

## Petrofísica da Porção Central do Corpo N4WS – Bloco Serra Norte, Província Mineral de Carajás

Ferreira, V. N.<sup>1</sup>; Silva, A. M.<sup>1</sup>; Toledo, C. L. B.<sup>1</sup>; JÁCOMO, M. H.<sup>2</sup>; Assis, L. M.<sup>3</sup> Pires, A. C. B.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília, <sup>2</sup>Universidade de São Paulo, <sup>3</sup>Vale S.A.

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

This work is the result of a partnership between the University of Brasilia and Vale SA for measuring and analyzing the physical properties of iron ore and host rocks belonging to the target N4WS, in the Serra Norte block, Carajás Mineral Province. The acquisition of physical properties is to evaluate the potential of the method for differentiation of ore and their respective host rocks. The physical parameters of magnetic susceptibility and gamma ray emissions from the radioelements K, eU and eTh were analyzed. The sampled data show that it is possible to differentiate clearly between the ore and the mafic rocks of the region. Magnetic susceptibility was efficient in the separation of the ore and the protore, jaspilite considering its respective mineralogical compositions: hematite and magnetite. The individualization of rock types as well allowed an unsupervised classification to the data, which shows the validity of the methods used in daily use of the exploitation of iron ore.

### Introdução

Atualmente, o minério de ferro é a principal *commodity* brasileira no âmbito econômico, sendo o maior bem de exportação nacional. O estudo de depósitos de minério de ferro quer seja no âmbito acadêmico ou prospectivo/econômico, tem avançado significativamente no cenário mundial. A utilização de métodos geofísicos tem tido cada vez mais relevância na etapa de prospecção dentro da mineração. Porém, no Brasil tais aplicações ainda são bastante restritas no que diz respeito à pesquisa do minério de ferro.

Com intuito de contribuir com esta demanda, esta pesquisa visa a utilização de dados petrofísicos, obtidos a partir de testemunhos de sondagem, para identificação das principais propriedades físicas do minério de ferro e suas encaixantes

A área de estudo está localizada no alvo N4WS, ainda em fase pré-exploratória, dentro do distrito mineiro Serra Norte, pertencente à VALE S.A, inserida no município de Parauapebas, Pará (figura 1). O distrito mineiro é composto pelas minas a céu aberto N4 e N5, além dos depósitos N1 a N3 e N6 a N9.

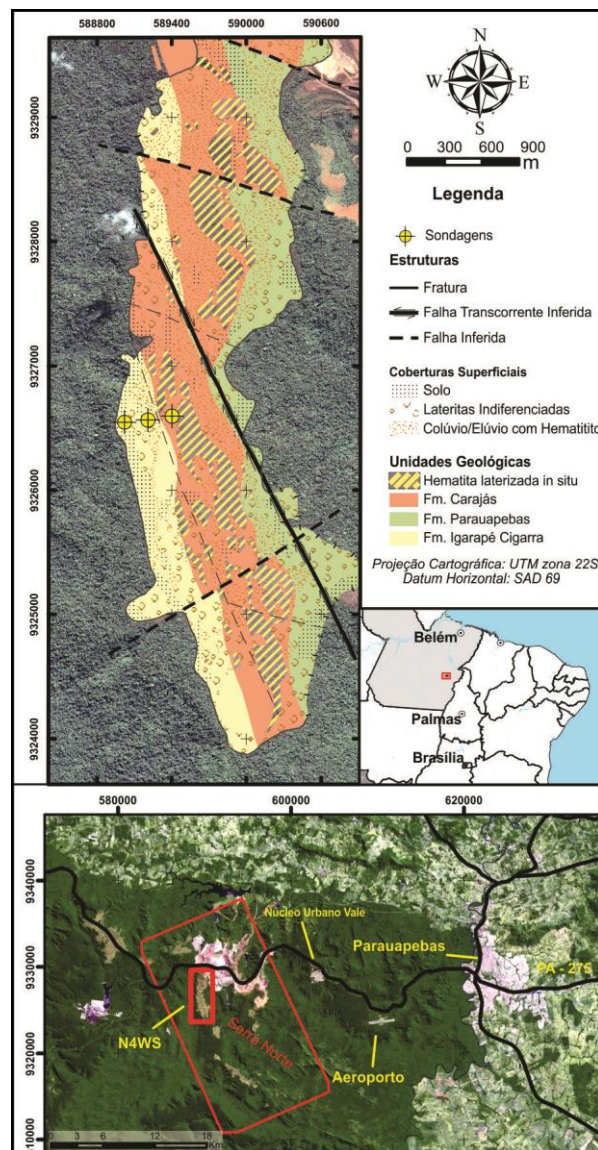


Figura 1 Mapa de localização da área com o respectivo mapa geológico do alvo N4WS.

