Bandamento constante e brechado, fraturado e cisalhado. Brechas preenchidas por quartzo.	Jaspilito compacto; brechado e intemperizado
F867/96	190,00	JP	OxFe+Smc+Kao	153,2			0,59	3,00	* Enriquecimento em MnO, SiO ₂ *Diminuição do Fe ₂ O ₃ *Enriquecimento em Ba e Co			Jaspilito compacto; brechado e intemperizado
F867/97	192,00	JP	OxFe+Smc	182,5			2,06	3,30	* Enriquecimento em MnO *Enriquecimento em Ba e Co			Jaspilito compacto; brechado e intemperizado
F867/98	194,00	JP	OxFe+Smc	169,8			27,03	3,60	*Enriquecimento em Co			Jaspilito fragmentado
F867/99	196,00	JP	OxFe+Smc	186,1			12,30	3,72	*Enriquecimento em Co	Hematita primária, jaspe, quartzo policristalino, "porthrotopes" de magnetita matitzada, calcopirita, pirita	Bandamento constante e levemente ondulado, com feições de sobrecarga. Vênulas de "porthrotopes" de magnetita matitzada cortando o bandamento e também fraturas	Jaspilito compacto

											preenchidas por quartzo	
F867/100	198,00	JP	OxFe+Smc	167,9			2,83	3,46	*Enriquecimento em Co			Jaspilite compacto
F867/101	200,00	JP	OxFe+Smc	165,3			1,04	3,59	*Enriquecimento em Co			Jaspilite compacto; brechado e intemperizado

* Os elementos químicos citados apenas representam pontos com valores anômalos em relação ao background do furo total, não significando que são valores altos.

** Lâminas petrográficas feitas em 2011 com o intuito de verificar a mineralogia e as microestruturas.

*** Lâminas petrográficas feitas em 2016 para validar os minerais da espectroscopia e para conferir anomalias geoquímicas.

**** Tabela com os valores de susceptibilidade magnética, densidade e contagem total (CT) equivalente a cada cor representada nas planilhas.

Suscep. Mag.	Densidade	CT
<1	<2	<100
01-05	2-2.5	100-150
05-10	2.5-3	150-200
10-20	3-3.5	200-250
20-30	3.5-4	250-300
30-50	4-4.5	>300
>50	>4.5	

Nota: OxFe= (Hidro-)óxido de ferro; Gib= Gibbssita; Kao= caolinita; Cl= clorita; Smc= esmectita (mica de baixa cristalinidade); Smc/ill= mistura de esmectita e illita

Amostra	Depth	RX	Espectroscopia	CT ****	Picos das razões U/K Th/K	Picos de fator F	Suscep. Mag. ****	Dens. ****	Geoquímica*	Microscopia		Observações
										Mineralogia	Texturas e Estruturas	
F871/01	0,00	CM	OxFe+Smc	118			1,97	3,03	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			O P apresenta maiores valores na parte superior do furo, principalmente na canga
F871/02	2,00	CM	OxFe+Smc+Kao	104,7			0,75	3,93	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			
F871/03	4,00	CM	OxFe+Smc	119,7			0,91	3,47	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			
F871/04	6,00	CM	OxFe+Smc	97,6			1,77	3,43	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			
F871/05	8,00	CM	OxFe+Smc	152,4			2,17	3,24	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			
F871/06	10,00	CM	OxFe+Smc	125,5			2,68	3,77	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			Concentração maior de U e Th provavelmente devido ao contato
F871/07	12,00	HF	OxFe+Smc	114,7			0,78	3,99	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			
F871/08	14,00	HF	OxFe	121,4			3,67	3,97	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			
F871/09	16,00	HF	OxFe	120,3			2,33	3,78	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			
F871/10	18,00	HF	OxFe+Smc	117,3			3,81	3,91	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			
F871/11	20,00	HF	OxFe	115,7			1,44	3,98	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			
F871/12	22,00	HF	OxFe	114,3			1,16	4,11	*Valores um pouco maiores de Al_2O_3 , porém <5%			
F871/13	24,00	HF	OxFe	99,8			1,48	4,08				
F871/14	26,00	HF	OxFe	109,9			9,61	4,11				
F871/15	28,00	HF	OxFe	113,4			3,38	4,34				

