



**Caracterização mineralógica e geoquímica de perfis lateríticos do Complexo  
Máfico Ultramáfico de Niquelândia – GO**

**Diogo Sebastião Mury**

**Porto Alegre, 2017**

**DIOGO SEBASTIÃO MURY**

**Caracterização mineralógica e geoquímica de perfis lateríticos do Complexo  
Máfico Ultramáfico de Niquelândia - GO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientador:** Prof. Dr. Artur Cezar Bastos Neto

**Co-orientador:** Prof. Dr. Vitor Paulo Pereira

**Supervisor:** Prof. Dr. Egydio Menegotto

Porto Alegre, 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “Caracterização mineralógica e geoquímica perfis lateríticos do Complexo Máfico Ultramáfico de Niquelândia - GO”, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Dr. Bruno L. D. Horn

---

Prof. Dr. José Carlos Frantz

---

Profa. Dra. Juliana Charão Marques

## AGRADECIMENTOS

A vida é repleta de pessoas que iluminam e agregam valor à nossa caminhada. Agradeço à minha mãe Isabel e ao meu pai José, pessoas fundamentais na qual me forneceram todo o entusiasmo necessário nessa caminhada e aos meus irmãos, Alethéa, Gustavo e Kaian pelos conselhos ao longo da minha vida acadêmica.

Muito obrigado, Artur Bastos, Arthur Giovannini, Egydio Menegotto, Cláudio Porto e Vitor Pereira por serem essas pessoas fundamentais no meu caminho geológico, sempre me guiando para o lado da excelência acadêmica.

Obrigado aos técnicos, Lucas Cardozo Jantsch, Rafael Dillenburg Hofmann e Susan Martins Drago os quais me guiaram na utilização da microsonda cedido pelo CPGQ. Agradeço também aos técnicos Amanda Araújo Tosi e Iara Dornelles pela ajuda, disposição e carisma nos cinco dias de microsonda na UFRJ. Obrigado Denise e Marcelo por toda a ajuda na preparação das amostras, vocês foram essenciais.

Agradeço ao CNPq e a Votorantim por ter possibilitado e financiado esta pesquisa

## RESUMO

Este estudo apresenta novos conhecimentos obtidos a respeito dos processos supérgenos que atuaram na formação do Depósito de Níquel Laterítico de Niquelândia, Goiás, Brasil. Foram estudados três perfis de alteração desenvolvidos sobre rochas ultramáficas, em locais representativos do minério do depósito de Niquelândia. Os três perfis têm diferenças na espessura e nas composições química e mineralógica. O perfil 1, desenvolvido sobre dunito serpentinizado, é mais espesso, tem melhor definição de seus horizontes e é capeado por camada silicificada. Nele estão registrados três eventos ferralíticos intercalados com eventos argilosos (ferrossilicificação). O perfil 2, formado sobre peridotito, com menor espessura, tem apenas os eventos ferralíticos. O perfil 3, originado pela alteração de piroxenito, apresenta um evento argiloso, um ferralítico e um terceiro misto com argilas e materiais ferruginosos. Nas partes argilosas dos perfis de alteração, ocorre nontronita com substituição de  $\text{Fe}^{3+}$  por  $\text{Ni}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em diferentes proporções. Em alguns pontos, forma-se pimelita. Nas partes ferralíticas predominam óxido-hidróxidos de ferro amorfos, goethita e eventualmente hematita hidratada, associados a menores proporções de caulinita. Veios e bolsões associados às partes argilosas contêm asbolano, com alto teor de  $\text{Co}^{2+}$  e  $\text{Ni}^{2+}$ . A formação de argilominerais do tipo 2:1 (nontronita) indica que os horizontes argilosos se formaram durante períodos de drenagem incompleta, com lixiviação parcial da sílica. Os horizontes oxidados (ferralíticos) indicam períodos com drenagem acentuada e lixiviação aberta e perda da sílica. O capeamento silicificado indica período de drenagem confinada sem lixiviação da sílica e com possibilidade de aporte externo. O Ni está presente em diferentes materiais, tanto argilosos quanto oxidados. Concentra nos horizontes oxidados com Fe e Mn, mas seu ganho maior ocorre junto com o Co em veios e bolsões argilo-ferruginosos, onde se forma o asbolano. O alto enriquecimento do Ni não se deve somente a um único evento de intemperismo das rochas, mas indica ter havido suprimento de Ni proveniente de perfis de alteração anteriores sobrejacentes, que ocasionaram um enriquecimento prévio, caracterizando uma evolução polifásica.

Palavras-chave: Níquel Laterítico, Lateritização, Ferralilização, Intemperização.

## ABSTRACT

This study introduces insights about the processes involved in the formation of the Niquelândia lateritic nickel deposit in Goiás, Brazil. Three profiles of alteration developed on ultramafic rocks were studied in sites which are rich in nickel and have been economically extracted. The three profiles are similar to each other, but differ in thickness, chemical composition and mineralogical properties. The first profile developed on serpentinized dunite, is thicker and has a better definition of its horizons. There are three ferralitic events with intercalate clay events (ferrosilicification). Profile 2, formed on peridotite, less thick, has only the ferralitic events. The profile 3, originated on the pyroxenite, presents a clayey event, a ferralite and a third mixed with clay and ferruginous materials. In the clayey parts of the weathering profiles, nontronite occurs with substitution of  $\text{Fe}^{3+}$  by  $\text{Ni}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in different proportions. In some points, pimelite is formed. The ferralitic parts predominate amorphous iron oxides-hydroxides, goethite and occasionally hydrated hematite, associated to lower proportions of kaolinite. Veins and spots associated with the clayey parts contain asbolane, with high content of  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$ . The formation of 2:1 (nontronite) clayminerals indicates that the clayey horizons were formed during periods of incomplete drainage, with partial leaching of the silica. Oxidized (ferralitic) horizons indicate periods with sharp drainage and open leaching and loss of silica. The silicified cap indicates a confined drainage period without leaching of the silica and with a possibility of external contribution. Ni is present in different materials, both clayey and oxidized. It concentrates in the horizons oxidized with Fe and Mn, but its greater gains occur together with Co in clay-ferruginous veins and spots, where asbolane forms. The high Ni enrichment is not only due to a single rock weathering event, but indicates that there was Ni supply from previous overlapping alteration profiles, which preceded enrichment in polyphase processes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico qualitativo relativo ao preço da tonelada do níquel (acima) e cobalto abaixo).....	3
Figura 2. Mapa de localização e acesso ao município de Niquelândia. ....	5
Figura 3. Mapa geológico regional da região central de Goiás. Modificado de Pimentel et al. (2001)..	6
Figura 4. Mapa geológico modificado de Girardi, 1986. ....	8
Figura 5. Perfil esquemático mineralógico estruturalmente ideal para o furo de sonda 1 desenvolvido sobre dunito serpentizado. OL = Olivina, Srp = Serpentina, Chr = Cromita, Sme = Esmeclita, Qz = Quartzo, Hem = Hematita Caol = Caolinita, Gth = Goethita e Asb = Asbolano (o tamanho da fonte representa abundância). ....	22
Figura 6. Fotomicrografias: A) Amostra Niq 01 em LN; B) Amostra Niq 01 em LP; C) Amostra Niq 012 em LN; D) Amostra Niq 012 em LP. Qz = quartzo, Chr = cromita, Srp = serpentina e En = enstatita. ..	23
Figura 7. Amostras e suas respectivas seções petrográficas em luz polarizada. A = garnierita, B = esmeclitas com bordas de reação em matriz argilosa, C = laterita ferruginosa, D = cromitas em matriz plasmática. Asb = asbolano, Chr = cromita, Sme = esmeclita. ....	25
Figura 8. Difratoograma referente à amostra Niq 005. ....	27
Figura 9. Perfil esquemático mineralógico estruturalmente ideal para o furo de sonda 2 desenvolvido sobre dunito. OL = Olivina, Srp = Serpentina, Chr = Cromita, Sme = Esmeclita, Hem = Hematita, Bt = Biotita, Caol = Caolinita, Gth = Goethita e Asb = Asbolano (o tamanho da fonte representa abundância). ....	29
Figura 10. Seções petrográficas de luz natural (esquerda) e luz polarizada (direita) representativas das amostras Niq 013, Niq 117 e Niq 222. A = En = enstatita, Di = diopsídio e Ol = olivina. ....	30
Figura 11. Perfil esquemático mineralógico estruturalmente ideal para o furo de sonda 3 desenvolvidosobre piroxenito. En = Enstatita, Di = Diopsídio, Srp = Serpentina, Chr = Cromita, Sme = Esmeclita, Qz = Quartzo, Caol = Caolinita, Gth = Goethita (o tamanho dos caracteres. ....	32
Figura 12. Fotografia das amostras do perfil 3 .....	33
Figura 13. Distribuição em porcentagem dos óxidos de SiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e MgO no perfil 1.....	36
Figura 14. Distribuição em porcentagem dos óxidos de Co, Cu e Ni no perfil 1. ....	37
Figura 15. Distribuição em ppm de Sc, La, Y e Ce no perfil 1. ....	39
Figura 16. Distribuição em porcentagem dos óxidos de Co, Cu e Ni no perfil 2 .....	41
Figura 17. Distribuição em porcentagem dos óxidos de Co, Cu e Ni no perfil 1. ....	43
Figura 18. Diagrama ternário dos piroxênios analisados nas amostras Niq 016 e Niq 222. ....	45
Figura 19. Diagrama ternário totalizando 78 pontos analisados na amostra Niq 013. ....	49
Figura 20. Fotomicrografia de luz transmitida com os pontos analisados no espinélio. Amostra Niq 116. ....	51
Figura 21. Fotomicrografia de esmeclita (parte cinza), mostrando linhas de acúmulo de óxidos nplanos de clivagem (estrias claras). Pontos 001 e 003 = esmeclita e ponto 002 = goethita. ....	56
Figura 22. Diagrama ternário das análises das esmeclitas da amostra Niq 008.....	57
Figura 23. Gráfico que ilustra as percentagens de perdas e ganhos de Si, Fe e Mg no perfil 1, calculados em relação aos Al, pelo método isoalumínio (Krauskopf, 1972). Pontos 1 a 13 correspondem às amostras NIQ 01 a NIQ 013 (tabela 16). ....	64
Figura 24. Gráfico que ilustra as percentagens de perdas e ganhos de Mn, Cr, Ni e Co no perfil 1, calculados em relação ao Al, pelo método isoalumínio (Krauskopf, 1972). Pontos 1 a 13 correspondem às amostras NIQ 01 a NIQ 013 (tabela 16) .....	66

## LISTA DE QUADRO

Quadro 1. Discriminação dos métodos utilizados para análise química de rocha .....	18
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Furos de sondagem com suas respectivas profundidades e tipo de material identificado .....	21
Tabela 2. Composição química das amostras do perfil 1 - elementos maiores dados em percentagens de seus óxidos. ....	36
Tabela 3. Composição química das amostras do perfil 1 - elementos traço dados em ppm. ....	38
Tabela 4. Teores dos elementos maiores, dados em percentagem de seus óxidos.....	40
Tabela 5. Composição química das amostras do perfil 2. ....	41
Tabela 6. Teores dos elementos maiores, dados em percentagem de seus óxidos, representativos do perfil 3.....	43
Tabela 7. Composição química das amostras do perfil 3. ....	44
Tabela 8. Composição química dos ortopiroxênios – amostra NIQ 116 - peridotito. ....	46
Tabela 9. Composição química dos ortopiroxênios – amostra Niq 222 - piroxenito.....	46
Tabela 10. Composição química das micas no peridotito - amostra Niq 222.. ....	47
Tabela 11. Composição química das serpentinas em rocha sã - amostra NIQ 013 .....	48
Tabela 12. Composição química dos óxidos – espinélio (pontos 1 a 6, fig. 20) e hematita em peridotito, amostra NIQ 117 .....	51
Tabela 13. Composição química dos óxidos e hidróxidos ferruginosos na amostra Niq 220 do horizonte oxidado.....	52
Tabela 14. Composição química de concentrações de asbolano que ocorrem no horizonte silicatado.....	54
Tabela 15. Composição química das esmectitas da parte silicatada (garnierita) do horizonte de veios e bolsões do perfil 1, amostra Niq 008.....	55
Tabela 16. Tabela 16. Percentagens de perdas e ganhos dos elementos maiores no perfil 1. ....	61
Tabela 17. Percentagens de perdas e ganhos dos elementos maiores no perfil 2, calculados em relação à rochas sã (NIQ 104) .....	61
Tabela 18. Percentagens de perdas e ganhos dos elementos maiores no perfil 3.....	63

**LISTA DE ABREVIações**

ASB.....	Asbolano
BT.....	Biotita
CAOL.....	Caolinita
CHR.....	Cromita
CMUN.....	Complexo Máfico Ultramáfico de Niquelândia
DI.....	Diopsídio
EDS.....	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
EN.....	Enstatita
GO.....	Estado brasileiro de Goiás
GTH.....	Goethita
HEM.....	Hematita
QZ.....	Quartzo
OL.....	Olivina
SME.....	Esmeclita
SRP.....	Serpentina
WDS.....	<i>Wavelength Dispersive Spectroscopy</i>
ZGAS.....	Zona Gabro Anortosítica Superior
ZGIS.....	Zona Gabróica Interestratificada Superior
ZUA.....	Zona Ultramáfica Acamadada
ZBP.....	Zona Basal Primária
ZGB.....	Zona Gabróica Basal

## SÚMARIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. JUSTIFICATIVA.....	2
3. OBJETIVOS E METAS .....	4
4. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO .....	4
5. ESTADO DA ARTE .....	5
5.1 GEOLOGIA REGIONAL (PROVÍNCIA TOCANTINS) .....	5
5.2 GEOLOGIA DO COMPLEXO MÁFICO ULTRAMÁFICO DE NIQUELÂNDIA .....	7
5.3 GÊNESE E CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS SUPERGÊNICOS .....	9
5.4 ALTERAÇÃO SUPERGÊNICA NO CMUN .....	12
5.5 SUBPRODUTOS DO MINÉRIO DE NÍQUEL .....	14
6. METODOLOGIA.....	14
6.1 DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA .....	15
6.2 PREPARAÇÃO DE LÂMINAS DELGADAS PARA MICROSCOPIA .....	15
6.3 DESCRIÇÃO DE LÂMINAS PETROGRÁFICAS .....	16
6.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X .....	16
6.5 ANÁLISE QUÍMICA DE ROCHA TOTAL.....	17
6.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	18
6.7 MICROSSONDA ELETRÔNICA .....	19
7. RESULTADOS .....	20
7. 1. PETROGRAFIA.....	21
7.1.1. PERFIL 1 – FURO DE SONDAÇÃO CR13 33123 .....	21
7.1.2. PERFIL 2 – FURO DE SONDAÇÃO CR12 19920 .....	28
7.1.3. PERFIL 3 – FURO DE SONDAÇÃO CR12 9367 .....	31
7. 2. GEOQUÍMICA DE ROCHA TOTAL .....	35
7.2.1 PERFIL 1 – FURO DE SONDAÇÃO CR13 33123 .....	35
7.2.2. PERFIL 2 – FURO DE SONDAÇÃO CR12 19920 .....	39
7.2.3. PERFIL 3 – FURO DE SONDAÇÃO CR12 9367 .....	42
7. 3. QUÍMICA MINERAL .....	44
7.3.1. ORTOPIROXÊNIO .....	44
7.3.2. MICAS (BIOTITA-FLOGOPITA).....	47
7.3.3. SERPENTINAS .....	48
7.3.4. ÓXIDOS EM AMOSTRAS DE ROCHA.....	50
7.3.5. MINERAIS SECUNDÁRIOS NOS HORIZONTES DE INTEMPERIZAÇÃO.....	52
7.3.5.1. ÓXIDOS E HIDRÓXIDOS FERRUGINOSOS – HORIZONTE OXIDADO.....	52
7.3.5.2. ÓXIDO- HIDRÓXIDOS DE MANGANÊS E NÍQUEL – ASBOLANO. ....	53
7.3.5.3. ESMECTITAS .....	54
8. DISCUSSÃO .....	58
8. 1 OS PERFIS ESTUDADOS NO CONTEXTO MORFOCLIMÁTICO .....	58
8. 2 EVOLUÇÃO DOS PERFIS NO PROCESSO DE LATERITIZAÇÃO .....	60
9. CONCLUSÕES .....	68

## 1. INTRODUÇÃO

O Complexo Máfico Ultramáfico de Niquelândia (CMUN) é uma entre três intrusões neoproterozóicas (Barro Alto e Cana Brava) da Província Tocantins. Os perfis de alteração desenvolvido sobre rochas máficas e ultramáficas são ricos em níquel, extraído economicamente dos horizontes oxidados e silicatados. O níquel é um elemento químico metálico de grande importância para a formação de ligas metálicas com ferro, cobre, magnésio, zinco, cromo, vanádio e molibdênio tendo um elevado ponto de fusão (1453°C), suas propriedades podem aplicar resistência mecânica e química à corrosão e oxidação. Os primeiros registros de níquel no pólo minero-metalúrgico do CMUN são de 1908 pelos prospectores Helmut e Freimund Brockes (SEPLAN, 2005). Durante a segunda guerra mundial investidores norte americanos implantaram a Companhia Níquel Tocantins (CNT), na época caracterizada como a maior jazida de níquel do mundo. Após o encerramento da segunda guerra mundial, a jazida foi desativada e em 1957 foi comprada pelo Grupo Votorantim que reiniciou as atividades de extração somente em 1980 quando a usina de beneficiamento foi construída.