### Aspectos Geológicos

A área de estudo está inserida na Província Mineral de Carajás, dentro da província geocronológica Amazônia Central, pertencente ao Cráton Amazônico (Tassinari & Macambria, 2004). A geologia da área basicamente o grupo Grão Pará. Esse compreende rochas metavulcânicas máficas e félsicas associadas a rochas

metassedimentares caracterizadas por lentes de formação ferrífera bandada, incluindo jaspilitos com minério de ferro. As metavulcânicas da base pertencem à Formação Parauapebas seguida em contato concordante com as formações ferríferas da Formação Carajás. O pacote superior de metavulcânicas é denominado como Formação Igarapé Cigarra (Macambira, 2003).

Segundo o primeiro relatório de pesquisa da área (Resende e Barbosa, 1972), atualizado posteriormente por Macambira (2003), e de acordo com o banco de dados fornecido pela Vale S.A. tem-se a seguinte denominação para os litotipos locais:

**Canga de Minério (CM):** cobertura laterítica que se forma sobre os afloramentos de minério *in situ*. Possui elevado teor em Fe e contaminantes relativamente baixos, permitindo seu potencial aproveitamento como minério;

**Canga química (CQ):** também denominada como cobertura lateríticas estéril, é derivada do regolito das rochas máficas ;

**Jaspilito (JP):** formação ferrífera bandada, ora com laminações centimétricas a milimétricas ora com padrão anastomosado. Por vezes as laminações surgem com alternância entre máficas e jaspe/chert. Ocorrem também brechas com fragmentos de jaspe englobados por matriz rica em magnetita. Representa o protominério na região, com teores de Fe entre 20 a 40%;

**Hematito Friável (HF):** minério de ferro, com teor médio de 66% de Fe. Altamente friável e poroso, estruturação do jaspilito parcialmente a totalmente obliterada devido à lixiviação da sílica. Coloração varia entre tons de cinza, às vezes amarelado associado com contaminações de alumínio;

**Máficas Sã (M):** basaltos, gabros e diabásios pouco a nada afetados pelo intemperismo. Tufos, de ambiente piroclástico, também são descritos porém de forma mais rara. Sistemáticamente cloritizados, com níveis ricos e restritos de talco. Ocorrem tanto como derrames como intrudidos dentro dos jaspilitos sob a forma de *sill* e *diques*;

**Máfica Semi-Decomposta (MS):** saprolito das rochas máficas, apresentando relictos da trama original do protolito ou até perda total da estrutura original.

## Métodos

Para a caracterização das propriedades físicas das rochas de foram coletados dados de susceptibilidade magnética e gamaespectrometria. Os dados foram obtidos a partir da medição de radiação gama, canais de contagem total e radioelementos K, eTh e eU, e susceptibilidade magnética em testemunhos de sondagem na porção central do alvo N4WS, com espaçamento regular entre medidas de 2 metros, totalizando aproximadamente 1700 amostras de diferentes litotipos.

Para a aquisição dos dados de susceptibilidade magnética e condutividade elétrica, 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) e valores de condutividade relativa e absoluta (mhos/m) em amostras (figura 2). Os parâmetros do equipamento indicam uma taxa de amostragem de 10 vezes por segundo e uma taxa apresentada a cada 0,5 segundo. A amostragem consistiu de três medições sequenciais com período de estabilização aproximado de 15 segundos.