F871/16	30,00	HF	OxFe	111,4			1,01	4,06			
F871/17	32,00	HF	OxFe	95,3			1,40	3,96			
F871/18	34,00	HF	OxFe	110,9			2,72	4,08			
F871/19	36,00	HF	OxFe	120,7			0,96	4,27			
F871/20	38,00	HF	OxFe	126,8			1,03	4,32			
F871/21	40,00	HF	OxFe	109			3,30	4,37			
F871/22	42,00	HF	OxFe	109,2			0,83	3,97			
F871/23	44,00	HF	OxFe	99,6			2,41	3,85			
F871/24	46,00	HF	OxFe	83,6			27,27	4,03			
F871/25	48,00	HF	OxFe	105,2			10,03	3,93			
F871/26	50,00	HF	OxFe	112,3			5,84	3,98			
F871/27	52,00	HF	OxFe	113,7			17,97	3,99	*Anomalia de Ce		
F871/28	54,00	HF	OxFe	101,4			1,57	4,22			
F871/29	56,00	HF	OxFe	105,9			1,45	3,78			
F871/30	58,00	HF	OxFe	118,1			1,14	4,02			
F871/31	60,00	HF	OxFe	109,9			1,00	4,13			
F871/32	62,00	HF	OxFe	114,7			1,20	4,31			
F871/33	64,00	HF	OxFe	106,4			1,26	4,14			
F871/34	66,00	HF	OxFe	109,1			1,08	4,11			
F871/35	68,00	HF	OxFe	89,5			1,61	4,27			
F871/36	70,00	HF	OxFe	118,2			1,67	3,88			
F871/37	72,00	HF	OxFe	94,9			4,27	3,97			
F871/38	74,00	HF	OxFe	110,8			1,98	4,20			
F871/39	76,00	HF	OxFe	93,1			1,21	4,29			
F871/40	78,00	HF	OxFe	111,8			1,31	4,37			
F871/41	80,00	HF	OxFe	111			1,03	4,52			
F871/42	82,00	HF	OxFe	105,2			1,28	4,10			
F871/43	84,00	HF	OxFe	93,2			0,90	4,13			
F871/44	86,00	HF	OxFe	99,2			1,05	4,18			
F871/45	88,00	HF	OxFe	121,1			0,88	4,22			

F871/46	90,00	HF	OxFe	104,8			1,06	4,40			
F871/47	92,00	HF	OxFe	113,8			1,10	4,50			
F871/48	94,00	HF	OxFe	102,5			1,13	4,40			
F871/49	96,00	HF	OxFe	103,3			0,95	4,17			
F871/50	98,00	HF	OxFe	108,5			1,16	3,97			
F871/51	102,00	HF	OxFe	108,9			3,31	4,02			
F871/52	108,00	HF	OxFe	103,4			1,83	4,40			
F871/53	109,00	HF	OxFe	101,1			3,00	4,03			
F871/54	110,00	HF	OxFe	114,7			2,24	4,03			
F871/55	112,00	HF	OxFe	104,6			3,02	4,36			
F871/56	114,00	HF	OxFe	128,9			2,16	4,30			
F871/57	116,00	HF	OxFe	115,8			1,26	4,24			
F871/58	118,00	HF	OxFe	106,5			3,27	4,13	*Anomalia de Co		
F871/59	120,00	HF	OxFe	129,1			2,11	4,00			
F871/60	122,00	HF	OxFe	93			3,61	4,37			
F871/61	124,00	HF	OxFe	106,8			1,50	4,16	*Anomalia de MnO		
F871/62	126,00	HF	OxFe	99			3,25	4,15			
F871/63	128,00	HF	OxFe	90,4			1,78	4,10			
F871/64	130,00	HF	OxFe	107,8			3,42	4,12			
F871/65	131,00	HF	OxFe	110,6			3,24	4,37			
F871/66	132,00	HF	OxFe	106,8			4,05	4,06			
F871/67	133,00	HF	OxFe	98,8			1,78	4,30			
F871/68	134,00	HF	OxFe	103			2,37	4,40			
F871/69	136,00	HF	OxFe	114,5			5,19	4,27			
F871/70	138,00	HF	OxFe	96,8			6,17	4,54			
F871/71	140,00	HF	OxFe	97,6			9,45	4,57			
F871/72	142,00	HF	OxFe	102,4			23,33	4,38			
F871/73	144,00	HF	OxFe	137,5			42,97	4,10			
F871/74	146,00	HF	OxFe	118,1			145,67	3,84			