Atualmente, a competitividade gerada pelos grandes setores econômicos que comandam a extração de bens minerais é de fato desafiadora. O conhecimento científico de alto detalhe torna-se imprescindível para contemplar níveis de excelência econômica. O conhecimento petrográfico e geoquímico, de produtos e sub-produtos, compõe um escalão nesta etapa de excelência econômica aumentando as taxas de beneficiamento do minério. No CMUN há mineralizações de Co, Cu e Mn identificados como óxidos e hidróxidos em diferentes horizontes de alteração. A investigação desse subproduto irá prover importantes características geoquímicas e petrográficas a respeito da formação dos perfis de alteração, focado em subprodutos do níquel, desenvolvidos sobre as rochas máficas e ultramáficas de Niquelândia.

Óxidos e hidróxidos de cobalto são importantes minérios extraídos majoritariamente na República Democrática do Congo, como um recurso de classe mundial. Essa commodity tem sido de importância crítica como fator de desenvolvimento tecnológico em países desenvolvidos, e a sua disponibilidade tem sido restrita à produção africana. Hoje, com o refinamento da era tecnológica o uso desse elemento para utilização em baterias de lítion-íon, ímãs (para uso em *hard*

drives) e ligas aeroespaciais aumentou, trazendo novos desafios exploratórios a fim de manter a produção tecnológica em alto nível.

O presente trabalho concentra-se no estudo mineralógico e geoquímico de três furos de sondagens situados em dunitos, harzburgitos e websteritos. Os perfis de alteração se desenvolvem sobre rochas sãs, tendo nas porções intermediárias lateritas e serpentinitos originados por alteração endogênica, e no topo, uma cobertura silicosa, proteção anti-erosiva ideal para a preservação dos espessos horizontes de saprolitos originados pela alteração endogênica. Para a identificação e investigação dos horizontes de alteração bem como a rocha sã foram usadas técnicas analíticas como: petrografia, difratometria de raios X, microsonda eletrônica e análise química de rocha total.

## **2. JUSTIFICATIVA**

Atualmente a mineração liderada pela empresa Votorantim Metais na cidade de Niquelândia está estagnada pelo baixo preço do níquel. Em janeiro de 2017, os preços do níquel eletrolítico (99.8% níquel puro) segundo a LME (London Metal Exchange) eram de USD8,480 por tonelada, a maior baixa em 13 anos. Os baixos preços no começo do ano de 2017 são relativos a um excesso de suprimento de níquel no mercado, em especial as enormes ofertas produzidas pelas refinarias de Madagascar e Canadá. Problemas nas novas fundições de ferro-níquel no Brasil e na Nova Caledônia criaram fortes resistências para ascensão do preço do níquel. No meio de dezembro de 2016 os depósitos de stocks de níquel armazenados pela LME foram maiores do que 370.000 t de metal de níquel, quatro vezes maior do que no final de 2011 (91.000 t). A demanda do níquel para a utilização em metais, excluindo aço inoxidável, diminuiu muito devido à pouca atividade norteamericana referente a extração de óleo e gás natural, entretanto um forte crescimento na produção de baterias amenizou a perda da procura do níquel (USGS 2017).

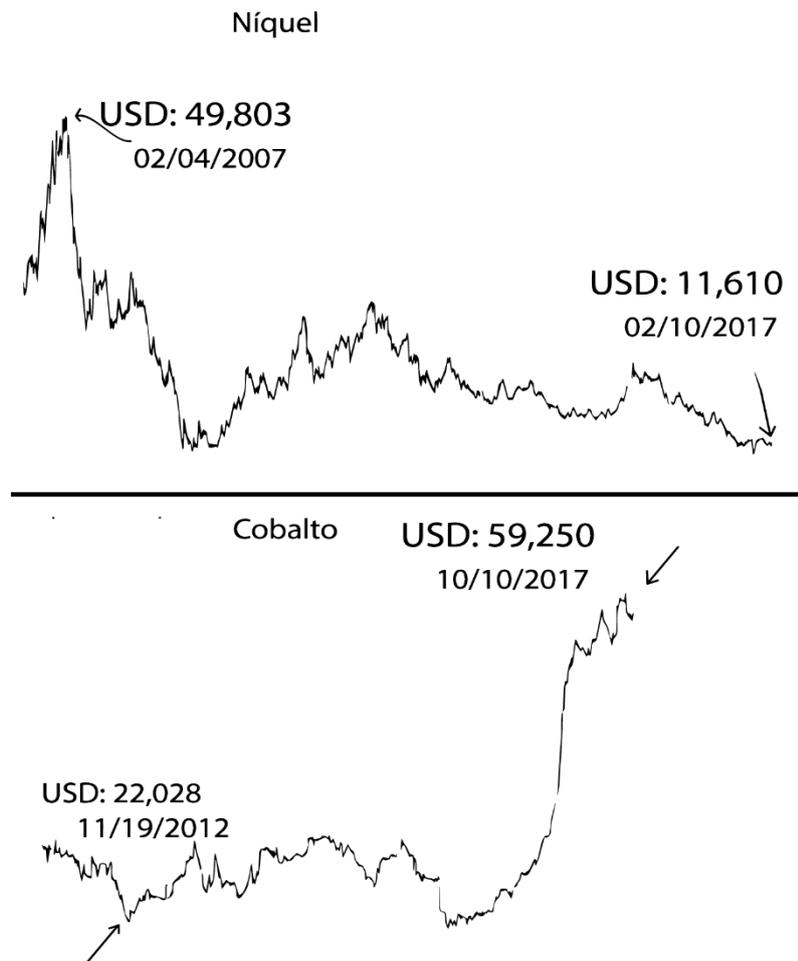


Figura 1. Gráfico qualitativo relativo ao preço da tonelada do níquel (acima) e cobalto (abaixo)

A República Democrática do Congo lidera a extração de cobalto em escala mundial, suprimindo mais da metade das necessidades de cobalto do mundo. Com a exceção da produção em Marrocos, a maioria do cobalto minerado é de subprodutos de níquel. Em 2016, a produção mundial de cobalto diminuiu, principalmente pela falta de operação e consequente queda na produção. O crescimento subsequente se deu pelo forte aumento na produção de baterias recarregáveis e ligas aeroespaciais. O cobalto é uma commodities de alto valor agregado no século XXI, com uma valorização de mais de 100% desde 2012, as previsões são de que seu

preço continue estável, devido à grande necessidade tecnológica de baterias recarregáveis e ímãs superpotentes, usados na fabricação de componentes computacionais (USGS 2017).

### **3. OBJETIVOS E METAS**

O objetivo deste trabalho é reconhecer e estabelecer as características e os critérios que permitam diferenciar as origens dos diferentes horizontes gerados a partir das rochas máficas e ultramáficas presentes na área de estudo, bem como determinar as suas transformações petrogenéticas através do tempo geológico.

Para atingir os objetivos foram realizados:

- i. Atividades de escritório envolvendo levantamento bibliográfico e recebimento de testemunhos de sondagem; trabalho de campo almejando a caracterização dos diferentes litotipos e conhecimento regional, relações entre os mesmos, estruturas presentes herdadas da rocha sã, tipos de alterações, etc.;
- ii. Atividades de laboratório, com destaque para descrição petrográfica, visando à caracterização petrográfica, a seleção de amostras para a realização de estudos mineralógicos e litoquímicos baseado em técnicas como difratometria de raios x, análises químicas de rocha total e análise de minerais por microsonda, tendo as seguintes metas a serem alcançadas.
- iii. Caracterização geoquímica e mineralógica da distribuição dos elementos de interesse no furo CR13 33123 (dunito), CR12 19920 (peridotito) e CR12 367 (piroxenito).

### **4. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO**

O CMUN localiza-se no município de mesmo nome (Fig. 2), distando 259km da capital estadual Goiânia, 300km da capital federal Brasília e 1500 km do Porto de Santos sendo o maior município do estado com grande extensão territorial de quase 10 milhões de km<sup>2</sup>. A cidade de Niquelândia pode ser acessada de forma viária pelas rodovias federais 080 e 414 partindo da capital federal Brasília ou a 153 e 414 partindo da capital estadual Goiânia.

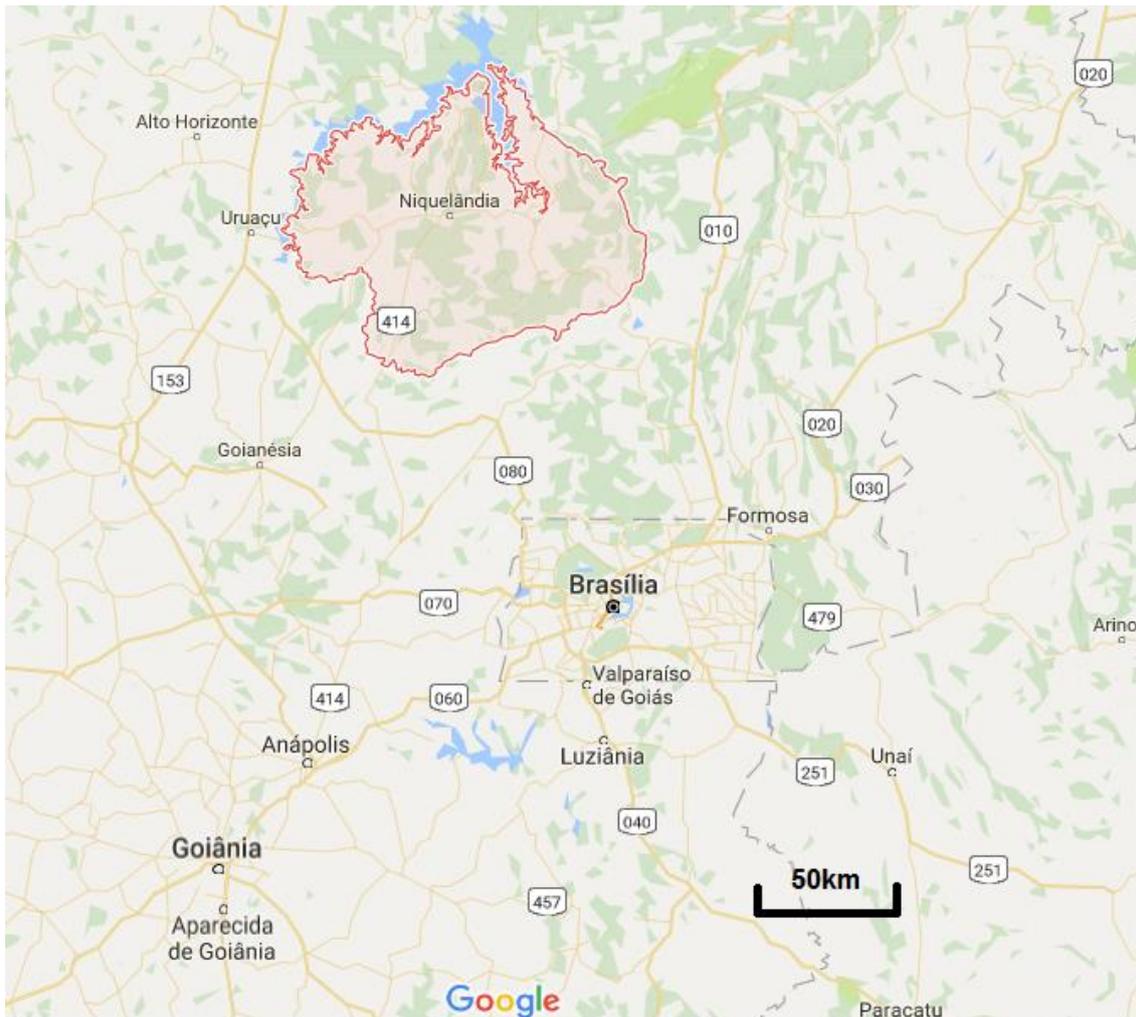


Figura 2. Mapa de localização e acesso ao município de Niquelândia.

## 5. ESTADO DA ARTE

### 5.1 GEOLOGIA REGIONAL (PROVÍNCIA TOCANTINS)

O CMUN, e unidades adjacentes pertencentes ao mesmo modelo genético intrusivo de rochas estratiformes máfico ultramáficos (Barro Alto e Cana Brava), estão inseridos na Província Tocantins (Mantovani & Brito Neves, 2005), um extenso orógeno colisional de idade neoproterozóica formado entre o cráton São Francisco/Congo e Paranapanema e o cráton Amazônico, (Pimentel *et al.* 1991; Pimentel & Fuck 1992; Fuck *et al.* 2006).

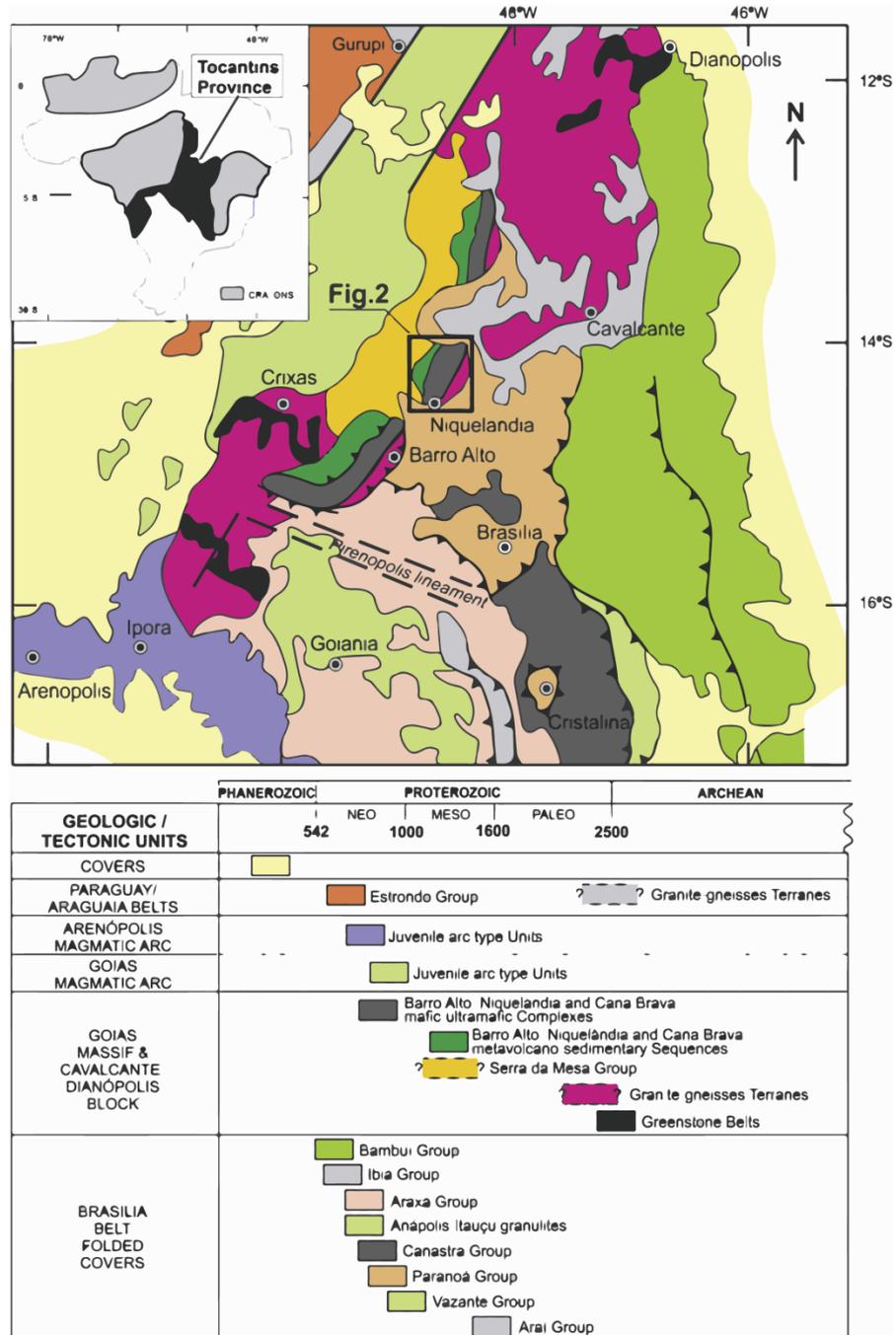


Figura 3. Mapa geológico regional da região central de Goiás. Modificado de Pimentel et al. (2001).

A Província Tocantins é uma mega unidade tectônica com direção aproximadamente N-S, tendo sua gênese no ciclo orogenético Pan-Africano/Brasiliano, durante o Neoproterozóico, ocasião em que amalgamou-se o supercontinente Gondwana (Unrug, 1992). Este continente viria a sofrer várias transformações fragmentando-se novamente a partir do Paleozóico-Mesozóico, resultando em uma abertura oceânica que resultaria na formação dos Oceanos

Atlântico e Índico e na abertura continental que formaria a América, África e Antártida, na formação do bloco continental indiano e no sub-continente da Austrália.