Para a amostragem da emissão de radiação gama dos radioelementos K, eTh e eU foi utilizado o gamaespectrômetro portátil de 1024 canais RS-230, da *Radiation Solutions Inc.* 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) . As amostras foram submetidas à uma exposição de 5 minutos ao equipamento



**Figura 2** Sonda multiparâmetro MPP-EM2S+ para medição da susceptibilidade magnética; Gamaespectrômetro portátil RS-230;

Como as rochas do presente trabalho apresentam baixa concentração de radioelementos e para controle e eliminação de fontes externas de radiação foi utilizada uma caixa isolante construída em sua maior parte por chumbo não radiogênico, desenvolvida no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. O auxílio desse equipamento foi satisfatório de acordo com o objetivo proposto.

## Resultados e Discussão

Um total de 502 amostras foram medidas, o que gerou um banco de dados com resultados de susceptibilidade magnética e concentração de emissão de radiação gama, nos canais de K, U e Th e contagem total de radioelementos. As amostras englobam tanto o minério de ferro quanto as rochas encaixantes adjacentes descritas anteriormente. A amostragem foi realizada em 3 sondagens (F1023, F1348, F1495) espaçadas ao longo de uma seção na porção central do corpo N4WS.

Os dados são apresentados sob a forma box plot para melhor visualização estatística dos dados, de forma a facilitar sua discussão. Houve separação de acordo com o litotipo (figuras 3 e 4).

Os valores de susceptibilidade magnética mostram uma grande variação no intervalo analisado, partindo de amostras com valores nulos até o máximo de  $935,33 \times 10^{-3}$  SI, com uma média de  $60,16 \times 10^{-3}$  SI. O jaspilito (JP) e a hematita friável (HF) apresentam altos valores de susceptibilidade quando comparados às rochas adjacentes, porém o protominério possui valores muito

superiores ao minério, com médias de  $188,44 \times 10^{-3}$  SI e  $6,11 \times 10^{-3}$  SI respectivamente. As rochas máficas, juntamente com seu produto saprolitizado, tem baixa susceptibilidade magnética, sobretudo a rocha máfica semi-decomposta (MS) com valor médio de  $0,26 \times 10^{-3}$  SI. A rocha máfica (M) tem uma média de  $11,88 \times 10^{-3}$  SI. As cangas derivadas dos jaspilitos, canga de minério (CM), e das rochas máficas, canga química (CQ), também possuem baixos valores de susceptibilidade magnética, com médias de  $5,98 \times 10^{-3}$  SI e  $0,51 \times 10^{-3}$  SI, respectivamente.

A diferenciação através da média de valores da susceptibilidade magnética é eficiente, porém devido às características geológicas locais, como nível de alteração intempérica acentuado em razão do clima tropical e das próprias características locais, existe grande variação numérica nos litotipos. Para os jaspilitos, essa variação está entre  $2,44 - 935,33 \times 10^{-3}$  SI e os baixos valores são relativos às porções parcialmente alteradas, ligada à oxidação da magnetita, e também associadas à presença de corpos máficos (*sills* ou *derrames localizados*) dentro do pacote. O mesmo tipo de critério pode ser aplicado para a canga de minério e a porção mineralizada. O primeiro possui variação entre  $0,51 - 31,90 \times 10^{-3}$  SI e a hematita friável apresenta valores entre  $0,5 - 125,67 \times 10^{-3}$  SI. A canga de minério é majoritariamente pobre em magnetita, constituída essencialmente de óxidos e hidróxidos de ferro. O minério é resumidamente derivado da oxidação da magnetita para hematita. As rochas máficas e produtos de alteração, máfica semidecomposta e canga química, tem a seguinte variação de valores:  $0 - 46,43 \times 10^{-3}$  SI,  $0,13 - 0,66 \times 10^{-3}$  SI e  $0,15 - 1,11 \times 10^{-3}$  SI, respectivamente. Os valores anômalos de susceptibilidade magnética para as rochas máficas mostrados na FIGURA estão relacionados à proximidade com os jaspilitos, o que sugere uma interação entre ambos, como indicado em alguns níveis de jaspilitos cortados por *sills*, no qual esses são apresentados com fragmentos de chert e jaspe na sua matriz e também por alternâncias centimétricas de bandas de máfica e de jaspe.