F871/75	146,60	HF	OxFe	113,8			151,67	3,91	*Anomalia de MnO e ETR		Não foi possível ter uma boa visualização da lâmina	Esse pico na geoquímica e na suscep. mag. está correlacionado com a mudança de litotipo e o processo de lixiviação?
F871/76	148,00	JP	OxFe	123,4			23,50	3,39				
F871/77	150,00	JP	OxFe+Smc+Kao	195,4			13,40	3,33				
F871/78	152,00	MS	OxFe+Kao+Gib+Cl+Smc	267,6			3,59	2,52	*Anomalia de Ni e Zn			
F871/79	154,00	MS	OxFe+Kao+Cl	324,6			4,03	2,41				
F871/80	156,00	MS	OxFe+Kao+Cl	204,9			5,28	2,63		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica. Presença de fraturas preenchidas por quartzo.	
F871/81	158,00	M	OxFe+Kao+Cl+Smc/III	281,1			5,38	2,65				
F871/82	160,00	M	Cl+Kao	303,8			38,83	2,81				
F871/83	162,00	M	Cl+Smc/III	310,2			61,30	2,75	* Enriquecimento em CaO			
F871/84	164,00	M	Cl+Smc/III	245,6			47,43	2,74	* Enriquecimento em CaO			
F871/85	166,00	M	Cl+Smc/III	302,4			48,07	2,75	* Enriquecimento em CaO			
F871/86	168,00	M	Cl+Smc/III	220,4			3,15	2,73				
F871/87	170,00	M	Cl	274,5			1,51	2,76	* Enriquecimento em FeO , MgO , P, V *Diminuição de SiO2	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, k-feldspato, magnetita matizada e hematita sofrendo exsolução para illmenita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica. Presença de fraturas preenchidas por quartzo.	uma zona de muita brechação
F871/88	172,00	M	Cl	316			1,31	2,80	* Enriquecimento em FeO , MgO , P, V *Diminuição de SiO2	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para clorita, k-feldspato, magnetita matizada e hematita sofrendo exsolução para illmenita, zircão	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	uma zona de muita brechação
F871/89	174,00	M	Cl+Smc	315,2			0,93	2,74				
F871/90	176,00	M	Cl+Smc/III	317			1,41	2,73				
F871/91	178,00	M	Cl+Smc/III	223,3			38,17	2,73	* Enriquecimento em CaO			

F871/92	180,00	M	Cl+Smc/Il	256,4			30,53	2,76	* Enriquecimento em CaO			
F871/119	181,50	M	Cl+Smc/Il	274,5			31,37	2,77	* Enriquecimento em CaO			
F871/93	182,00	M	Cl+Smc/Il	371,2			65,37	2,76	* Enriquecimento em CaO	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, k-feldspato, magnetita matizada e hematita sofrendo exsolução para illmenita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica. Presença de fraturas preenchidas por quartzo.	
F871/94	184,00	M	Cl+Smc/Il	278,6			22,23	2,77	* Enriquecimento em CaO			
F871/95	186,00	M	Cl+Smc/Il	283,7			27,60	2,75	* Enriquecimento em CaO			
F871/96	188,00	M	Cl+Smc/Il	279,9			26,03	2,76	* Enriquecimento em CaO			
F871/97	190,00	M	Cl+Smc/Il	262,3			30,30	2,77	* Enriquecimento em CaO			
F871/98	191,00	M	Cl+Smc/Il	296			0,70	2,65	* Enriquecimento em CaO	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, magnetita matizada e hematita sofrendo exsolução para illmenita e calcopirita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica. Presença de fraturas preenchidas por quartzo.	
F871/99	192,00	M	Cl+Smc/Il	359,5			1,13	2,78	* Enriquecimento em FeO			
F871/100	194,00	M	Cl	348,7			1,85	2,73	* Enriquecimento em FeO, P e ETR	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F871/101	196,00	M	Cl+Kao	360,6			0,79	2,73	* Enriquecimento em P e ETR	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F871/102	198,00	M	Cl+Smc	298,8			1,35	2,74				
F871/103	198,55	M	Cl+Smc	258,5			1,13	2,74	* Anomalia de FeO			
F871/104	200,00	M	Cl+Smc	267,3			0,87	2,77				
F871/105	202,00	M	Cl+Smc/Il	289			0,98	2,69				
F871/106	204,00	M	Cl+Smc/Il	298,2			0,86	2,75				

F871/107	206,00	M	OxFe+Cl+Smc/III	298,2			26,70	2,74			
F871/108	208,00	M	Cl+Smc/III	314,7			1,13	2,83	* Anomalia de CaC		
F871/109	210,00	M	Cl+Smc/III	278,7			0,99	2,72	* Anomalia de FeO		
F871/110	212,00	M	Cl+Smc	304,1			1,00	2,75			
F871/111	214,00	M	Cl+Smc/III	291,7			1,06	2,75		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, k-feldspato, apatita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica. Presença de vênulas preenchidas por quartzo e adularia.
F871/112	216,00	M	Cl+Smc/III	223,6			12,10	2,76			
F871/113	218,00	M	Cl+Smc/III	259,6			20,47	2,75	* Anomalia de CaC		
F871/114	220,00	M	Cl+Smc/III	287			21,87	2,74			
F871/115	222,00	M	Cl+Smc/III	236,2			0,98	2,75			
F871/116	224,00	M	Cl+Smc/III	222,2			0,73	2,66			
F871/121	228,50	M	Cl+Smc/III	218,7			1,16	2,78			
F871/120	230,50	M	Cl+Smc	253,3			1,15	2,74			

* Os elementos químicos citados apenas representam pontos com valores anômalos em relação ao background do furo total, não significando que são valores altos.