A Província Tocantins compreende as Faixas Araguaia e Paraguai, fazendo fronteira com o limite leste do Cráton Amazônico, e a Faixa Brasília na margem oeste do Cráton São Francisco, segundo Pimentel *et al.* (2000b) e Dardenne *et al.* (2000).

## 5.2 GEOLOGIA DO COMPLEXO MÁFICO ULTRAMÁFICO DE NIQUELÂNDIA

O CMUN tem sido alvo de muitos estudos, desde o primeiro trabalho de Pecora & Barbosa (1944), diferentes modelos tectônicos são apresentados sendo descrito como uma suíte Tipo Alpina (Da Costa e Angeiras, 1971), como um complexo pseudoestratiforme (White *et al.*, 1971), como um produto de cristalização fracionada de magma basáltico (Barbosa, 1978), como uma suíte proto-oiolítica pertencente a uma faixa móvel granulítica (Dani *et al.*, 1982; Moores, 2002) e como intrusões estratiformes relacionadas ao rift Neo ou Paleoproterozoico (Ferreira Filho *et al.*, 1994; Brito Neves *et al.*, 1995; Correia *et al.*, 1996; Pimentel *et al.*, 2004).

O CMUN (fig. 4) consiste principalmente de rochas gabróicas contendo, na sessão inferior, acamadamentos ultramáficos gerados por deposição cumulática com uma espessura de cerca de 4km. Bandamento e foliação são concordantes e orientados NNE-SSW, mergulhando 45°-50° para W na parte leste do complexo aumentando o seu mergulho para 60 ° para subvertical nas partes centrais e oeste. Baseado nos diferentes tipos de litologias, o CMUN é subdividido em Complexo Inferior e Complexo Superior, tendo uma espessura de 18km (Rivalenti *et al.*, 1982; Girardi *et al.*, 1986).

O Complexo Inferior consiste em quatro unidades estratigráficas, desde a base da intrusão (no leste) até acima, ZGB (zona gabróica basal) composta por grabronoritos, piroxenitos e peridotitos, ZBP (Zona Basal Primária) composta por dunitos maciços e harzburgitos), ZUA (Zona Ultramáfica Acamadada) tendo piroxenitos e peridotitos acamadados e ZGI (Zona Gabróica Inferior) composta por gabros, noritos e poucos piroxenitos, esta zona contém xenólitos oriundos da sequência vulcano-sedimentar Indaianópolis (Girardi *et al.*, 2006). O Complexo Superior consiste em duas unidades estratigráficas tendo na base uma zona hidratada entre a interface inferior e superior do complexo chamada de ZGIS (biotita

hornblenda gabro) e ZGAS (gabros e anortositos) que constitui o teto da intrusão no extremo oeste.

Essa estratigrafia é reconhecida pela maioria de pesquisadores e estudiosos de Niquelândia, entretanto diferentes nomes são ditos para a descrição das variadas unidades estratigráficas

Rivalenti *et al.* (1982) inferiu que a sequência de cristalização foi olivina (ol), espinélio (sp), ortopiroxênio (opx), clinopiroxênio (cpx), plagioclásio (pl) na ZGB, sp-ol-opx na ZBP, ol-cpx-opx-pl na ZUA e cpx-pl-opx na ZGI e anfibólio±cpx – pl na ZGIS e ZGAS, de acordo com o equilíbrio da cristalização de um magma residual rico em fases hidratadas.

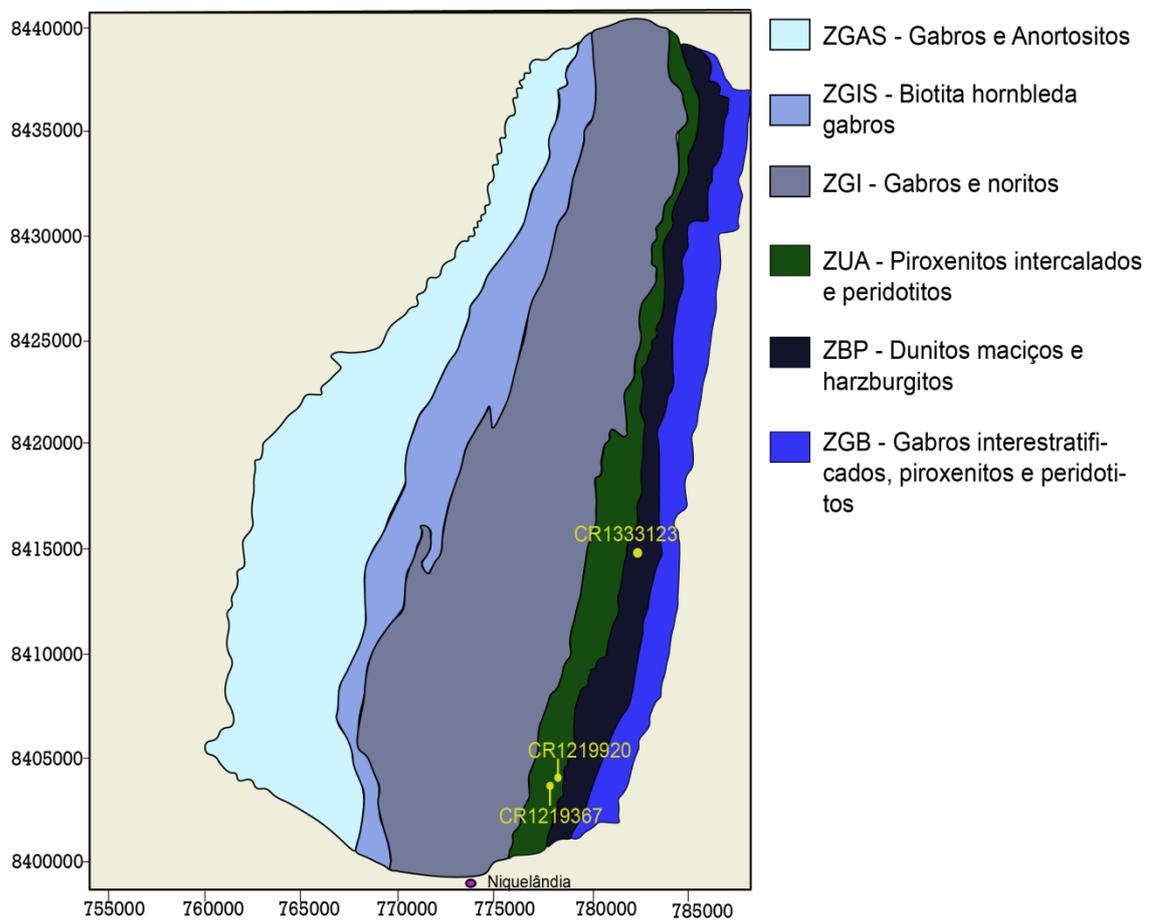


Figura 4. Mapa geológico modificado de Girardi, 1986.

O CMUN sofreu metamorfismo de fácies anfíbolito (700°C e 6-8kbars) no topo da estratigrafia ígnea (ZGAS e ZGIS) e metamorfismo de fácies granulito nas

porções mais profundas da intrusão (temperaturas superiores a 800 °C).

As idades estimadas para a cristalização do complexo variam de 2 Ga a 0.8 Ga (Ferreira filho *et al.*, 1994; Correia *et al.*, 1996, 1999; Ferreira Filho e Pimentel, 2000; Pimentel *et al.*, 2004). Baseados em datações de U-Pb Pimentel *et al.* (2004) argumentaram que o Complexo Inferior tem idade neoproterozoica ( $797 \pm 10$  Ma) e o Complexo superior mesoproterozoico ( $1248 \pm 23$ Ma). Nessas datações eles aferiram que o Complexo Inferior e o Complexo Superior são duas suítes ígneas justapostas tectonicamente. Pimentel *et al.* (2006) datou zircões cujas idades mostram a cristalização do Complexo Inferior em  $\sim 800$  Ma, apresentando idades similares às datações de Correia *et al.* (2006). Mas Correia *et al.* (2006) produziu datações para o Complexo Superior com idade de  $833 \pm 21$  Ma, tendo grandes discussões e divergências para a datação deste complexo.

### 5.3 GÊNESE E CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS SUPERGÊNICOS

Os principais fatores que controlam a formação das lateritas níquelíferas são: composição do protólito, contexto tectônico, topografia e geomorfologia, clima e taxa de meteorização (Gleeson *et al.*, 2003; Freyssinet *et al.*, 2005; Golightly, 1981, 2010).

Protólitos: as lateritas níquelíferas podem se desenvolver a partir de rochas ultramáficas ricas em forsterita formados em diferentes ambientes tectônicos (ofiolitos, complexos ígneos estratificados, komatiíticos e etc). Estes protólitos têm concentrações de Ni que variam de 0,2% a 0,4% em peso molecular. De todos os depósitos o principal tipo de rocha fonte dos depósitos de níquel laterítico são os peridotitos ofiolíticos, pois predominam harzburgitos e dunitos com diferentes níveis de serpentinização. O nível de serpentinização do protólito tem um controle importante sobre a formação dos jazimentos lateríticos de Ni-Co. Quanto maior o nível de serpentinização do protólito maior será o horizonte saprolítico, entretanto, os peridotitos com menor nível de serpentinização tendem a formar depósitos do tipo oxidado, com um horizonte saprolítico menos espesso (Gleeson *et al.*, 2003; Freyssinet *et al.*, 2005).

- Topografia: influi diretamente sobre as condições de drenagem, a posição do nível freático e a taxa de erosão. Para a preservação dos solos lateríticos são

necessárias superfícies erosivas menores do que 20° de declividade. Nas zonas em que a declividade é maior do que 20° a infiltração é escassa e grande parte da água escorre superficialmente, favorecendo a meteorização física, erodindo grande parte do material. As zonas elevadas permitem uma boa drenagem que facilita a eliminação do material solto. Nas zonas topograficamente mais altas, o nível freático se mantém baixo no perfil, sendo favorável para a formação de depósitos do tipo silicatado hidratado que contem importantes acumulações supergênicas de Ni nas partes profundas do horizonte saprolítico (Gleeson *et al.*, 2003; Freyssinet *et al.*, 2005; Golightly, 2010).. Em zonas caracterizadas por um relevo suave e não muito pronunciado a posição do freático é mais elevada sendo próximo da superfície, implicando que grande parte das rochas estejam em contato com a água e recebam uma quantidade menor de oxigênio. Nestas condições o fluxo reduzido de água reduz as taxas de lixiviação e extração das soluções meteóricas, favorecendo uma concentração de níquel residual. Se o substrato for dunítico estas condições de drenagem escassa podem favorecer a formação de horizontes oxidados. Se o protólito for um peridotito rico em piroxênios com as condições de drenagem limitadas e uma posição do nível freático alta, pode dar lugar à formação de depósitos argilosos (Freyssinet *et al.*, 2005; Golightly, 2010).

- Clima: as lateritas se formam principalmente em clima subtropical úmido e de savana. As temperaturas elevadas e as fortes chuvas combinadas com atividade biogênica favorecem o intemperismo químico necessário para formar os perfis lateríticos.
- Taxa de meteorização: os cálculos de balanço de massa indicam taxas de meteorização entre 5 e 50mm a cada 1000 anos, com uma taxa de média de 20mm a cada 1000 anos. O perfil laterítico poderia se desenvolver durante 1 a 6 milhões de anos (Nahon and Tardy, 1992). Usando as lateritas da Nova Caledônia, Trescases (1975) estimou uma taxa de laterização entre 140 e 125 m em 1 milhão de anos para zonas montanhosas, e uma ordem de magnitude inferior para zonas de mesas. No caso das zonas montanhosas a maior taxa de laterização é compensada parcialmente por uma maior taxa de erosão.

De acordo com a mineralogia do minério predominantes, os depósitos lateríticos de Ni-Co se classificam em três grandes tipos (Brand *et al.*, 1998; Elias, 2002; Gleeson *et al.*, 2003; Freyssinnet *et al.*, 2005):

- i. Depósitos de tipo silicatado hidratado: são os que têm maior quantidade de Ni dentro dos três tipos de depósitos lateríticos. O minério é constituído por silicatos hidratados de Mg-Ni (serpentina niquelífera e esmectitas ferro magnesianas e niquelíferas). Os depósitos do tipo silicatado hidratado se formam quando o soerguimento tectônico é contínuo e o nível freático se mantém baixo no perfil. Nesse momento a meteorização das rochas ultramáficas durante longos períodos de tempo podem desenvolver um importante horizonte saprolítico.
- ii. Depósitos do tipo óxido: o níquel está associado a oxi-hidróxidos de ferro, principalmente à goethita. O minério econômico se encontra na parte alta do horizonte saprolítico (saprolito ferruginoso) e na porção inferior do horizonte limonítico, caracterizado por uma limonita amarela.
- iii. Depósito do tipo argiloso: neste tipo de depósito o níquel se acumula em esmectitas (nontronitas e saponitas), normalmente sobre as partes superiores das saprolitos e na parte inferior do horizonte limonítico. Neste tipo de depósito a sílica foi parcialmente e individualmente lixiviada do perfil de meteorização.

Este tipo de complexo de rochas ultramáficas é extremamente suscetível ao enriquecimento supergênico de níquel, e de outros metais com afinidade geoquímica similares, sendo os serpentinitos a rocha mais comum no desenvolvimento destes perfis ultramáficos lateríticos (Golightky 1981, Oliveira *et al.* 1992). A composição química da rocha geradora representa o controle primário na formação do minério, pois a rocha ao sofrerem com os processos de intemperismo deve ter minerais capazes de liberar níquel (como olivina, piroxênio e anfibólio) de sua estrutura sendo assim capturado por fluidos subsuperficiais (Brand *et al.* 1998).

Um estágio importante na concentração do níquel supergênico sobre litotipos ultramáficos é a sua preservação pela erosão. A mineralização é dada por uma associação altamente variável de óxidos de Fe, Mn, Ni e Co, silicatos hidratados de

Mg e Co, sílica amorfa, serpentina, esmectitas e outras mineralogias argilosas tendo também grande quantidade de hidróxidos e óxi-hidróxidos (Brand *et al.* 1998, Marsh & Anderson 2011). Essas concentrações lateríticas são principalmente associadas a formas de relevo tabulares, onde superfícies anteriores (paleo-superfícies) são cobertas por latossolos concêntricos provocando um efeito de blindagem que impede a erosão do perfil e a dispersão do elemento (Melfi *et al.* 1980, Oliveira *et al.* 1992).

Os processos intempéricos compreendem cenários geomorfológicos e geoquímicos com uma evolução a longo prazo que controla a mobilização iônica ao longo do perfil, com deposição nos locais apropriados e preservação ao longo do tempo, com a maioria das concentrações sendo formada no Fanerozoico (Marsh & Anderson 2011).

#### **5.4 ALTERAÇÃO SUPERGÊNICA NO CMUN**

Niquelândia é caracterizada por clima tropical com seis meses de chuvas intensas e o restante com baixos índices de precipitação, tendo uma precipitação anual de 150 cm<sup>3</sup> com uma temperatura média de 23°C. A vegetação predominante é o cerrado, a população de gramíneas é do tipo *Velosia Compacta* e identifica a presença de piroxenitos (A. C. Pedroso, 1984).

Em Niquelândia apesar da enorme dimensão do maciço, a zona ultramáfica não é tão bem desenvolvida quanto em comparação a outros complexos, com dimensões relativamente estreita de 40x0.7x3km com orientação norte-sul. Os depósitos de níquel relacionados aos dunitos e peridotitos serpentinizados são constituídos por pequenos morrotes esféricos capeados por silcrete, este, formando uma proteção ideal para a não erosão das zonas alteradas abaixo.

O perfil de Jacuba, localizado na zona ultramáfica (ZUA) do CMUN, é formado pela intemperização de piroxenitos, o perfil tem a espessura de 30 m e consiste em quatro principais horizontes (horizonte argilo-ferruginoso, horizonte argiloso, horizonte saprolítico e horizonte coerente). O horizonte coerente representa os estágios iniciais de intemperismo. As rochas nessa região variam da coloração preto-esverdeado ao bege e têm densidades menores do que a rocha sã. Sua mineralogia consiste de diopsídio e enstatita que foram parcialmente alterados para esmectitas. O horizonte acima consiste se desenvolve a partir do intemperismo da

rocha fraturada, tem coloração marrom e é mais friável do que o horizonte coerente. O produto residual diminui de tamanho e se torna mais arredondado para cima, entre os blocos a matriz é esverdeada e cortada por fissuras centimétricas e milimétricas que são preenchidas por esmectita esverdeada, garnierita e asbolano. O horizonte argiloso não contém fragmentos da rocha, sendo composto por esmectitas verdes e marrons com pseudomorfos vermelhos de 1mm de piroxênios, a maioria das fraturas estão preenchidas por asbolano. O horizonte argilo-ferruginoso consiste em sua maioria de minerais vermelhos e brancos, identificados como goethita e caulinita. Essa parte do horizonte foi compactada e por isso perdeu todas as estruturas originais da rocha (Collin *et al.* 1990).