Os dados obtidos com o uso do gamaespectrômetro para os litotipos estudados, com os valores de contagem total e dos três canais dos radioelementos potássio, urânio e tório, estão dispostos em cpm (contagens por minuto) ao contrário do padrão comumente utilizado (% e ppm). A escala padrão, derivada da transformação dos dados brutos, é exportada em cpm, porém a maior variação em cpm foi mais útil para a avaliação e diferenciação dos litotipos aferidos. Essa definição também levou em conta os baixos teores encontrados

De forma geral, os valores aferidos são bem semelhantes não apresentando nenhuma diferenciação marcante entre o minério e as rochas adjacentes. Pode-se destacar o alto valor relativo de potássio para as rochas máficas, com intervalos de valores entre  $0,80 - 48,10$  cpm e média de  $16,52$  cpm, valores bem superiores aos demais litotipos. As cangas de minério e química possuem valores médios mais elevados para tório em relação às demais rochas em virtude do seu enriquecimento natural derivado dos processos intempéricos locais. O tório acaba se concentrando nesse processo, pois é o radioelemento menos móvel. Anomalias positivas dentro

dessas variáveis, quando associados, podem ser interpretadas como possíveis indicadores de processos hidrotermais, ligados a diversos tipos de mineralizações (e.g. Pires, 1995)

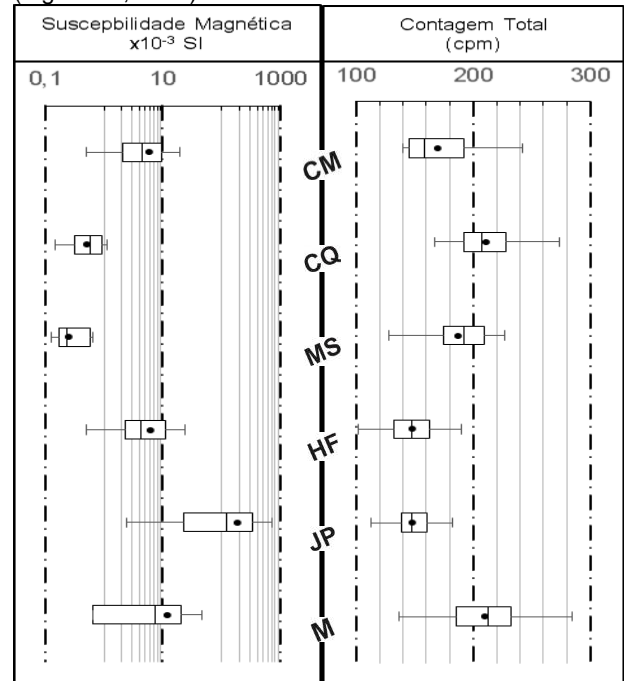


Figura 3 Boxplot da Susceptibilidade Magnética ( $\times 10^{-3}$  SI) e contagem total (cpm).