** Lâminas petrográficas feitas em 2011 com o intuito de verificar a mineralogia e as micro estruturas.

*** Lâminas petrográficas feitas em 2016 para validar os minerais da espectroscopia e para conferir anomalias geoquímicas.

**** Tabela com os valores de susceptibilidade magnética, densidade e contagem total (CT) equivalente a cada cor representada nas planilhas.

Suscep. Mag.	Densidade	CT
<1	<2	<100
01-05	2-2.5	100-150
05-10	2.5-3	150-200
10-20	3-3.5	200-250
20-30	3.5-4	250-300
30-50	4-4.5	>300
>50	>4.5	

Nota: OxFe= (Hidro-)óxido de ferro; Gib= Gibbsite; Kao= caolinita; Cl= clorita; Smc= esmectita (mica de baixa cristalinidade); Smc/ill= mistura de esmectita e illita

Amostra	Depth	RX	Espectroscopia	CT ****	Picos das razões U/K Th/K	Picos de fator F	Suscep. Mag. ****	Dens. ****	Geoquímica*	Microscopia		Observações
										Mineralogia	Texturas e Estruturas	
F1099/01	0,00	CM	OxFe	109,3			2,53	3,05				A esmectita e a gibbsita presentes nos começos dos furos é de alteração supergênica
F1099/02	2,00	CM	OxFe	112,9			1,52	3,19				
F1099/03	4,00	CM	OxFe+Smc	132			6,71	3,39				
F1099/04	6,00	CM	OxFe+Smc	114,7			1,79	3,13				
F1099/05	8,00	CM	OxFe+Smc	112,1			5,11	3,29				
F1099/06	10,00	MS	OxFe+Gib	103,2			0,32	2,12				
F1099/07	12,00	MS	OxFe+Gib	128,8			0,28	2,17				
F1099/08	14,00	MS	OxFe+Gib	106,1			0,61	3,31				
F1099/09	16,00	MS	OxFe+Gib	121,2			0,33	1,90				
F1099/10	18,00	MS	OxFe+Gib	91			0,21	1,88				
F1099/11	20,00	MS	OxFe+Gib	116,5			0,26	1,99				
F1099/12	22,00	MS	OxFe+Gib	98,3			0,32	2,06				
F1099/13	24,00	MS	OxFe+Gib+Kao	133,3			0,27	2,15	*Enriquecimento em SiO ₂ , MnO *Diminuição Al ₂ O ₃			
F1099/14	26,00	MS	OxFe+Gib	107,7			0,36	2,35	* Enriquecimento em MnO *Diminuição Al ₂ O ₃			
F1099/15	28,00	MS	OxFe+Gib	112,6			0,81	2,22	* Enriquecimento em MnO, V, Co, Tl, Pb, ERT leves *Diminuição Al ₂ O ₃			
F1099/16	30,00	MS	OxFe+Gib	114,4			0,55	1,93				
F1099/17	32,00	MS	OxFe+Gib	111,5			0,34	2,16				

F1099/18	34,00	MS	OxFe+Gib	116,6			0,37	2,04			
F1099/19	36,00	MS	OxFe+Gib	115,2			0,54	2,19	*Anomalia de MnO, Ba, Co, Zn, Ni, ERT		
F1099/20	38,00	MS	OxFe+Kao	129,3			0,23	2,10	* Enriquecimento em SiO2		
F1099/21	40,00	MS	OxFe+Kao	98,4			0,49	2,25	* Enriquecimento em SiO2		
F1099/22	42,00	MS	OxFe+Kao	114,5			0,30	2,81	* Enriquecimento em SiO2, Cr, ERT pesados		
F1099/23	44,00	HF	OxFe	104,9			12,00	3,86			
F1099/24	46,00	HF	OxFe	118,9			22,53	4,11			
F1099/25	48,00	HF	OxFe	128,5			18,73	4,11			
F1099/26	50,00	HF	OxFe	120,9			20,73	4,26			
F1099/27	52,00	HF	OxFe	110,3			26,27	4,10			
F1099/28	54,00	HF	OxFe	94,3			13,13	4,18			
F1099/29	56,00	HF	OxFe	121,1			15,93	4,06			
F1099/30	58,00	HF	OxFe	117,4			14,77	4,25			
F1099/31	60,00	HF	OxFe	123,7			11,93	4,32			
F1099/32	62,00	HF	OxFe	109,5			12,17	3,85			
F1099/33	64,00	HF	OxFe	105,3			2,28	4,46			
F1099/34	66,00	HF	OxFe	120,7			14,40	3,95			
F1099/35	68,00	HF	OxFe	121,5			22,87	3,75			
F1099/36	70,00	HF	OxFe	105,4			2,38	4,25			
F1099/37	72,00	HF	OxFe	125,5			1,72	3,86			
F1099/38	74,00	HF	OxFe	104,1			1,70	3,97			
F1099/39	76,00	HF	OxFe	110,1			16,33	4,03			
F1099/40	78,00	HF	OxFe	111,1			2,41	4,06			
F1099/41	80,00	HF	OxFe	99,5			39,60	4,10			
F1099/42	82,00	HF	OxFe	114,7			2,63	4,25			
F1099/43	84,00	HF	OxFe	101			3,80	4,22			
F1099/44	86,00	HF	OxFe	116,7			3,06	4,15			
F1099/45	88,00	HF	OxFe	114,9			4,93	4,00			
F1099/46	90,00	HF	OxFe	118,9			3,61	4,37			