Um perfil típico de baixada varia de 8 a 20m e apresenta dois tipos de horizontes. O primeiro tipo, desenvolvido na base do perfil, é composto da rocha ultramáfica alterada que conserva sua estrutura original (saprolito). Esse tipo subdivide-se nos níveis 1, 2 e 3, que correspondem à rocha alterada ainda coesa, a um material friável, formado de blocos de rocha alterada em escassa matriz argilosa (saprolito grosseiro), e a uma camada onde a matriz argilosa é dominante sobre fragmentos cada vez menores da rocha alterada (saprolito argiloso). As espessuras dos saprolitos grosseiro e argiloso são de respectivamente, 2 a 4m e 2 a 6m. Nesses níveis saprolíticos, a densidade aparente decresce progressivamente de 2,6 a 3 na base, para 1,1 a 1,3 no topo, assim como o conteúdo de MgO e, com um certo atraso, o conteúdo de sílica; os conteúdos de Fe, Cr, Al e Ni, ao contrário, crescem com o grau de alteração do material. Do ponto de vista mineralógico, os saprolitos são principalmente compostos de silicatos ferro-magnesianos, como serpentina, clorita e esmectita. A garnierita pode ocorrer em veios, juntamente com o quartzo, cortando os níveis saprolíticos e em fraturas da rocha fresca. Os níveis saprolíticos representam o minério silicatado, cujo conteúdo em NiO está compreendido entre 1 e 5%. Nos horizontes saprolíticos, as fraturas são preenchidas por um material preto composto de hidróxidos de manganês, níquel, cobalto e ferro (asbolano). A passagem da rocha fresca ao saprolito argiloso é essencialmente isalterítica, com diminuição gradual da densidade aparente de 3,3 a 1,0 (Oliveira, S.M.B., 1990). Em resumo, no maciço de Niquelândia, o minério de níquel é principalmente do tipo silicatado, associado aos níveis de saprolito grosseiro e argiloso.

## 5.5 SUBPRODUTOS DO MINÉRIO DE NÍQUEL

As alterações de rochas ultramáficas geram subprodutos economicamente interessante para o cenário econômico atual, cadeias de óxidos de cobalto são um importante minério extraído em depósitos de classe mundial. O principal óxido de cobalto extraído na República Democrática do Congo (RPC) é chamado de “heterogenito”. Esse nome descreve um pó preto ou um óxido botrioidal encontrado na parte superior do horizonte oxidado de Cu-Co formado no Neoproterozóico. A maior reserva deste tipo de minério se localiza na RDC, a maioria do minério é observado em óxidos e óxi-hidróxidos como o heterogenito  $[\text{HCoO}_2]$  e asbolano  $[(\text{Ni},\text{Co})_{2-x}\text{Mn}(\text{O},\text{OH})_{4+n}\text{H}_2\text{O}]$  nas quais são dificilmente diferenciáveis pois exibem hábito e texturas similares. Esses minerais são frequentemente observados em ambientes similares tendo uma pobre cristalização sendo muito difícil a sua caracterização por difratometria de raios X. A sua composição química não é muito bem entendida visto que eles têm significantes substituições químicas com os cátions de Cu, Co, Ni e Mn (Vanbrabant *et al.* 2013).

## 6. METODOLOGIA

O trabalho propõe uma abordagem integrada das rochas estudadas do ponto de vista petrográfico e geoquímico visando além de caracterizar pontualmente cada furo de sondagem investigar os processos que envolveram o intemperismo destas rochas.

O trabalho foi dividido em três etapas:

- i. Etapa pré-campo: resgate bibliográfico sobre o CMUN e sua metalogênese focada nos produtos de níquel. Recebimento de três furos de sondagem cedidos pela Votorantin Metais. Descrição e seleção das amostras com intuito de preparação de lâminas delgadas, análises químicas de rocha total e preparação para a difratometria de raios X.
- ii. Etapa de campo: reconhecimento regional da área estudada, introdução ao CMUN, apresentação à equipe de geólogos da Votorantin Metais e prática de “*brain storm*” sobre as possíveis mineralizações secundárias ricas em Co e Ni.

- iii. Etapa pós campo: compilação e tratamento dos dados obtidos pelas técnicas analíticas feitas na etapa de pré-campo, seleção e preparação das amostras para encaminhamento a microscopia eletrônica de varredura e microssonda eletrônica e posterior compilação dos dados obtidos.

O projeto teve início com três furos de sondagem cedidos pela Votorantim Metais com o intuito de investigar mineralizações associadas à alteração destas rochas ultramáficas. Os furos de sondagem (verticais) escolhidos foram o CR13 33123, CR1219920 e CR1219367 tendo, respectivamente recuperação e coordenadas:

67,6 metros, Y 8414799,615, X 781249,839 e Z 1107,72;

10,4 metros, Y 8403900,205, X 778960,175 e Z 981,63;

24 metros, Y 8403749,894, X 7788802,489 e Z 1024,99

As amostras foram coletadas com o intuito de serem descritas com foco petrográfico e geoquímico, aplicando técnicas de microscopia óptica, difratometria de raios X, análise química de rocha total, microscópio eletrônico de varredura e microssonda eletrônica.

### **6.1 DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Após o recebimento dos furos de sondagem as 22 amostras foram fotografadas com uma câmera digital Olympus de 12Mp e descritas macroscopicamente identificando a sua dureza, coesão, cor, estrutura, química (quantidades de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), mineralogia secundária e minerais formadores da rocha bem como seus acessórios.

### **6.2 PREPARAÇÃO DE LÂMINAS DELGADAS PARA MICROSCOPIA**

As amostras foram enviadas para os laboratório de laminação da UFRGS e da Unisinos nos quais foram confeccionadas lâminas delgadas com espessura de 30  $\mu\text{m}$ . As amostras laminadas têm coesão e permeabilidade baixas sendo de difícil impregnação, ocorrendo baixas na preparação das lâminas delgadas, das 22 amostras selecionadas apenas 20 tiveram êxito na preparação, nenhuma lâmina recebeu polimento após esta etapa de laminação.

### 6.3 DESCRIÇÃO DE LÂMINAS PETROGRÁFICAS

As descrições petrográficas de lâminas delgadas foram realizadas ao microscópio ótico de luz transmitida e de luz refletida. A petrografia ótica detalhada buscou a identificação das espécies minerais primárias e secundárias, diagnosticando possíveis ordens de cristalização e a caracterização das paragêneses e associações minerais presentes em diferentes horizontes de alteração.

Esta etapa contou com o auxílio de um microscópio óptico marca Leica, modelo DMLP, do Grupo de Pesquisa Mineralogia e Geoquímica de Depósitos Minerais do Instituto de Geociências da UFRGS, que possibilitou análises em luz natural, polarizada, transmitida ou refletida, com aumentos entre 25x e 500x. Este microscópio foi utilizado acoplado a uma câmera digital ligada a um microcomputador. Este estudo teve extrema importância, tendo em vista que direcionou as técnicas utilizadas subsequentemente.

### 6.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

O objetivo da difratometria de raios X é a identificação de materiais cristalinos cujo poder de identificação no microscópio petrográfico é reduzido, sendo geralmente argilominerais. A técnica consiste em emitir através de uma fonte geradora de raios X de um difratômetro, um feixe de raios X que atingem a amostra em análise. Quando este feixe atinge o material diversos raios são difratados em várias direções pelos elétrons presentes na rede cristalina satisfazendo a expressão matemática da lei de Bragg:

$$n \lambda = 2d \sin\theta$$

Onde  $n$  é um número inteiro,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $d$  é a distância entre os planos paralelos sucessivos na estrutura cristalina, e  $\theta$  é o ângulo de incidência e difração de um feixe de raios X relativamente a um dado plano atômico.

O resultado deste tipo de análise é apresentado sob a forma de um gráfico, o difratograma, cujas variáveis são o ângulo  $2\theta$  versus a intensidade dos picos difratados (eixo vertical). Os picos do difratograma são produzidos quando, para um

dado valor de  $\theta$ , um dado plano atômico possui distância interplanar ( $d$ ) que satisfaz a lei de Bragg, materiais que apresentam cristalinidade baixa não respondem bem ao método analítico de difratometria de raios X, ao total 4 amostras tiveram intensidades baixas, sendo a utilização de outros métodos essencial para a identificação mineral destes materiais com cristalinidade baixa.

Para a difratometria de raios X foram selecionadas 18 amostras nas quais foram moídas e pulverizadas manualmente em gral de porcelana, o gral de porcelana foi devidamente limpo entre uma moagem e outra com água destilada e álcool etílico 99,9%. As difratometrias de raios-x foram realizadas no Instituto de Geociências da UFRGS em difratometro SIEMENS D-5000, utilizando radiação  $\text{Cu-K}\alpha$  e filtro de Ni, no intervalo entre 2 e  $80^\circ 2\theta$ , com velocidade de  $2^\circ 2\theta$  por segundo. Para o tratamento dos dados dos difratogramas foi utilizado o programa Match 1.01 (desenvolvido pela Crystal Impact).

## 6.5 ANÁLISE QUÍMICA DE ROCHA TOTAL

As análises químicas de elementos maiores, menores e em traço, por ICP-MS em rocha total, foram efetuadas no Laboratório Bureau Veritas Commodities Canada Ltd. Foram feitas correlações estatísticas dos elementos químicos através dos resultados obtidos por ICP, utilizando o programa Excel 2010, do Microsoft Office 2010 aliado com illustrator CC 2015 desenvolvido pela Adobe® para a confecção e produção de gráficos e correlações químicas primeiramente entre todas as amostras e posteriormente dentro de cada uma das subdivisões macroscópicas e químicas previamente identificadas. Os teores de elementos maiores, traços e terras raras foram determinados pela *ACME Analytical Laboratories LTD*, em Vancouver, no Canadá, via ICPMS, após fusão com metaborato / tetraborato de lítio e digestão com ácido nítrico diluído. Os métodos e os elementos analisados estão apresentados no quadro 1 com seus respectivos limites de detecção.

Quadro 1. Discriminação dos métodos utilizados para análise química de rocha (QR)

Método de análise	Elementos analisados (limite de detecção)
ICP-ES Fusão com LiBO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> (0,04%), Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (0,03%), Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (0,04%), CaO (0,01%), MgO (0,01%), Na <sub>2</sub> O (0,01%), K <sub>2</sub> O (0,04%), MnO (0,01%), TiO <sub>2</sub> (0,01%), P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (0,01%), Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (0,001%), Ba (5ppm), Ni (20 ppm), Sc (1ppm), Sr (10ppm), Y (10ppm), Zr (10ppm).
ICP-MS Fusão com LiBO <sub>2</sub>	Ba (0,5 ppm), Be (1ppm), Co (0,5 ppm), Cs (0,1 ppm), Ga (0,5 ppm), Hf (0,5ppm), Nb (0,5ppm), Rb (0,5ppm), Sn (1ppm), Sr (0,5 ppm), Ta (0,1ppm), Th (0,1ppm), U (0,1ppm), V (5ppm), W (0,1ppm), Y (0,1 ppm), Zr (0,5ppm), La (0,5ppm), Ce (0,5ppm), Pr (0,02 ppm), Nd (0,4ppm), Sm (0,1 ppm), Eu (0,05ppm), Gd (0,05ppm), Tb (0,01ppm), Dy (0,05ppm), Ho (0,05ppm), Er (0,05ppm), Tm (0,05ppm), Yb (0,05ppm), Lu (0,01ppm).
ICP-MS Fusão com água régia	Au (0,5ppb), Ag (0,1ppm), As (1ppm), Bi (0,1 ppm), Cd (0,1ppm), Cu (0,1ppm), Hg (0,1ppm), Mo (0,1 ppm), Ni (0,1ppm), Pb (0,1ppm), Sb (0,1ppm), Se (0,5ppm), Tl (0,1ppm), Zn (1ppm).
ICP-MS Fusão com água régia	Ag (0,1ppm), As (0,5ppm), Au (0,5ppb), B (1ppm), Bi (0,1ppm), Co (0,1ppm), Cu (0,1ppm), Mo (0,1ppm), Ni (0,1ppm), Pb (0,1ppm), Sb (0,1ppm), Sc (0,1ppm), Se (0,5ppm), Zn (1ppm).

## 6.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As lâminas delgadas selecionadas Niq 04 e Niq 08, receberam polimento com pasta de diamante, e a metalização feita a ouro com uma fina película de 20 nm, estando prontas para a utilização no instrumento eletrônico. A microscopia eletrônica de varredura com “*Energy Dispersive Spectroscopy*” acoplado é um método qualitativo e semi-qualitativo de alta precisão que produz imagens de alta ampliação (1.000.000 x). Através das imagens geradas e do EDS acoplado será possível identificar paragêneses minerais secundárias que sejam ricas em Co e Ni. As análises foram feitas no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS em Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss EVO MA10, um modelo convencional com um filamento de tungstênio que opera em tensões de 0.2 kV até 30kV. O microscópio está equipado com detectores de elétrons secundários de câmara, detector de elétrons retroespalhados (BSD), e detector de raios X característicos (EDS). Aplicações possíveis nesse MEV incluem observações convencionais de imagem em elétrons secundários (SEI), imagens em elétrons retroespalhados (BEI) e microanálise química elementar (EDS). A imagem eletrônica de varredura representa em tons de cinza o mapeamento e a contagem de elétrons secundários (SE - *secondary electrons*) e retroespalhados (BSE - *backscattering electrons*) emitidos pelo material analisado. A imagem de SE fornece detalhes da superfície

ionizada do mineral em tons de cinza, os tons mais claros podem representar as faces do mineral orientadas para o detector, bem como defeitos da metalização e bordas do mineral. A resolução obtida em imagens de SE corresponde ao diâmetro do feixe de elétrons incidente, e que pode variar de acordo com as especificações do equipamento utilizado na análise. Outro condicionante de resolução para a imagem de SE são as condições de calibração do aparelho, tal como a intensidade da corrente e condições de vácuo. A imagem de BSE (*backscattering electrons*) é gerada pela emissão de elétrons retroespalhados e demonstra diferenças composicionais na região ionizada do mineral.

## 6.7 MICROSSONDA ELETRÔNICA

Para análises quantitativas de alta precisão foram usadas duas microsondas eletrônica: uma provida pelo Instituto de Geociências da UFRGS modelo Cameca SXFive, com 5 espectrômetros WDS e um EDS, e outra provida pelo Departamento de Geologia da UFRJ. As 4 amostras selecionadas, Niq 04, Niq 08, Niq 116, Niq 22 e Niq 220 foram polidas com pasta de diamante e limpas com álcool 99,9%. Após o procedimento primário padrão para otimizar a acuidade do método as amostras foram metalizadas em carbono com espessura de 20 nm em uma metalizadora Jeol JEE 4Be. As análises produzidas possuem um erro de duas casas decimal.

A microsonda eletrônica é uma técnica não destrutiva utilizada para determinar composições de sólidos com pequenas quantidades materiais. Um feixe com alta energia é usado para bombardear a amostra e gerar raios-x característicos de volumes pequenos como 1 micrômetro. Os raios x resultantes podem ser (1) difratados em cristais analisados usando WDS (*Wavelength-Dispersive Spectrometry*) ou (2) detectados diretamente usando EDS (*Energy-Dispersive Spectrometry*). As composições elementares são determinadas comparando intensidades de raios X de materiais conhecidos (padrões). Os padrões utilizados para as análises foram: Si e Ca em CaSiO<sub>3</sub> GEO MK II (*P&H Developments*), Mg em Diopsídio, Fe em Almandina, Mn em Rodonita GEO MK II, V em V (metal), Cr em Óxido de cromo, Co em Skuterudita, Ni em Ni GEO MK II (metal), Na em Albita, Al e K em Sanidina, Ti em Rutilo, Fe em Hematita, Ba em Barita. As condições dos feixes variam de acordo com o mineral, minerais como a olivina tem como característica a

configuração de 15 keV e 25 nA e diâmetro de feixe com 5 µm, enquanto que o piroxênio a configuração é 15 keV, 15 nA e 1 µm, pois as camadas de valência precisam de menor energia para serem ejetadas comparadas a olivina. Os cristais utilizados foram TAP, PET e LIF. Minerais que contém H<sub>2</sub>O têm em geral configuração de feixe diferenciada, pois se o feixe for demasiado intenso em uma área pequena este rapidamente se volatizará e provocará erros na leitura espectrométrica, então as configurações usadas foram com intensidade elétrica menores e diâmetros maiores que os minerais anidros. As seções foram acompanhadas pela técnica em química Susan Martins Drago e o técnico em eletrônica Lucas Cardozo Jantsch na UFRGS e pelas técnicas Amanda Araújo Tosi e Iara Dornelles na UFRJ.

Após a realização de 9 seções, 8 diurnas e uma noturna os dados foram compilados no Excel 2010 desenvolvido pela Microsoft, na qual foi usado para calcular sistematicamente as razões elementares dos minerais.