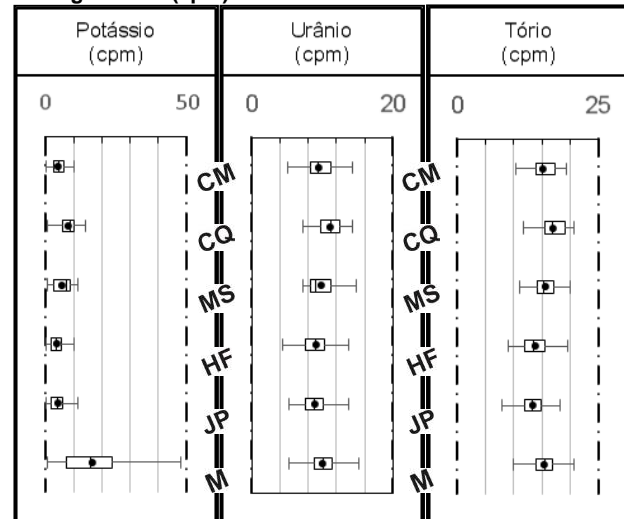
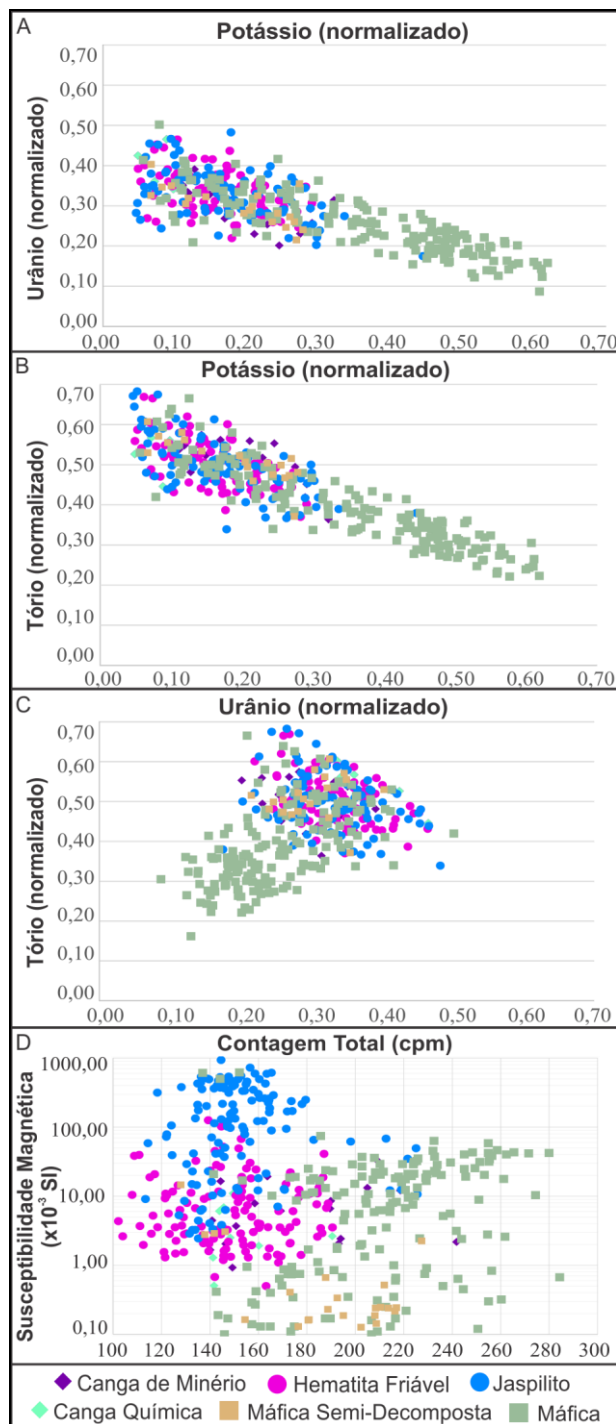


Figura 4 Boxplot para os canais de Potássio (K), Urânio (U) e Tório (Th).

Para incrementar a interpretação, foram gerados gráficos de correlação entre todos os parâmetros físicos analisados, pois além de permitirem uma melhor visualização também são úteis na classificação dos litotipos de acordo com suas características presentes. A figura 5 ilustra o exemplo os dados das 3 sondagens, com a relação entre si dos canais dos radioelementos e sua interação com a susceptibilidade magnética. Destaca-se o uso dos dados normalizados para os canais de K, U e Th, que retrata de forma mais fiel a interação entre esses radioelementos.





**Figura 5** Gráficos de correlação: **A)** Potássio versus Urânio. **B)** Potássio versus Tório. **C)** Urânio versus Tório. **D)** Contagem Total versus Susceptibilidade Magnética (valores em  $\log$ ). Os valores dos radioelementos estão normalizados.

Para o gráfico de potássio e urânio (figura 5A), há destaque para o *trend* negativo, indicando a maior tendência das rochas máficas serem mais ricas em potássio e pobres em urânio. Os demais litotipos não podem ser diferenciados diretamente porque todos apresentam baixa resposta de urânio.

A figura 5B, com a correlação entre potássio e tório, tem comportamento semelhante ao gráfico anterior, sendo observável uma maior declividade na relação entre o

aumento nos valores de potássio e decréscimo nos valores de tório. Não há qualquer tipo de diferenciação entre o minério de ferro, jaspilitos e cangas. As máficas novamente se destacam na maior resposta de potássio, mesmo assim uma quantidade considerável de amostras se comporta de maneira semelhante aos demais litotipos.

O gráfico de correlação urânio e tório (figura 5C) retrata bem o comportamento das rochas máficas do estudo. Mais ricas em potássio e empobrecidas em tório e urânio quando comparadas aos litotipos adjacentes. Jaspilitos, hematita friável, cangas química e de minério, possuem valores equiparados de urânio e tório normalizados.