F1099/47	92,00	HF	OxFe	116,5			1,05	4,00			
F1099/48	94,00	HF	OxFe	107,8			2,46	4,57			
F1099/49	96,00	HF	OxFe	102,1			2,40	4,18			
F1099/50	98,00	HF	OxFe	106,3			1,97	4,37	*Anomalia de Cs		
F1099/51	102,00	HF	OxFe	95,4			2,34	4,01			
F1099/52	108,00	HF	OxFe	93,4			3,29	3,95			
F1099/53	109,00	HF	OxFe	131,7			1,67	4,38			
F1099/54	110,00	HF	OxFe	124,9			3,24	4,12			
F1099/55	112,00	HF	OxFe	84,6			2,57	4,43			
F1099/56	114,00	HF	OxFe	108			1,03	3,95			
F1099/57	116,00	HF	OxFe	127,5			4,65	4,16			
F1099/58	118,00	HF	OxFe	109,7			3,17	4,38			
F1099/59	120,00	HF	OxFe	109,1			7,21	4,13			
F1099/60	122,00	HF	OxFe	111			3,37	4,09			
F1099/61	124,00	HF	OxFe	92,2			1,51	3,88			
F1099/62	126,00	HF	OxFe	99,2			4,47	3,88			
F1099/63	128,00	HF	OxFe	106,5			1,04	3,94			
F1099/64	130,00	HF	OxFe	111,4			2,31	4,26			
F1099/65	131,00	HF	OxFe	115,4			4,78	4,37			
F1099/66	132,00	HF	OxFe	97,4			32,50	4,04			
F1099/67	133,00	HF	OxFe	89,7			1,43	4,27			
F1099/68	134,00	HF	OxFe	120,5			1,53	4,20			
F1099/69	136,00	HF	OxFe	124,9			1,41	3,99			
F1099/70	138,00	HF	OxFe	108,9			1,08	4,33			
F1099/71	140,00	HF	OxFe	86,1			1,58	3,94			
F1099/72	142,00	HF	OxFe	113,5			15,73	4,06			
F1099/74	146,00	HF	OxFe+Kao	130,4			12,57	3,96			
F1099/75	148,00	HF	OxFe	128,9			5,65	4,11			
F1099/76	150,00	MS	OxFe+Kao	295,5			0,71	2,34			
F1099/77	152,00	MS	OxFe+Kao	307,8			0,95	2,42			

F1099/78	154,00	M	Cl+Smc/Il	289,6			1,28	2,73	* Enriquecimento em FeO			
F1099/79	156,00	M	Cl+Smc/Il	288,3			2,47	2,69	* Enriquecimento em FeO	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, magnetita matitzada e hematita sofrendo exossolução para illmenita e espinélio	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F1099/80	158,00	M	OxFe+Cl+Smc/Il	252,1			0,80	2,73		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F1099/81	160,00	M	OxFe+Cl+Smc+Kao	307			0,81	2,69		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F1099/82	162,00	M	OxFe+Cl+Smc	229,6			0,99	2,73				
F1099/83	164,00	M	Cl+Smc/Il	236,1			0,91	2,70				
F1099/84	166,00	M	OxFe+Cl+Smc	201,5			0,55	2,73		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F1099/85	168,00	M	Cl+Kao	258			1,00	2,67				
F1099/86	170,00	M	Cl+Kao	242,9			1,23	2,68				
F1099/87	172,00	M	OxFe+Cl+Smc+Kao	239			0,89	2,70		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para clorita, apatita, magnetita matitzada e hematita sofrendo exossolução para illmenita, hematita acicular secundária sofrendo alteração para goethita, e estiplomelano	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	Região brechada
F1099/88	174,00	M	Cl+Smc/Il	250,3			1,00	2,71				
F1099/89	176,00	M	Cl+Smc/Il+Kao	258,3			3,63	2,67				
F1099/90	178,00	M	Cl+Kao	212,1			6,24	2,62	*Anomalia de Tl			
F1099/91	180,00	M	OxFe+Cl+Kao	268,4			0,54	2,52				
F1099/92	182,00	M	Cl+Smc/Il+Kao	203,6			0,82	2,66				
F1099/93	184,00	M	OxFe+Cl+Smc	311			1,04	2,68	*Anomalia de CaO, P, Nb, Tl, Zr, Hf e ETR *Diminuição MgO	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	