## 7. RESULTADOS

Os estudos foram centrados em três perfis, que correspondem aos furos de sondagem CR13 33123, CR12 19920 e CR12 9367, obtendo-se um total de 22 amostras (Tabela 1):

O furo de sondagem CR13 33123, correspondente ao perfil de alteração sobre rochas duníticas, se encontra na Zona Basal Primária (ZBP), enquanto que os furos de sondagem CR12 19920 e CR12 19367 que são perfis de alteração desenvolvidos sobre peridotitos e piroxenitos intercalados localizam-se na borda sul da Zona Ultra-Máfica (ZUA) do CMUN. Os resultados foram divididos em 3 partes:

- i. Inicialmente são apresentados os dados petrográficos, com os estudos macroscópicos, microscópicos e com apoio de MEV e de DRX;
- ii. Após são apresentados dados de análises químicas de rocha total;

- iii. Na terceira parte constam os dados de análises químicas pontuais sobre minerais, através de microsonda eletrônica

Tabela 1. Furos de sondagem com suas respectivas profundidades e tipo de material identificado

<b>Furo de sondagem CR13 33123</b>		
Amostra	Prof. Metros	Tipo
Niq 001	3,35	Silcrete
Niq 002	13,95	Silcrete
Niq 003	16,9	Oxidado Co
Niq 004	18,5	Silicatado Co
Niq 005	19,5	Silicatado Co
Niq 006	22,5	Oxidado
Niq 007	27	Oxidado Al
Niq 008	41,3	Silicatado
Niq 009	49	Silicatado
Niq 010	56,9	Oxidado
Niq 011	67,8	Oxidado
Niq 012	69,5	Piroxenito
Niq 013	70,95	Dunito Serp.
<b>Furo de sondagem CR12 19920</b>		
Amostra	Prof. Metros	Tipo
Niq 114	10,5	Oxidado
Niq 115	16	Oxidado
Niq 116	20	Peridotito
Niq 117	20,9	Peridotito
<b>Furo de sondagem CR12 9367</b>		
Amostra	Prof. Metros	Tipo
Niq 218	34,5	Silicatado Co
Niq 219	47	Silicatado
Niq 220	50,4	Oxidado
Niq 221	55	Piroxenito
Niq 222	58,5	Piroxenito

## 7. 1. PETROGRAFIA

### 7.1.1. Perfil 1 - Furo de sondagem CR13 33123.

Na sondagem foram recolhidas para este estudo as amostras do intervalo entre 3,35m e 75m (Fig. 5), porque é neste intervalo que se encontra a alteração superficial até alcançar a rocha sã, que é representada por um dunito serpentizado. A descrição será feita da base para o topo.

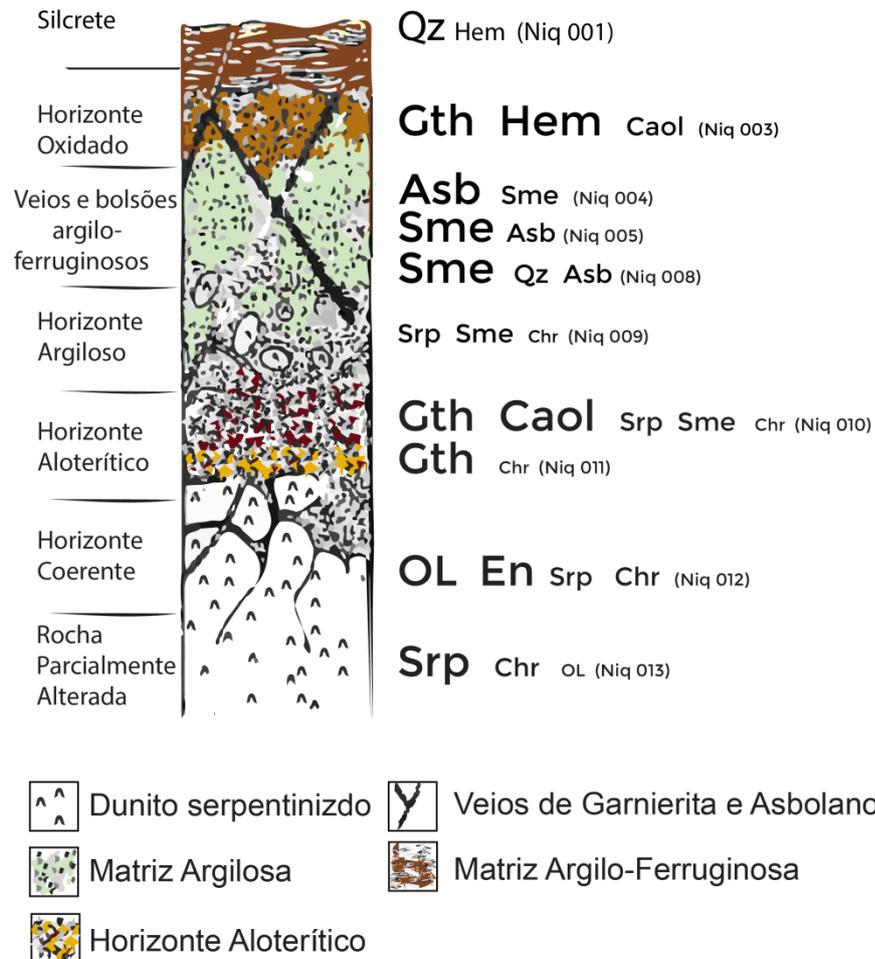


Figura 5. Perfil esquemático mineralógico estruturalmente ideal para o furo de sonda 1 desenvolvido sobre dunito serpentizado. OL = Olivina, Srp = Serpentina, Chr = Cromita, Sme = Esmeclita, Qz = Quartzo, Hem = Hematita Caol = Caolinita, Gth = Goethita e Asb = Asbolano (o tamanho da fonte representa abundância).

A amostra da rocha sã (Niq 013) é representada por um dunito totalmente serpentizado, compacto, rígido de coloração negra e textura fina, observa-se pequenos pontos brancos submilimétricos ao longo de toda a rocha. Ao microscópio (fig. 10) observa-se uma rocha de textura equigranular em que se destacam pseudomorfos com hábito de olivina com coloração amarelada mas completamente substituída por serpentina, apresenta dentro destes pseudomorfos as antigas partições preenchidas por uma serpentina mais fibrosa e incolor, enquanto que nos núcleos a serpentina aparentemente é microfolhácea de coloração amarelada (provavelmente por impregnação de material ferruginoso). Um sistema de fraturas regulares é preenchido por serpentina incolor e fibrosa perpendicular às paredes. Também ao longo das fraturas menores constata-se a existência de uma grande

rede de minerais opacos e/ou translúcidos diminutos, aparentemente de origem secundária (produtos da serpentinização). Alguns opacos maiores são associados às cristalizações primárias síncronas com a olivina.

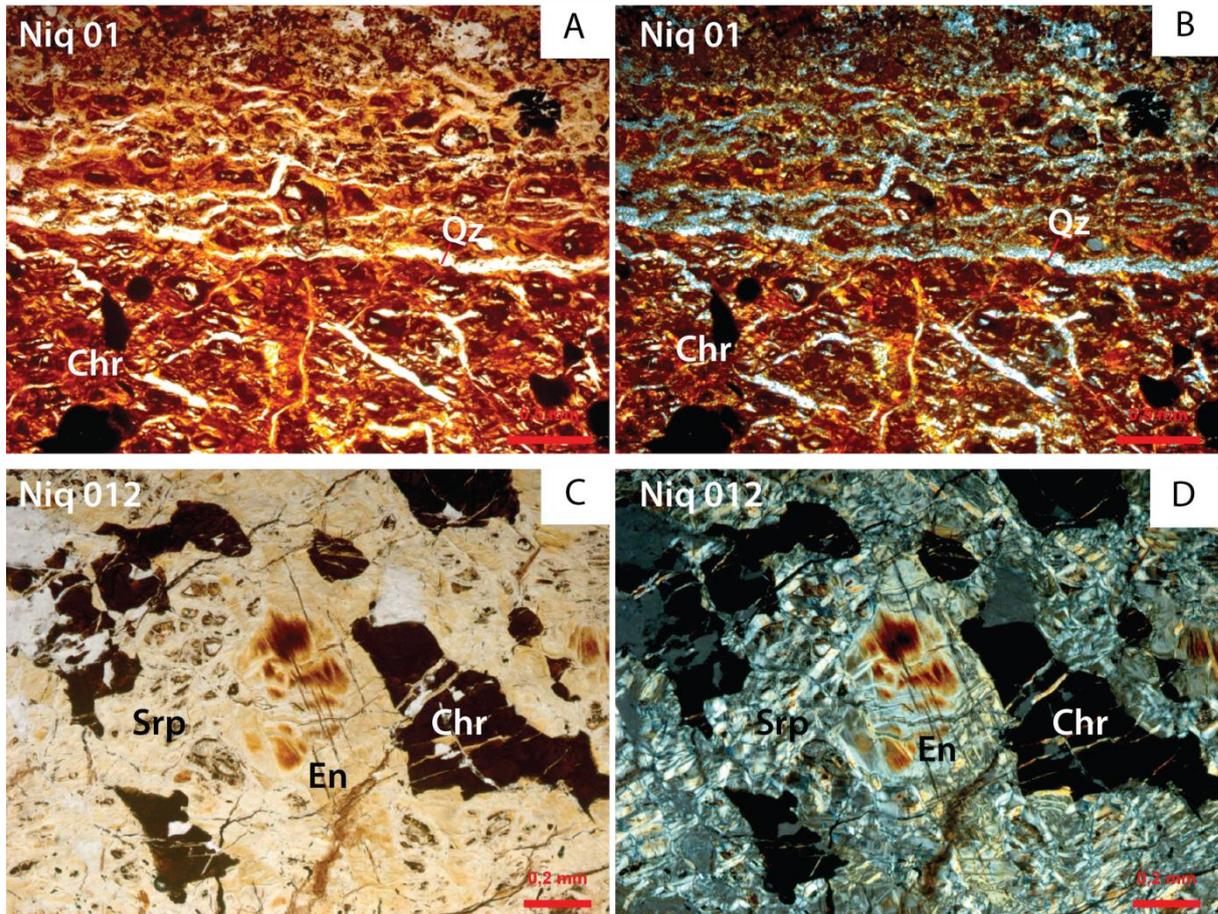


Figura 6. Fotomicrografias: A) Amostra Niq 01 em LN; B) Amostra Niq 01 em LP; C) Amostra Niq 012 em LN; D) Amostra Niq 012 em LP. Qz = quartzo, Chr = cromita, Srp = serpentina e En = enstatita.

Essa rocha progride no sentido da superfície para a amostra Niq 012 (Fig. 6), mantendo as estruturas primárias anteriores. Trata-se de uma amostra de coloração cinza escuro formando variações de bandas mais claras e mais escuras, granulação fina a média, compacta e com consistência rígida. Observa-se níveis escuros formados por óxidos (cromita) entremeados em bandas mais claras de piroxênio. Há a presença de níveis de coloração mais cinzenta composta por olivina serpentinizada. Na microscopia óptica os níveis escuros são constituídos principalmente por minerais opacos com formas irregulares anédricas, identificados como cromita. Entre os opacos há presença de enstatita parcialmente

serpentinizada. Na banda amarelada há pseudomorfos de olivina totalmente serpentinizados em que são encontrados pequenos núcleos de olivina preservada. A serpentinização destas olivinas se dá formando núcleos em que a serpentina é microfolheácea tendo serpentina mais fibrosa ao longo das partições da olivina. Em todo o conjunto ocorrem fraturas em que há um terceiro tipo de serpentina mais fibrosa e perpendicular às fraturas. A sequência de formação das serpentinas é a seguinte: inicialmente se forma serpentinas nas partições da olivina (serpentina I), seguida das serpentinização dos núcleos (serpentina II), sendo que as serpentinas dos veios e fraturas são posteriores às demais (serpentina III).

Sobre as amostras primárias ocorre um nível aloterítico representado pela amostra Niq 011 (Fig. 07) caracterizado pela falta da preservação das estruturas primárias. Tem coloração predominantemente ocre, com pontuações globulares mais escuras. Composta essencialmente por óxidos aparentemente ferruginosos. Há consistência friável que libera um pó ocre quando manuseada. Ao microscópio trata-se de uma amostra quase totalmente translúcida formada por um plasma avermelhado, em certas partes lembrando a estrutura dos pseudomorfos de olivina serpentinizada, dentro da qual se destacam cromitas quase em sua totalidade anédrica. Em pontos isolados há a presença de fragmentos transparentes dentro da parte translúcida que se trata de fragmentos de silicatos. Toda a estrutura está muito fragmentada e com bastante porosidade.

Na continuidade do nível aloterítico há uma variação para um nível aparentemente fragmentário com partes esverdeadas, vermelho arroxado e outras partes marrom escuro a preto (Niq 010). Nas partes esverdeadas há um material argiloso (garnierita) friável. Nas partes vermelho arroxado o material também é friável formado por materiais predominantemente argilosos e finamente misturados com óxidos ferruginosos. Nas partes marrom escuro a preto também é friável caracterizado por um pó escuro que suja os dedos. Na microscopia observa-se que as partes esverdeadas são em forma de microfolhas de coloração em luz natural amarelada com birrefringência moderada evidenciando a presença de esmectita eventualmente com serpentina (garnierita). Nas partes de cor vermelho arroxado observa-se a existência de material ferruginoso avermelhado translúcido. Nas porções marrom escuro observa-se a presença de minerais opacos sem forma definida.

Na sequência em direção à superfície ocorre um nível argiloso (garnierita –

Niq 009, Fig. 07), com consistência friável formada por porções esverdeadas e amareladas e pequenas manchas escuras sem brilho, e filamentos de material argiloso branco. Ao microscópio observa-se uma massa de microfolhas de coloração amarela com partes avermelhadas com grande quantidade de óxidos e hidróxidos opacos distribuídos ao longo da amostra. Em algumas partes mais claras ocorre a predominância de serpentina. As microfolhas são materiais argilosos esmectíticos. Em alguns pontos eventualmente observa-se as microfolhas tomando a forma de pseudomorfos de algum silicato primário. Parte marrom se distribui irregularmente contornando os opacos. Esses minerais opacos ora envolvem as esmectitas nontroníticas formando uma coroa de reação (asbolano), ora se apresenta em formas maiores e irregulares sendo aparentemente cromitas que foram preservadas durante a alteração da rocha sã. Há a presença de múltiplos fraturamentos ortogonais preenchidos por material claro de birrefringência clara, provavelmente sílica criptocristalina.

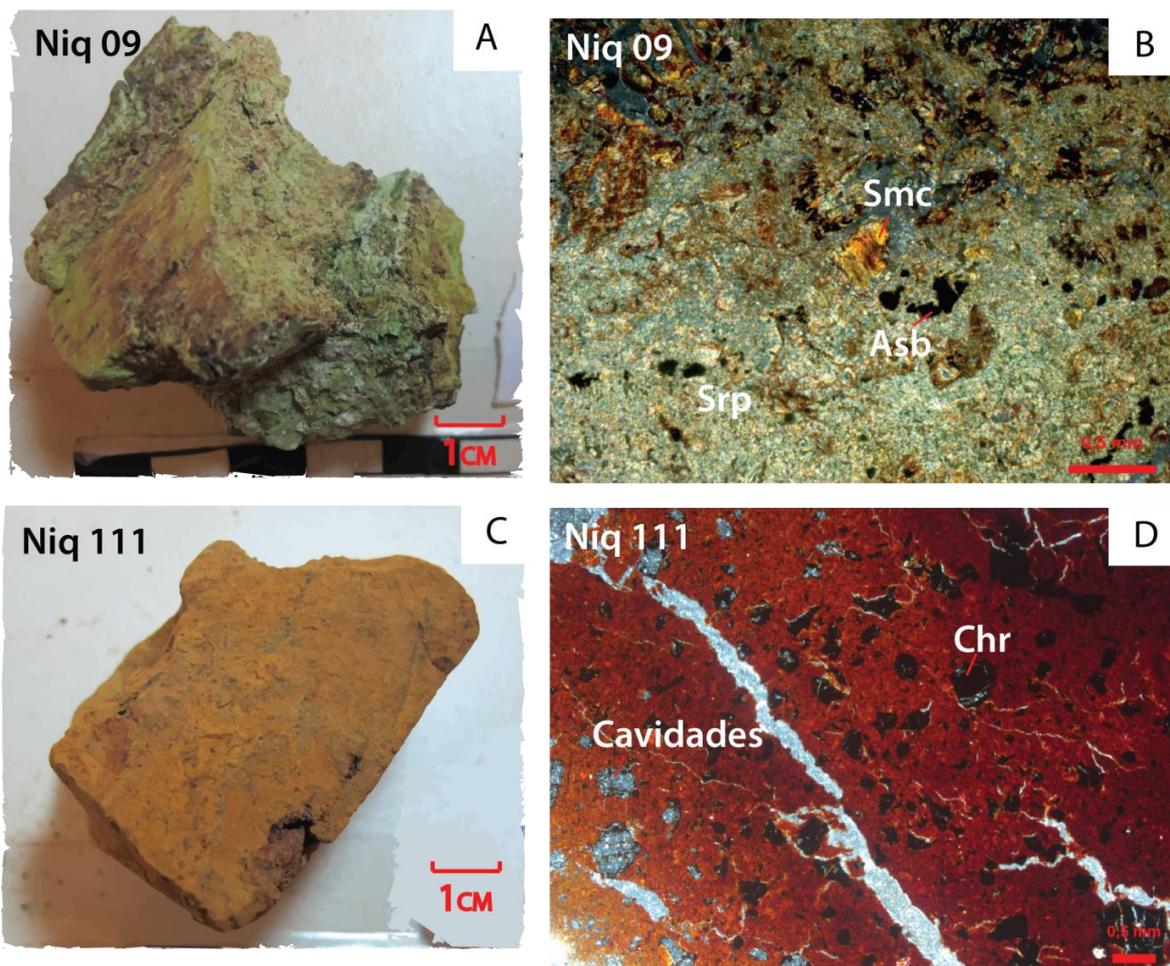


Figura 7. Amostras e suas respectivas seções petrográficas em luz polarizada. A = garnierita, B = esmectitas com bordas de reação em matriz argilosa, C = laterita ferruginosa, D = cromitas em matriz plasmática. Asb = asbolano, Chr = cromita, Smc = esmectita.