Quando correlacionados os valores de contagem total e susceptibilidade magnética (figura 6D), há uma clara diferenciação entre os principais litotipos analisados. Apesar de apresentarem valores semelhantes para contagem total, jaspilitos e hematita friável são distinguíveis para o parâmetro de susceptibilidade magnética. Enquanto os valores dos jaspilitos estão predominantemente acima de  $100 \times 10^{-3}$  SI (com algumas exceções), a hematita friável está “confinada” abaixo desse valor. As rochas máficas com seus respectivos, possuem comportamento semelhante para susceptibilidade magnética, sempre restritos à faixa de  $10 \times 10^{-3}$  SI. Máficas com valores acima disso podem ser consideradas como produto de interação com os jaspilitos adjacentes ao contato. Tais rochas como esperado, se diferenciam pelos valores mais elevados de contagem total.

A partir da análise e visualização dos resultados das seções, uma abordagem individual dos furos torna-se interessante para identificar as possíveis anomalias. A sondagem F1495/N4WS se estende por quase toda a estratigrafia local e suas rochas são as mais bem preservadas, permitindo uma análise mais clara das propriedades físicas das rochas. O *log* dessa sondagem (figura 6A) mostra os três canais dos radioelementos e contagem total, os produtos de suas razões Th/K, U/Th, U/K e Fator F (Efimov, 1978) para visualização de possíveis enriquecimentos locais e susceptibilidade magnética.

Na observação do *log* é possível identificar as variações das propriedades físicas, mais precisamente da susceptibilidade magnética, do canal de contagem total (CT) e potássio, entre os jaspilitos e a máfica. Tal diferenciação dentro das propriedades físicas permite partir para uma classificação automática dos litotipos. Os dados petrofísicos foram submetidos à uma classificação não-supervisionada, onde se utilizou o algoritmo *K-means*, que fornece uma classificação baseada em análises e comparações entre os valores numéricos dos próprios dados, sem nenhuma supervisão ou pré-classificação. Por apresentarem grandezas diferentes (cpm, SI), os dados foram apenas padronizados pelas suas respectivas médias e desvios padrões. Cada furo seguiu uma determinação distinta no número de classes, em função das características geológicas. A princípio, a classificação seria satisfatória para determinação dos litotipos. A figura 6B ilustra o resultado da classificação comparado com os dados geológicos amostrados. Só foram utilizados os parâmetros de susceptibilidade magnética, contagem total e potássio pois esses

obtiveram os resultados mais satisfatórios no uso do método.

inserido um produto de aerogamaespectrometria: uma composição ternária RGB utilizando os canais de potássio, urânio e tório (Assis, 2013; Ferreira, 2014). A seção pode ser dividida pela falha normal mapeada em superfície. Na porção à oeste da falha temos mais uma vez a individualização dos litotipos canga química (CQ) e máfica semidecomposta (MS). Não há identificação de intervalos que correspondam à zona mineralizada. O jaspilito mostra um comportamento ambíguo com intervalos de alta e baixa susceptibilidade magnética, esses situados na base da seção. As rochas máficas descritas como *sills* mostram um halo de interação no contanto com o pacote de jaspilito, a qual sugere uma interação contemporânea ao momento da intrusão. À leste da falha normal, tem-se apenas um único furo de sondagem amostrado. Esse é composto basicamente por minério de ferro, tendo a base uma pequena porção de jaspilito seguida da rocha máfica. A análise do perfil identifica duas zonas anômalas com alta resposta no canal de contagem total do gamaespectrômetro. Ambas estão próximas, entretanto, a descrição geológica prévia não indica nenhuma particularidade dentro desses intervalos.