F1099/94	186,00	M	Cl+Smc/Il+Kao	215,5			0,99	2,64		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F1099/95	188,00	M	Cl+Smc/Il	262,7			1,55	2,72				
F1099/96	190,00	M	Cl+Kao	233,8			1,03	2,77	*Anomalia de FeO	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, magnetita matitzada e hematita sofrendo exossolução para illmenita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F1099/97	192,00	M	OxFe+Kao+Cl+Smc/Il	235,1			1,29	2,88	*Anomalia de FeO	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para epidoto e clorita, magnetita matitzada e hematita sofrendo exossolução para illmenita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	

* Os elementos químicos citados apenas representam pontos com valores anômalos em relação ao background do furo total, não significando que são valores altos.

** Lâminas petrográficas feitas em 2011 com o intuito de verificar a mineralogia e as micro estruturas.

*** Lâminas petrográficas feitas em 2016 para validar os minerais da espectroscopia e para conferir anomalias geoquímicas.

**** Tabela com os valores de susceptibilidade magnética, densidade e contagem total (CT) equivalente a cada cor representada nas planilhas.

Suscep. Mag.	Densidade	CT
<1	<2	<100
01-05	2-2.5	100-150
05-10	2.5-3	150-200
10-20	3-3.5	200-250
20-30	3.5-4	250-300
30-50	4-4.5	>300
>50	>4.5	

Nota: OxFe= (Hidro-)óxido de ferro; Gib= Gibbsite; Kao= caolinita; Cl= clorita; Smc= esmectita (mica de baixa cristalinidade); Smc/ill= mistura de esmectita e illita

Amostra	Depth	RX	Espectroscopia	CT ****	Picos das razões U/K Th/K	Picos de fator F	Suscep. Mag. ****	Dens. ****	Geoquímica*	Microscopia		Observações
										Mineralogia	Texturas e Estruturas	
F01103/01	0,00	CM	OxFe+Smc	132,5			2,36	2,95	*Enriquecimento em P			A densidade varia com a porcentagem de ferro
F01103/02	2,00	CM	OxFe	147,3			11,77	3,25	*Enriquecimento em P			
F01103/03	4,00	CM	OxFe	150,2			2,22	3,36	*Enriquecimento em P			
F01103/04	6,00	CM	OxFe	138,7			1,29	3,32	*Enriquecimento em P			
F01103/05	8,00	MS	OxFe+Smc	137,1			0,64	2,89	*Enriquecimento em P e Al2O3 *Diminuição Fe2O3			
F01103/06	10,00	MS	OxFe	149,4			0,99	3,89				
F01103/07	12,00	CM	OxFe	137			1,55	3,99				
F01103/08	14,00	HF	OxFe	128,9			1,93	4,06				
F01103/09	16,00	HF	OxFe	126,3			1,53	4,08				
F01103/10	18,00	HF	OxFe	135,4			1,79	3,95				
F01103/11	20,00	HF	OxFe+Smc	131			0,92	4,34				
F01103/12	22,00	HF	OxFe+Smc	122,4			3,54	4,09				
F01103/13	24,00	HF	OxFe	140,5			1,30	4,26				
F01103/14	26,00	HF	OxFe	129,8			1,19	4,91				
F01103/15	28,00	HF	OxFe	144,9			1,24	4,18				
F01103/16	30,00	HF	OxFe	123,2			2,20	4,23				
F01103/17	32,00	HF	OxFe	129,2			3,71	4,36				
F01103/18	34,00	HF	OxFe	135,4			3,65	4,32	* Enriquecimento em MnO			Varição original da rocha