Na sequência do horizonte argiloso encontra-se garnierita mais homogênea com pontuações milimétricas escuras (Niq 008) que correspondem a partes oxidadas (asbolano). Na microscopia óptica nota-se que grande parte da rocha é composto por uma matriz esmectítica (nontronita), com esmectitas zonadas. Observa-se pequenos cristais de cromita, euédricos e milimétricos, em fraturas milimétricas. Observa-se também nestas fraturas cristais de quartzo brechados, nesta zona os cristais de esmectita apresentam zonações, abrindo precedente para discussões a respeito destas zonações.

Na profundidade de 27m ocorre um horizonte oxidado composto por um material friável vermelho arroxado até marrom escuro (Niq 007) com porções brancas irregulares e porções esverdeadas. Na microscopia observa-se um material plasmático avermelhado translúcido com feições de fluxo alongados compostas principalmente por argilominerías e óxidos ferruginosos sem forma definida, dentro do qual envolvem fragmentos predominantemente de ortopiroxênio.

Após ocorre um material (Niq 006) muito friável (suja as mãos) homogêneo de coloração marrom escura, com pontuações brancas ocupando cavidades submilimétricas preenchidas por caolinita. Observando a amostra ao microscópio observa-se que a amostra é na sua totalidade opaca, com algumas partes translúcidas contendo grandes quantidades de pequenas cavidades submilimétricas.

A amostra Niq 005 é friável e heterogênea. A sua coloração é preta, verde, vermelha marrom e pontuações brancas por toda a amostra. Esta amostra é representante do horizonte argilo-ferruginoso, a identificação mineral foi em sua maioria efetuada com dados da difratometria de raios X pois a preparação da lâmina delgada não foi possível devido às condições do material (baixa permeabilidade para a percolação da resina). Os picos  $d=15,389$ ,  $d=4,526$  e  $1,511$  foram identificados como os parâmetros da esmectita. Apenas dois picos  $d=7,159$  e  $d=3,575$  foram identificados como o mineral pertencente ao grupo das caolinitas (Fig. 8).

A amostra Niq 004 apresenta heterogeneidade. Com colorações que variam do preto ao verde claro e pontuações brancas, a sua mineralogia é composta por óxidos, hidróxidos e silicatos. A amostra é friável e reage ao ataque de  $H_2O_2$ . Ao microscópio óptico nota-se que a parte escura é composta majoritariamente por óxidos e hidróxidos amorfos caracterizado como asbolano. Já a porção esverdeada apresenta filossilicatos esmectíticos com birrefringência média a alta, caolinitas são

identificadas na difratometria de raios X, estas ocupam principalmente pequenas fissuras e vênulas milimétricas. A classificação textural destes minerais é de difícil identificação pois a preparação da lâmina petrográfica de materias que apresentam permeabilidade baixa é de extrema dificuldade, tendo grande parte do material perdido no polimento. Sendo assim podemos detectar que a porosidade da rocha é muito baixa, devido a grande concentração de argilo minerais e hidróxidos amorfos. No horizonte oxidado ocorre uma amostra (Niq 003) muito friável (suja as mãos) homogênea de coloração marrom escura, com pontuações brancas ocupando cavidades preenchidas por caolinita.

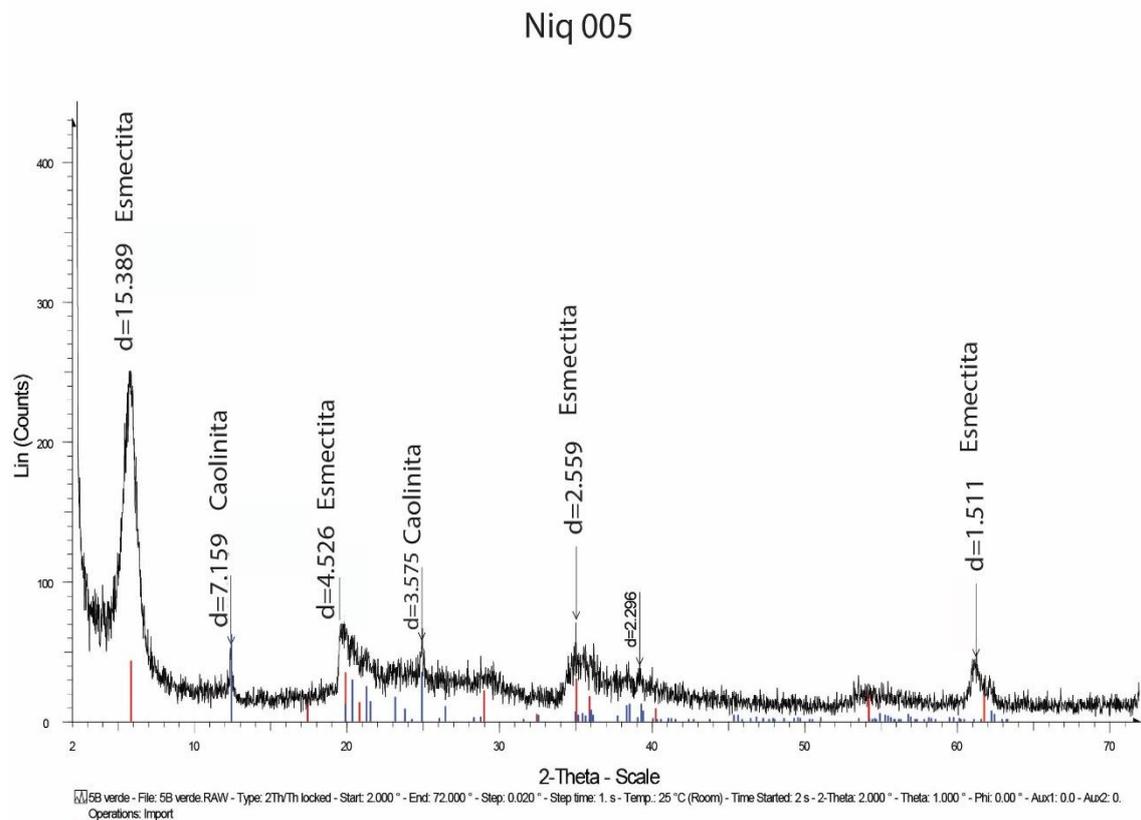


Figura 8. Difratograma referente à amostra Niq 005.

Na microscopia ótica observa-se que na maior parte da amostra se apresenta com um plasma de cor avermelhado translúcido com grande quantidade de cavidades submilimétricas não sendo observável o preenchimento em consequência da preparação das lâminas delgadas. Fraturas submilimétricas são preenchidas por caolinita. Existem cristais pseudomórficos subédricos preenchidos por óxidos de coloração preta.

As amostras mais superficiais, Niq 001 (Fig. 06) e Niq 002, tem-se um nível de material altamente silicificado, de tenacidade elevada, resistente ao corte com serra diamantada e ao rompimento com martelo. Coloração marrom escuro com cavidades milimétricas e centimétricas preenchidas por um mineral translúcido amarelo queimado. Ao microscópio polarizado a amostra é composta majoritariamente por calcedônia de coloração avermelhada translúcida, com estrutura que lembra pseudomorfos de serpentinito. Muitas fraturas milimétricas subparalelas preenchidas por quartzo criptocristalino. Dentro do conjunto existem cristais opacos pretos de cromita, subédricos que também são fraturados pelas mesmas fraturas que são preenchidas por quartzo. Estes óxidos pretos no conjunto formam um bandamento subparalelo ao faturamento.

#### **7.1.2. Perfil 2 - Furo de sondagem CR12 19920**

Na sondagem foram recolhidas para este estudo as amostras do intervalo ente 10,5m e 20,9M (Figura 09), sendo este intervalo que apresenta a alteração superficial desde a rocha sã, que é representada por peridotito parcialmente serpentinizado. A descrição será feita da base para o topo.

Na base do perfil (Niq 117) ocorre uma rocha compacta, rígida, estratificada, com bandas centimétricas claras cinza claro e outras bandas centimétricas cinza escuro com pequenas manchas vermelhas provocadas por oxidação. Há a presença de um sistema de faturas perpendicular às bandas. Na microscopia trata-se de uma rocha de textura inequigranular e cumulática (fig. 10). A parte com bandas claras é predominante formada por ortopiroxênios bastante fraturados em estágio inicial de serpentinação (serpentina fibrosa). Junto com os piroxênios ocorre espinélios de coloração castanha em geral subédricos, isotrópicos. Ainda no bandamento de piroxênios há a presença de um mineral opaco, anédrico, interpretado como cromita.

O bandamento mais escuro é composto predominantemente por olivina serpentizada ao longo de suas partições (serpentina I) e com núcleos preservados. Em algumas partes mais escuras as olivinas estão mais serpentizadas e com bastante liberação de óxido de ferro provocando tonalidades amarelas ao microscópio. Também aparecem minerais pretos e opacos que aparentam ser cromitas. Ao longo do bandamento de olivina aparecem três gerações de serpentina, entre as partições da olivina (serpentina I), dentro dos núcleos de olivina (serpentina

II) e entre os fraturamentos perpendiculares ao bandamento (serpentina III). Pela composição mineralógica, baseada na proporção entre olivina (muito serpentinizada) e ortopiroxênios esta rocha pode ser classificada como um harzburgito.

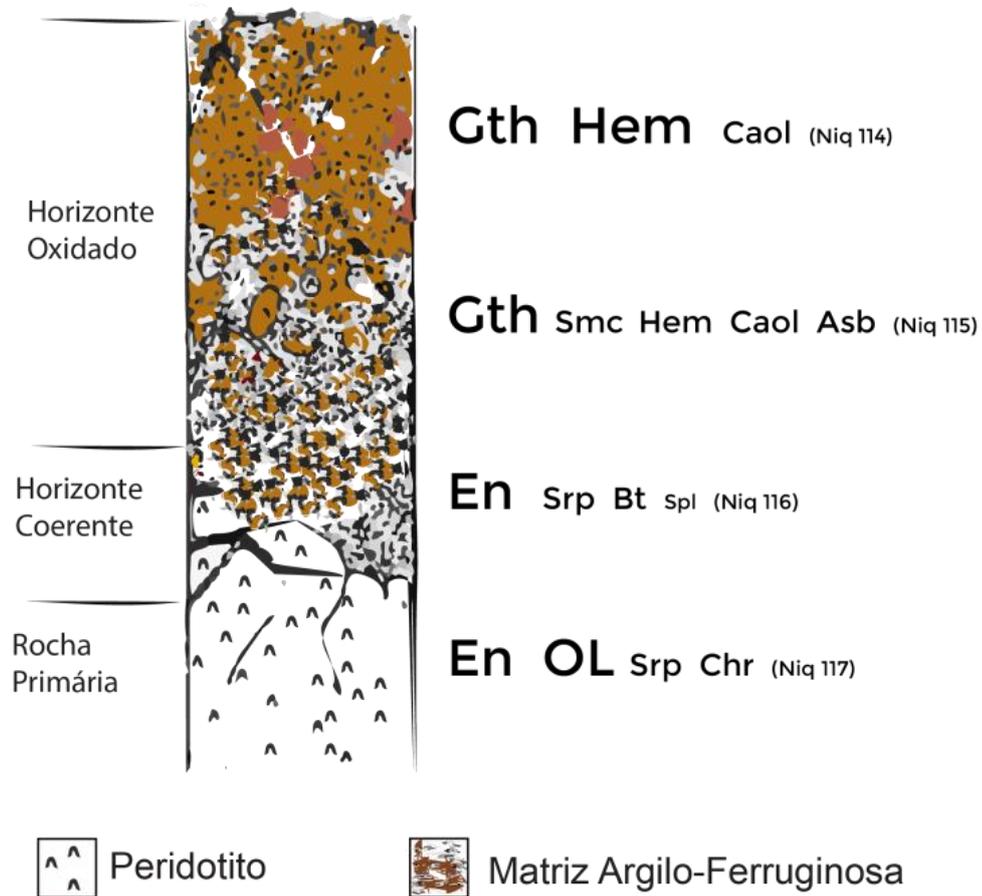


Figura 9. Perfil esquemático mineralógico estruturalmente ideal para o furo de sonda 2 desenvolvido sobre dunito. OL = Olivina, Srp = Serpentina, Chr = Cromita, Sme = Esmeclita, Hem = Hematita, Bt = Biotita, Caol = Caolinita, Gth = Goethita e Asb = Asbolano (o tamanho da fonte representa abundância).

Acima da rocha da base encontra-se uma rocha de granulação fina com coloração cinza esbranquiçado e manchas oxidadas com fraturas milimétricas (Niq 116). Ao microscópio, apresenta textura inequigranular média a grossa e acumulática. Os fenocristais de piroxênios são os primeiros a cristalizar, subédricos com alguns cristais euédricos, de beges a incolor, com clivagens características ortogonais às seções basais e longitudinais nas seções prismáticas, predominam as cores de interferência de segunda ordem, apresentam um sistema de maclas do tipo lamelar muito fina. Apresenta fraturas que atravessam os diversos cristais, as fraturas são preenchidas em parte por micas biotitas e nas partes mais finas por

serpentina. A fração intercumulus é caracterizada por Cr-espínélio, anfibólio, e principalmente por biotita que em partes acompanha as fraturas maiores. Em fraturas mais finas constata-se a presença de serpentina fibrosa com as fibras perpendiculares à fratura e em parte nas clivagens das rochas.

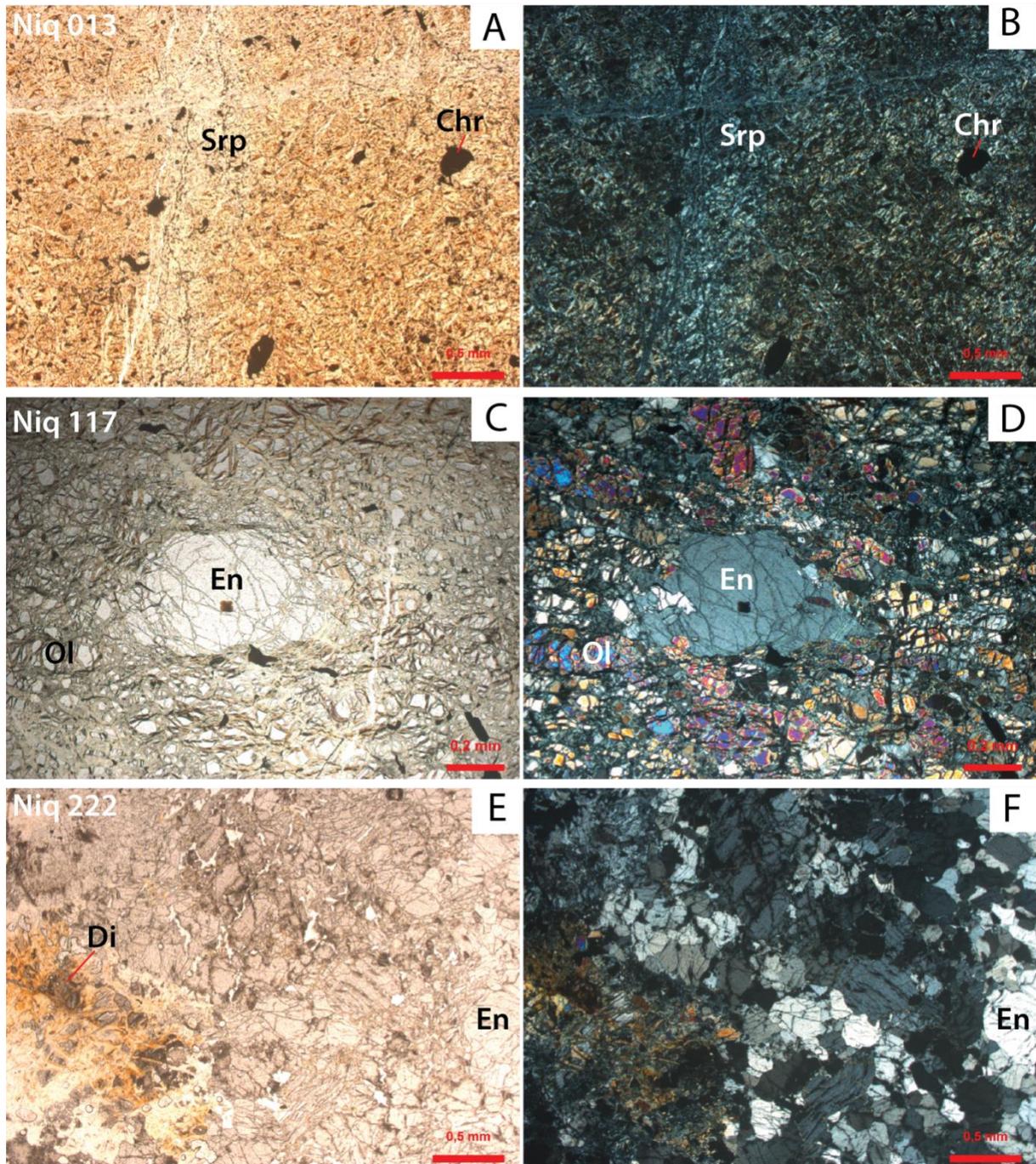


Figura 10. Seções petrográficas de luz natural (esquerda) e luz polarizada (direita) representativas das amostras Niq 013, Niq 117 e Niq 222. A = En = enstatita, Di = diopsídio e Ol = olivina. A = Dunito serpentizado em LN, B= Dunito serpentizado em LP, C = Enstatita subédrica em peridotito LN, D = Enstatita subédrica em peridotito LP, E = Núcleos de enstatita preservados em estágio inicial de serpentinização com diopsídios alterados para argilominerais, F= Seção da amostra Niq 222 em LP

Sobre essa rocha desenvolveram-se os horizontes oxidados representados pelas amostras Niq 115 e Niq 114. A amostra Niq 115 é muito friável de coloração avermelhada com bandas internas de cores escuras e vênulas de coloração clara provavelmente preenchidas por caolinita. Há concentrações de óxidos de forma alongada. Na microscopia observa-se que a amostra é formada por um plasma ferruginoso predominantemente avermelhado e translúcido. Nas seções mais claras o plasma é de coloração amarelo queimado e em luz polarizada mostra alguma birrefringência indicando estar misturado com matérias folhaceos que podem ser argilominerais. A fábrica da rocha apresenta grandes quantidades de fraturas submilimétricas que na lâmina delgada aparecem vazias, mas que devem constituir as vênulas de caolinita que foram perdidas na laminação. Há a presença de minerais de coloração preta opaca e outros de coloração avermelhados translúcidos que aparentam ser hematita. Pequenas fraturas submilimétricas são preenchidas por um material preto amorfo interpretado como asbolano. A amostra Niq 114 é friável de coloração marrom avermelhada (suja as mãos) e homogênea. Na microscopia é observado um plasma avermelhado e translúcido, dentro do qual existem cristais opacos rompidos por um sistema de fraturas milimétricas possivelmente preenchidas por argilominerais caolíniticos.