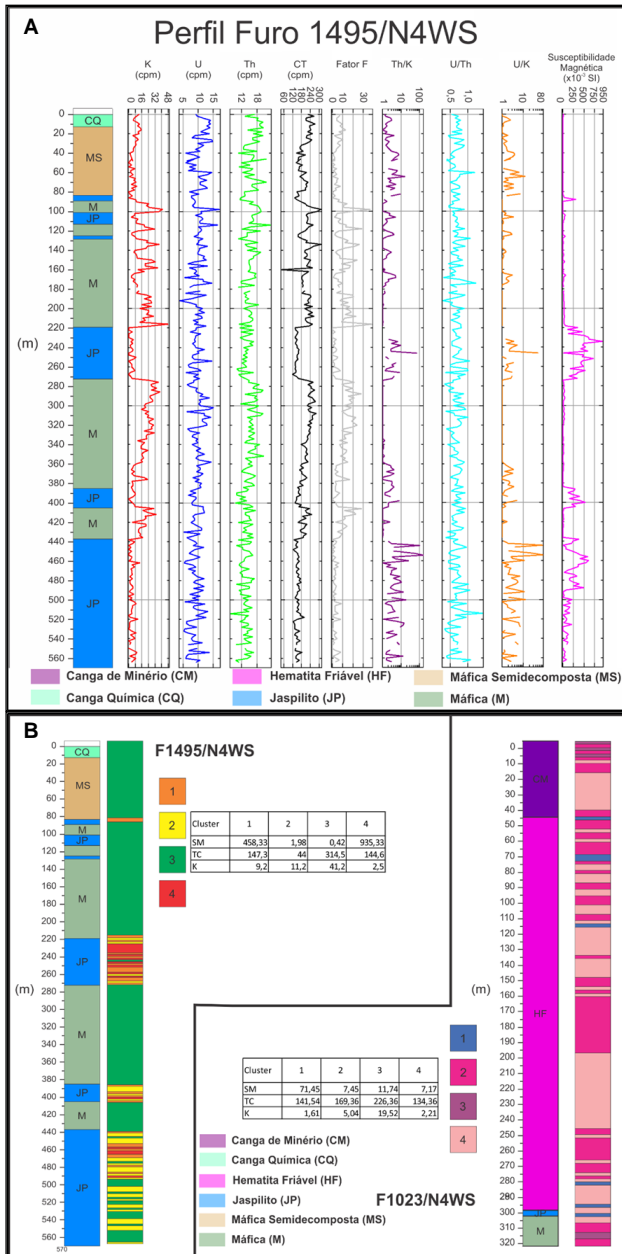
O posicionamento das sondagens dentro do produto aéreo propicia a correlação entre a resposta em superfícies das cangas e os valores amostrados na área.

**Conclusões**

Os resultados obtidos através da medição dos parâmetros físicos de susceptibilidade magnética e emissão de raios gama provenientes de radioelementos foram satisfatórios considerando que foi possível a caracterização das formações ferríferas, do minério de ferro e das rochas adjacentes do corpo N4WS através das propriedades físicas mencionadas.

A metodologia aplicada na medição dos parâmetros de susceptibilidade magnética e emissão de radioelementos permitiu um controle rigoroso dos dados durante a amostragem, destacando uso de uma caixa isolante composta essencialmente por chumbo não radiogênico para eliminações de fontes externas de ruído durante a aferição da concentração de radioelementos.