F01103/19	36,00	HF	OxFe	132,4			4,91	4,77	* Enriquecimento em MnO			Varição original da rocha
F01103/20	38,00	HF	OxFe	128,8			6,81	4,52	* Enriquecimento em MnO			Varição original da rocha
F01103/21	40,00	HF	OxFe	156,5			3,22	4,34				Varição original da rocha
F01103/22	42,00	HF	OxFe	137			3,82	4,22				Varição original da rocha
F01103/23	44,00	HF	OxFe	143,2			4,92	4,17				Varição original da rocha
F01103/24	46,00	HF	OxFe	163,3			5,02	4,13	*Anomalia dos ETR leves até Ho			Varição original da rocha
F01103/25	48,00	HF	OxFe	145,6			0,70	4,30				Varição original da rocha
F01103/26	50,00	HF	OxFe	132,3			1,69	4,09	*Anomalia dos ETR leves até Ho			Varição original da rocha
F01103/27	52,00	HF	OxFe	132,6			1,11	4,12	*Aumento dos ETR leves até Ho			Varição original da rocha
F01103/28	54,00	HF	OxFe	141,5			0,65	4,53				
F01103/29	56,00	HF	OxFe	148			1,53	4,26				
F01103/30	58,00	HF	OxFe	143,7			1,18	3,92				
F01103/31	60,00	HF	OxFe	150,1			1,37	4,22				
F01103/32	62,00	HF	OxFe	131,4			1,78	4,61				
F01103/33	64,00	HF	OxFe	146,9			0,91	4,88				
F01103/34	66,00	HF	OxFe	153,2			1,07	4,10				
F01103/35	68,00	HF	OxFe	131,9			1,07	4,52				
F01103/36	70,00	HF	OxFe	141,6			1,50	4,07				
F01103/37	72,00	HF	OxFe	159,3			1,35	3,97				
F01103/38	74,00	HF	OxFe	135,9			1,46	3,96				
F01103/39	76,00	HF	OxFe	145			1,14	4,02	*Diminuição do Fe2O3			Possível erro analítico
F01103/40	78,00	HF	OxFe	146,6			1,40	4,25				
F01103/41	80,00	HF	OxFe	158,6			1,60	4,20				
F01103/42	82,00	HF	OxFe	157,1			2,27	4,30				
F01103/43	84,00	HF	OxFe	146			0,68	4,81				
F01103/44	86,00	HF	OxFe	149			0,78	4,65				
F01103/45	88,00	HF	OxFe	144,3			0,91	4,77				
F01103/46	90,00	HF	OxFe	134,8			0,74	4,46				

F01103/47	92,00	HF	OxFe	146,1			1,20	3,91				
F01103/48	94,00	HF	OxFe	150,5			4,27	3,96				
F01103/49	96,00	HF	OxFe+Smc	114,7			9,44	4,25				
F01103/50	98,00	MS	OxFe+Kao	150,2			1,15	1,91				
F01103/51	102,00	M	Cl+Smc/IlI	274,2			41,30	2,69	*Anomalia de CaO , Sr, Cr, Co, Ni *Valores mais baixos nos demais elementos analisados	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	As illitas da esmectita aparecem com maior cristalinidade no furo 1103, mais a leste no corpo N5S
F01103/52	108,00	M	Cl+Smc/IlI	195,5			13,87	2,71				
F01103/53	109,00	M	Cl+Smc/IlI	238,6			23,63	2,74		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/54	110,00	M	Cl+Smc/IlI	243,6			30,10	2,76				
F01103/55	112,00	M	Cl+Smc/IlI	242,9			1,69	2,74	*Anomalia de MnO , Co, Zn, Ga *Valores mais baixos nos demais elementos analisados	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato, Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/56	114,00	M	Cl+Smc/IlI	265,5			24,53	2,74				
F01103/57	116,00	M	Cl+Smc/IlI	223,9			1,84	2,73				
F01103/58	118,00	M	Cl+Smc/IlI	185,2			8,44	2,76				
F01103/59	120,00	M	Cl+Smc/IlI	229,9			32,97	2,77				
F01103/60	122,00	M	Cl+Smc/IlI	302,3			19,60	2,74	*Anomalia de P, Ba, Rb, Sc, Nb, Zr, Hf e ETR	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/61	124,00	M	Cl+Smc/IlI	246			29,30	2,78				
F01103/62	126,00	M	Cl+Smc/IlI	318,1			15,87	2,72				
F01103/63	128,00	M	Cl+Smc/IlI	256,2			42,87	2,75				
F01103/64	130,00	M	Cl+Smc/IlI	235,8			4,15	2,76				
F01103/65	131,00	M	Cl+Smc/IlI	213,7			6,09	2,77		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	

										hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato		
F01103/66	132,00	M	Cl+Smc/Il	255,4			4,85	2,74				
F01103/67	133,00	M	Cl+Smc/Il	186,1			1,62	2,76		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/68	134,00	M	Cl+Smc/Il	203,8			9,19	2,77				
F01103/69	136,00	M	Cl+Smc/Il+Kao	232			11,43	2,78				
F01103/70	138,00	M	Cl+Smc/Il+Kao	241,5			7,34	2,77		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/71	140,00	M	Cl+Smc/Il	214,6			12,37	2,77		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/72	142,00	M	Cl+Smc/Il	238,5			13,23	2,73				
F01103/73	144,00	M	Cl+Smc/Il	317,5			55,10	2,76	*Anomalia de P	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato, magnetita matitzada e hematita sofrendo exsolução para illmenita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	A anomalia de P está relacionada com o aumento do tamanho e quantidade de apatita
F01103/74	146,00	M	Cl+Smc/Il	211,8			27,13	2,76	*Anomalia de P	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/75	148,00	M	Cl+Smc/Il	218,3			28,30	2,76				
F01103/76	150,00	M	Cl+Smc/Il	211,7			22,87	2,75		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/77	152,00	M	Cl+Smc/Il	208			28,43	2,76				
F01103/78	154,00	M	Cl+Smc/Il	188,1			28,30	2,74	*Anomalia de Ba, Rb, Cs, Sc	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	

										para clorita, apatita, k-feldspato, Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.		
F01103/79	156,00	M	Cl+Smc/Il+Kao	207,2			24,20	2,72				
F01103/80	158,00	M	Cl+Smc/Il	233,4			4,37	2,80				
F01103/81	160,00	M	Cl+Smc/Il	238,3			25,53	2,80				
F01103/82	162,00	M	Cl+Smc/Il	181,7			8,78	2,81		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/83	164,00	M	Cl+Smc/Il	238,7			0,97	2,81				
F01103/84	166,00	M	Cl+Smc/Il	201,3			0,93	2,80				
F01103/85	168,00	M	Cl+Smc/Il	202,1			0,76	2,82		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/86	170,00	M	Cl+Smc/Il	230			0,61	2,83				
F01103/87	172,00	M	Cl+Smc/Il	190,4			0,72	2,82				
F01103/88	174,00	M	Cl+Smc/Il	197,4			0,51	2,82		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/89	176,00	M	Cl+Smc/Il	194,5			0,64	2,82				
F01103/90	178,00	M	Cl+Smc/Il	199,8			0,71	2,73				
F01103/91	180,00	M	Cl+Smc/Il	225,3			1,03	2,70	*Anomalia de SiO ₂ e ETR *Valores mais baixos nos demais elementos analisados	Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato, magnetita matitzada e hematita sofrendo exsolução para illmenita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	Apresenta assimilação de alguma rocha durante a intrusão
F01103/92	182,00	M	Cl+Smc	195,9			0,66	2,71				
F01103/93	184,00	M	Cl+Smc/Il	197			0,71	2,74		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica. Fraturas preenchidas por clorita	
F01103/94	186,00	M	Cl+Smc/Il	171,8			0,59	2,72				
F01103/95	188,00	M	Cl+Smc/Il	202,6			0,67	2,82		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	

										hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato		
F01103/96	190,00	M	Cl+Smc/Ill	199			0,52	2,82				
F01103/97	191,00	M	Cl+Smc/Ill	204,9			0,53	2,78		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/98	192,00	M	Cl+Smc/Ill	234,4			0,54	2,82				
F01103/99	194,00	M	Cl+Smc/Ill	201,4			0,55	2,82		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato, magnetita matitzada e hematita sofrendo exsolução para illmenita	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/100	196,00	M	Cl+Smc/Ill	208,2			0,59	2,80				
F01103/101	198,00	M	Cl+Smc/Ill	204,4			0,76	2,82				
F01103/102	200,00	M	Cl+Smc/Ill	170,9			0,67	2,81		Quartzo, plagioclásio alterado para mica branca e epidoto, piroxênio alterado para hornblenda e esta se alterando para clorita, apatita, k-feldspato	Mineralogia totalmente alterada, porém ainda preserva textura intergranular a subofítica.	
F01103/103	202,00	M	Cl+Smc/Ill	202,6			1,13	2,83				

* Os elementos químicos citados apenas representam pontos com valores anômalos em relação ao background do furo total, não significando que são valores altos.

** Lâminas petrográficas feitas em 2011 com o intuito de verificar a mineralogia e as micro estruturas.

*** Lâminas petrográficas feitas em 2016 para validar os minerais da espectroscopia e para conferir anomalias geoquímicas.

**** Tabela com os valores de susceptibilidade magnética, densidade e contagem total (CT) equivalente a cada cor representada nas planilhas.

Suscep. Mag.	Densidade	CT
<1	<2	<100
01-05	2-2.5	100-150
05-10	2.5-3	150-200
10-20	3-3.5	200-250
20-30	3.5-4	250-300
30-50	4-4.5	>300
>50	>4.5	

Nota: OxFe= (Hidro-)óxido de ferro; Gib= Gibbssita; Kao= caolinita; Cl= clorita; Smc= esmectita (mica de baixa cristalinidade); Smc/ill= mistura de esmectita e illita