### **7.1.3. Perfil 3 - Furo de sondagem CR12 9367**

Na sondagem foram recolhidas para este estudo as amostras do intervalo entre 34,5m e 58,5m (Fig. 11 e 12), sendo este intervalo que apresenta a alteração superficial desde a rocha sã, que é representada por piroxenito parcialmente serpentizado. A descrição será feita da base para o topo.

O perfil é caracterizado por estar sobre uma rocha piroxenítica, representado pela amostra Niq 222 (Fig. 10), com coloração cinzenta compacta, com manchas marrons e verdes oriundas contornadas por um material fino e frágil branco caracterizado como talco. Na microscopia a rocha é holocristalina e inequigranular. Os minerais de forma geral são anédricos compostos principalmente por ortopiroxênio (55%), mas com a presença de clinopiroxênio em menor proporção (30%) sendo caracterizada como um websterito. Há pequenas áreas com concentração de óxidos opacos pretos podendo ser cromita, em partes ocorre fraturas em que os minerais se encontram fragmentados e formando serpentina

fibrosa no contato com os minerais intactos. Nas porções vinculadas as partes fragmentadas alaranjadas encontra-se esmectitas microfolheáceas que misturadas com a serpentina tende a formar a garnierita já vista em amostras mais superficiais.

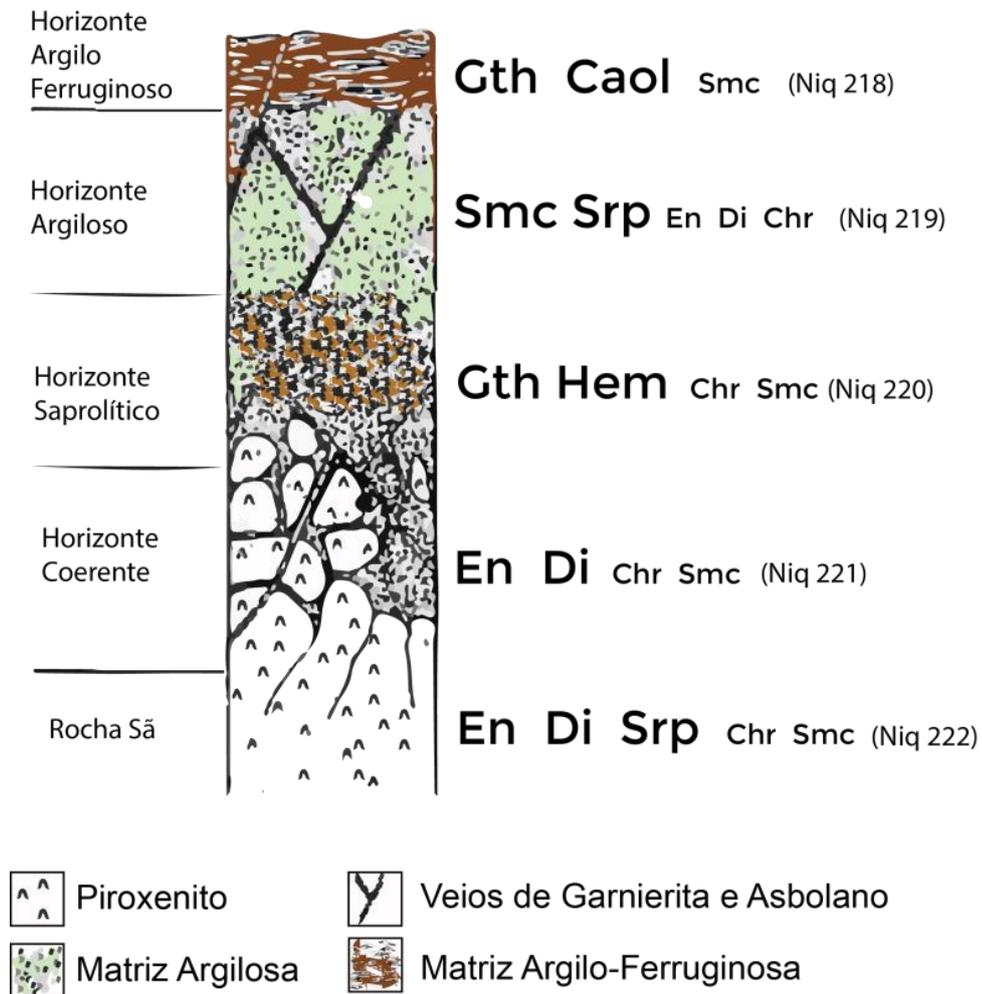


Figura 11. Perfil esquemático mineralógico estruturalmente ideal para o furo de sonda 3 desenvolvido sobre piroxenito. En = Enstatita, Di = Diopsídio, Srp = Serpentina, Chr = Cromita, Sme = Esmectita, Qz = Quartzo, Caol = Caolinita, Gth = Goethita (o tamanho dos caracteres

Mantendo coerência com a rocha da base, destaca-se a amostra Niq 221 situada imediatamente acima, que tem a coloração castanha sendo parcialmente friável, com textura fina e grande quantidade de veios brancos e esverdeados. Na microscopia observa-se que a rocha tem inequigranularidade mostrando pseudomorfos de olivina serpentinizada, com poucos núcleos em que ocorre a olivina preservada. A serpentinização ocorre nos próprios núcleos e também nas partições. Entretanto toda a rocha está com muitas fraturas milimétricas e centimétricas preenchidas por quartzo microcristalino e bem transparente. Fraturas

maiores também estão preenchidas por quartzo onde em alguns casos a granulometria do quartzo torna-se maior. Nos núcleos de serpentina preservada observa-se o contorno irregular em que o quartzo provoca na própria olivina. Em alguns pontos a olivina foi totalmente substituída por serpentina, e esta, quase totalmente substituída por quartzo, ficando um pseudomorfo de quartzo sobre a olivina. Ocorrem cristais opacos que aparentemente são cromitas preservadas, outros opacos mais translúcidos, como a hematita, são encontrados nas partes mais alteradas da lâmina delgada. Nesta parte aparentemente trata-se de dunito serpentizado e posteriormente silicificado.

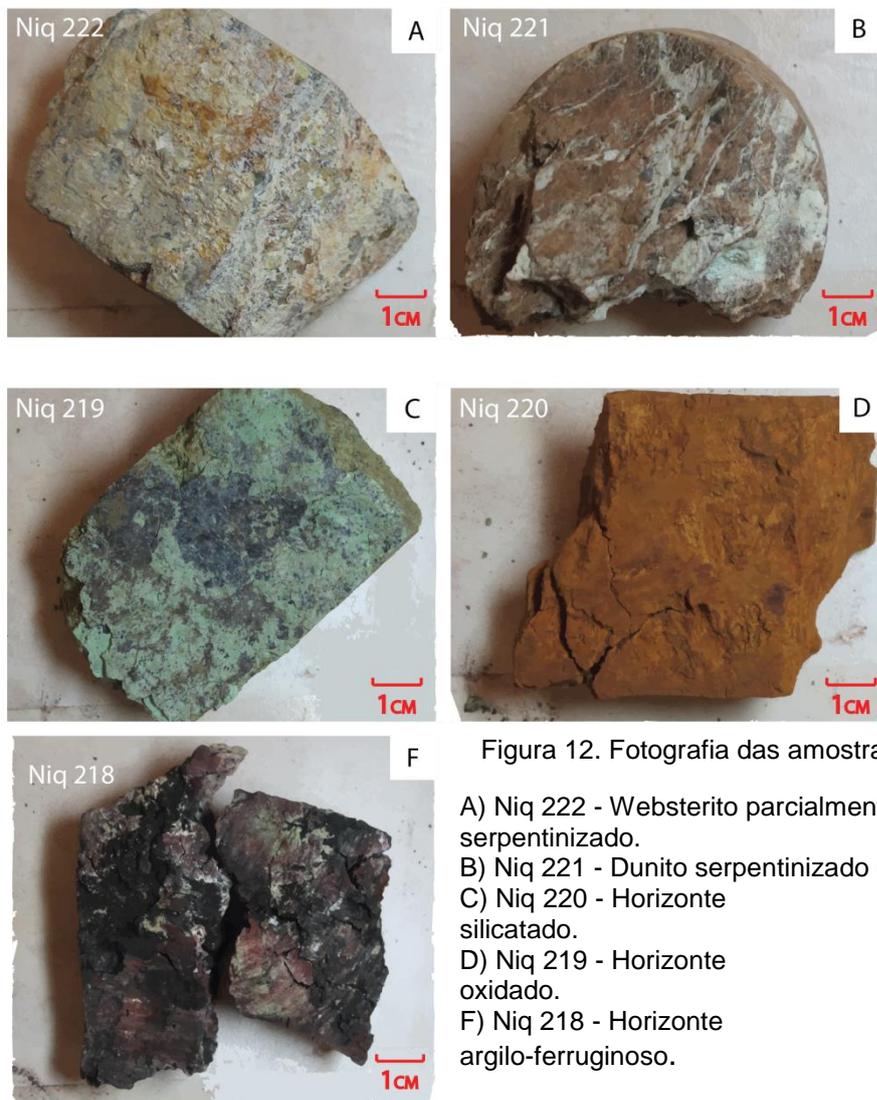


Figura 12. Fotografia das amostras do perfil 3

- A) Niq 222 - Websterito parcialmente serpentizado.
- B) Niq 221 - Dunito serpentizado e silicificado.
- C) Niq 220 - Horizonte silicatado.
- D) Niq 219 - Horizonte oxidado.
- E) Niq 218 - Horizonte argilo-ferruginoso.

Compondo o horizonte saprolítico encontra-se a amostra Niq 220, a amostra é homogênea e muito friável (suja as mãos), com densidade aparente baixa. Na microscopia óptica a homogeneidade da amostra se representa pela matriz plasmática ferruginosa com porosidade elevada. Pequenos cristais de cromita euédricos se encontram imersos na matriz aleatoriamente em conjunto com hematita.

No horizonte argiloso encontra-se uma rocha (Niq 219) que apresenta textura fina com coloração variando de cinza ao cinza esverdeado. Grandes concentrações de garnierita, em fábrica de piroxênio. Ao microscópio óptico a rocha é inequigranular, com cristais de ortopiroxênio preservados em seções prismáticas e basais, subédricos dentro de uma matriz serpentizada com esmectitas. A esmectita apresenta na lâmina como material microfolheado de coloração esverdeada, em luz polarizada ficando com birrefringência amarela de segunda ordem. Há pontos em que aparece a serpentina mais clara em luz natural e também em luz polarizada. Nos contornos dos piroxênios há a formação de garnierita corrosão as bordas a medida que a alteração penetra nas clivagens e fissuras minerais. Ocorrem pequenos cristais opacos de coloração preta, cromita, outros translúcidos avermelhados, secundários sendo aparentemente hematita. Estes opacos pretos eles mostram uma fragmentação e corrosão das bordas no contato com a garnierita. Algumas pequenas fraturas penetrativas são preenchidas por um material translúcido e avermelhado, aparentemente hidróxidos de ferro.

A amostra mais superficial (Niq 218) é heterogênea com variações minerais que oscilam de coloração preta a marrom avermelhada, tendo entre os contatos heterogêneos, pequenos invólucros de coloração verde. Pontuações de coloração branca por toda a amostra são interpretadas como caolinita que ao fazer a preparação da lâmina delgada foi perdida ao polimento. Rocha com heterogeneidade acentuada tanto em tamanho de grão quanto em colorações. As partes mais transparentes são formadas principalmente por esmectita de coloração amarelada, de birrefringência de segunda ordem, dentro da qual se destacam grandes quantidades de minerais opacos bem escuros. As seções mais avermelhadas são mais translúcidas, contém porções de esmectita e grande quantidade de minerais avermelhados translúcidos (hematita, goethita e/ou materiais ferruginosos amorfos).

## 7. 2. GEOQUÍMICA DE ROCHA TOTAL

Todas as amostras selecionadas e descritas na petrografia foram submetidas a análises químicas de rocha total. Os resultados dos elementos maiores constam nas tabelas de número 2, 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente representando os três perfis correspondentes aos furos de sondagem CR13 33123, CR12 19920, CR12 9367. Para facilitar a discussão foram elaborados gráficos representativos dos principais elementos analisados, tanto elementos maiores em forma de óxidos, quanto os menores representados em ppm (figuras 13, 14, 15, 16 e 17). A apresentação dos resultados geoquímicos será feita separadamente para os três furos de sondagem.

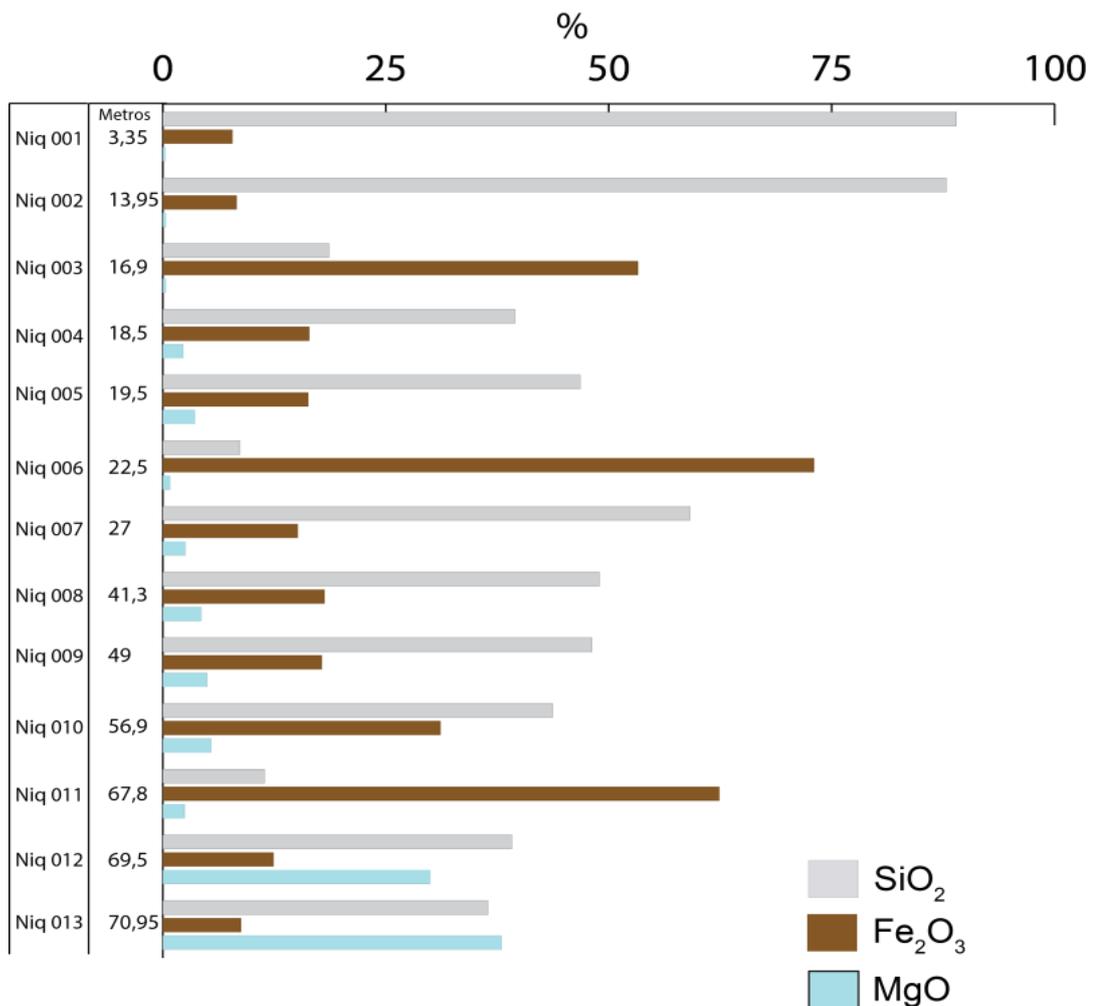
### 7.2.1 Perfil 1 - Furo de sondagem CR13 33123

Pelas análises representadas na tabela 2, verifica-se que a amostra de rocha sã (Niq 013) tem a composição nitidamente de uma rocha ultramáfica,  $\text{SiO}_2 = 36,45\%$ ,  $\text{MgO} = 37,99\%$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 8,78\%$  com valor de perda ao fogo relativamente alto de  $14,77\%$ , em decorrência da elevada taxa de serpentinização. Concentrações significativas de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ( $0,87\%$ ) e  $\text{NiO}$  ( $0,33\%$ ) são detectadas. Na amostra subsequente a rocha sã (Niq 012) a composição química não apresenta grande variação em relação a amostra anterior, com um pequeno decréscimo de  $\text{MgO}$  e um acréscimo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Em relação a amostra anterior houve um significativo aumento nas concentrações de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ( $3,99\%$ ) e  $\text{NiO}$  ( $1,60\%$ ).