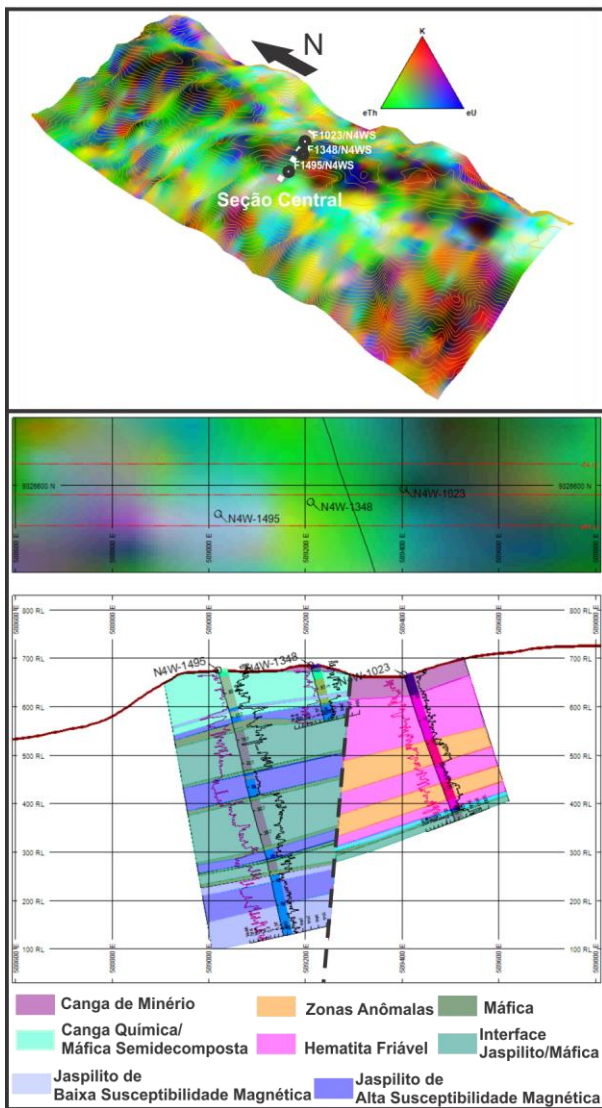
Já na análise dos dados foram diferenciados os jaspilitos, hematita friável e canga de minério das rochas máficas e seus produtos de alteração, máfica semidecomposta e canga química, com destaque para as variações de susceptibilidade magnética e para o canal de contagem total, que reflete a emissão de raios gama na amostra. A análise detalhada dos dados, que cortam perpendicularmente o corpo N4WS, sob de gráficos de correlação entre os dados dos três canais de radioelementos, da contagem total e da susceptibilidade magnética permitiu a identificação de uma correlação negativas entre 'potássio x urânio' e 'potássio x tório'. De fato, conforme análise dos gráficos envolvendo a susceptibilidade magnética, a hematita friável e os jaspilitos se diferenciam apenas por tal parâmetro. Assim, é possível sugerir a não participação de fluidos hidrotermais no processo mineralizador ou que os parâmetros escolhidos não se aplicam ao processo mineralizador. Entretanto, somente com as informações de propriedades físicas não se pode afirmar se tal evidência é válida



**Figura 6 A)** Log do furo F1495/N4WS com os perfis de resposta dos radioelementos, suas razões e a susceptibilidade magnética. **B)** Classificação não supervisionada dos dados petrofísicos do furo F1495/N4WS e F1023/N4WS.

De forma sumária, os mesmos resultados são obtidos para os demais furos amostrados. A classificação não supervisionada indica uma compartimentação dentro do jaspilito e do minério. Também ocorre uma “simplificação” de classes para os litotipos definidos como canga química (CQ), máfica semidecomposta (MS), e também para a canga de minério (CM) e a hematita friável (HF).

A classificação *K-means* foi útil no que se refere à diferenciação dos jaspilitos e intensidade de intemperismo, permitindo a confecção sumária de uma seção envolvendo a interpretação das sondagens amostradas (figura 7). Como auxílio para análise foi



**Figura 7** Seção com a interpretações das 'zonas petrofísicas' e respectivos furos de sondagem amostrados. Composição ternária RGB (K,eTh, eU) acima.

Como uma afirmação para este trabalho, a metodologia presente se configura como uma alternativa viável às ferramentas atualmente empregadas, e seu uso cotidiano dentro de um depósito de ferro certamente direcionará o uso dos recursos humanos e financeiros para uma exploração mais eficaz e de menor custo.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Vale S.A. pela cessão das amostras e também pelo fomento ao desenvolvimento científico através do Instituto Tecnológico Vale (ITV), prova de que o financiamento privado pode ser aplicado em parceria com as universidades.

### Referências

Assis, L. M. 2013. Geração de modelo exploratório para o minério de ferro da Província Mineral de Carajás através da integração de dados multifonte. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 154p.

Ferreira, V. N.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. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade de Brasília, Brasília, 204p.

Macambira, J.B. 2003. O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 217p.

Pires, A.C.B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. Revista Brasileira de Geociências, 25 (1): 61-68.

Resende N.P., e Barbosa A.L.M. 1972. Relatório de pesquisa de minério de ferro, distrito ferrífero da Serra dos Carajás, estado do Pará. AMZA, relatório final de pesquisa, v. 1, texto, 248 p, v. 2, mapas e seções geológicas, p. 119.

Tassinari, C.C.G. & Macambira, M.J.B. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito Neves, B.B. (eds.) Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, p. 471-485.