A amostra Niq 011, por se tratar um horizonte oxidado destaca-se por apresentar uma elevada concentração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $62,41\%$ ). Cabe destacar que a amostra Niq 011, acompanhando a elevada concentração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , há uma significativa concentração de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , que já apresentava um aumento na amostra Niq 012, conforme se observa na figura (gráfico referente ao  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Neste horizonte oxidado aparece com algum destaque o  $\text{CoO}$  ( $0,12\%$ ) e o  $\text{CuO}$  ( $0,15\%$ ). O  $\text{MnO}$  também aparece com um valor significativo ( $0,85\%$ ) neste horizonte oxidado.

Tabela 2. Composição química das amontras do perfil 1 - elementos maiores dados em percentagens de seus óxidos.

	NIQ 001	NIQ 002	NIQ 003	NIQ 004	NIQ 005	NIQ 006	NIQ 007	NIQ 008	NIQ 009	NIQ 010	NIQ 011	NIQ 012	NIQ 013
SiO <sub>2</sub>	89,00	87,86	18,65	39,49	46,82	8,64	59,12	48,96	48,13	43,70	11,40	39,13	36,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35	0,34	13,91	8,31	8,93	4,73	11,97	3,98	4,07	6,80	6,14	4,29	0,85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,80	8,28	53,29	16,43	16,31	73,04	15,14	18,14	17,84	31,14	62,41	12,42	8,78
CaO	0,01	0,01	0,01	0,14	0,19	0,01	0,15	0,39	0,35	0,40	0,07	0,47	0,02
MgO	0,25	0,37	0,33	2,29	3,63	0,82	2,54	4,31	4,97	5,42	2,46	29,97	37,99
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
K <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,01	0,08	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MnO	0,11	0,09	1,52	9,45	3,15	2,16	0,68	0,37	0,38	0,58	0,85	0,19	0,11
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,01	0,36	0,12	0,13	0,35	0,45	0,16	0,17	0,20	0,17	0,14	0,03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,43	0,73	2,59	1,28	1,55	5,06	0,35	2,00	2,09	1,65	6,94	3,99	0,87
BaO	0,01	0,01	0,04	0,95	0,19	0,21	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
NiO	0,15	0,19	0,35	6,35	6,28	0,10	1,06	13,96	13,01	1,36	1,46	1,60	0,33
CoO	0,00	0,00	0,31	2,15	1,09	0,02	0,22	0,10	0,09	0,07	0,12	0,02	0,01
CuO	0,01	0,01	0,11	2,03	1,00	0,09	0,16	0,34	0,44	0,09	0,15	0,01	0,00
ZnO	0,00	0,00	0,02	0,18	0,18	0,03	0,03	0,21	0,27	0,05	0,10	0,02	0,01
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,04	0,01	0,03	0,04	0,02	0,08	0,05	0,01
LOI	1,12	1,53	7,62	10,02	9,62	3,83	7,08	7,41	7,48	7,63	7,41	8,10	14,77
Total	99,28	99,47	99,16	99,30	99,15	99,16	99,00	100,38	99,36	99,15	99,79	100,43	100,26

Figura 13. Distribuição em porcentagem dos óxidos de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO no perfil 1.

A amostra representante do horizonte aloterítico (Niq 010) tem uma composição aparentemente intermediária entre o horizonte oxidado e o horizonte silicatado representado pela amostra (Niq 009). No horizonte silicatado (Niq 009 e Niq 008) destaca-se um aumento significativo no teor de  $\text{SiO}_2$  (~48%), acompanhado de um decréscimo no teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (~18%), mas com um grande aumento nas concentrações de NiO (>13%). Observa-se também um aumento nos teores de CuO e CoO em relação ao horizonte oxidado. O horizonte aloterítico representado pela amostra Niq 007 apresenta aspectos petrográfico similares a amostra Niq 010, sendo que a sua composição também é semelhante, mas com o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mais elevado e menor teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . A amostra Niq 006 que se encontra no horizonte oxidado sobrejacente ao horizonte aloterítico é representado por um decréscimo significativo no teor de  $\text{SiO}_2$  (8,64%), mas com um altíssimo teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (73,04%).

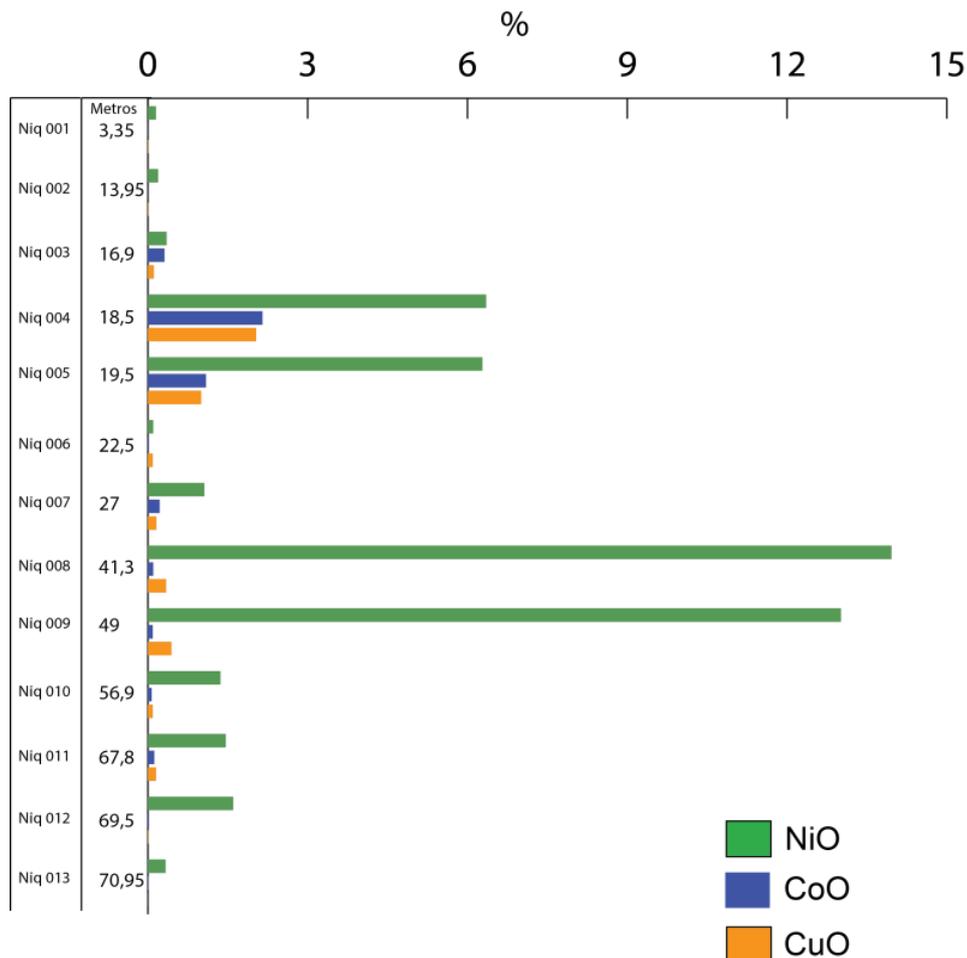


Figura 14. Distribuição em porcentagem dos óxidos de Co, Cu e Ni no perfil 1.

Acompanha esta elevação de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  também um significativo teor de  $\text{MnO}$  (2,16%) e alto teor de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (5,06%). As amostras Niq 005 e Niq 004 representam um sistema de fraturamentos e bolsões preenchidos em parte por argilominerais, óxidos e hidróxidos. Este fato torna as amostras muito heterogêneas, o que também é ilustrado pela sua composição.

Tabela 3. Composição química das amostras do perfil 1 - elementos traço dados em ppm.

	Niq 001	Niq 002	Niq 003	Niq 004	Niq 005	Niq 006	Niq 007	Niq 008	Niq 009	Niq 010	Niq 011	Niq 012	Niq 013
Mo	1,34	1,77	0,09	0,67	0,33	0,08	0,27	0,08	0,06	0,06	0,05	0,22	0,06
Pb	8,65	0,53	29,35	10,2	6,77	7,01	2,16	7,6	11,63	2,87	2,89	0,65	0,37
Zn	9,6	17	29,6	1283,3	1425,3	17,4	181,8	1539,1	1765,2	220,4	414,1	29,9	9
As	0,5	<0.1	0,7	2,2	0,8	0,6	0,6	0,3	<0.1	0,1	0,3	0,3	0,2
U	<0.1	<0.1	0,6	7,3	5,3	1,2	0,5	<0.1	<0.1	0,4	1	<0.1	<0.1
Th	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0,5	1	<0.1	<0.1	2,6	0,5	<0.1	<0.1
Cd	<0.01	<0.01	0,24	2,11	1,09	0,51	0,23	1,81	1,54	1,05	0,48	0,48	<0.01
Bi	<0.02	<0.02	6,36	0,96	0,39	1,37	0,12	3,3	3,31	0,75	0,47	0,14	0,02
Sc	3,2	5,2	43,5	>100.0	>100.0	43	86,6	79,9	82,1	99,1	52,7	14,2	8,5
Tl	0,3	0,06	0,24	0,97	0,43	0,81	0,28	0,06	0,06	0,02	0,08	<0.02	<0.02
Ga	0,2	0,2	9,4	5,3	4,7	6,9	3,2	2,9	3,1	3,2	1,9	0,6	0,2
Y	0,34	0,67	15,83	55,73	87,56	2,03	14,93	49,39	55	15,03	12,58	5,45	0,4
La	1	1,4	17,9	72,5	82,3	5,3	19,8	73,3	77,6	30,3	15,2	14,5	<0.5
Ce	17,1	0,7	19,6	382,1	618,6	56,5	93,7	19,9	32,1	16,1	4,1	0,8	0,2

Os teores de  $\text{SiO}_2$  apresentam valores intermediários entre os horizontes silicatados e oxidados (aproximadamente 40%). Os valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  são valores mais compatíveis com o horizonte silicatado. O teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é mais acentuado (entre 8% e 9%). O elemento em destaque nas amostras é o  $\text{MnO}$  (que alcança 9,45%) acompanhado de um forte aumento de  $\text{NiO}$  (>6%) com uma forte correlação elementar aos elementos  $\text{CoO}$  e  $\text{CuO}$  superando 2% (Fig. 14). Ao nível da amostra Niq 003 tem-se um horizonte oxidado com concentração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que ultrapassa 53%, acompanhado com um teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bastante significativo (13,91%) e teor de  $\text{SiO}_2$  de 18%. Neste horizonte salienta-se o teor de 2,59% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e 1,52% de  $\text{MnO}$ .

No topo do perfil encontra-se o horizonte de silcrete, representado pelas amostras Niq 002 e Niq 001, com teores de  $\text{SiO}_2$  que se aproximam de 90%, tendo cerca de 8% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Entre os elementos traço (tab. 3) observa-se uma concentração de  $\text{Pb}$  ao longo de todas as amostras do perfil. O  $\text{Zn}$  também apresenta concentração que ganha destaque nas amostras Niq 004, Niq 005, Niq 008 e Niq 009. O  $\text{Sc}$  apresenta

teores elevados nos horizontes de intemperização, alcançando teores acima do limite de detecção nas amostras Niq 004 e Niq 005. Cabe destacar também a presença de Y, La e Ce que apresentam uma concentração maior nas amostras Niq 004 e Niq 005 indicando associar-se ao horizonte silicatado na qual se encontra o asbolano (Fig. 15).

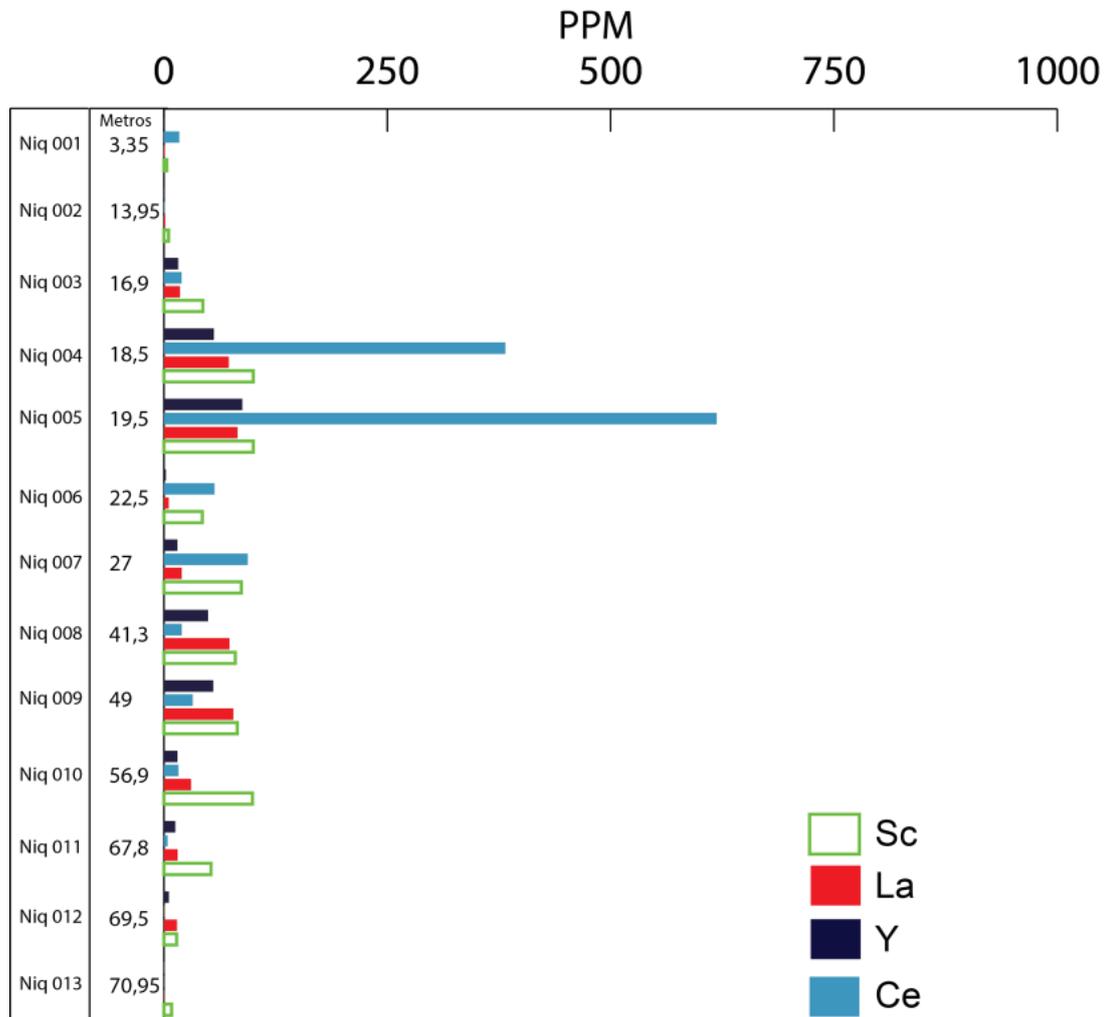


Figura 15. Distribuição em ppm de Sc, La, Y e Ce no perfil 1.

### 7.2.2. Perfil 2 - Furo de sondagem CR12 19920

A composição química das amostras deste furo estão representadas pela tabela 4 Neste furo de sondagem a rocha sã é representada por um cumulado estratiforme de rochas ultramáficas peridotíticas. Apresentam teores de SiO<sub>2</sub> que

variam entre 42% e 50% e teores de MgO entre 28% e 36% com o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ~10%, e teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  variando entre 1,30% e 4,44%. O  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  está em torno de 0,64% e o NiO apresenta concentração variável (0,20% a 0,72%)

Sobre essas rochas, neste perfil, ocorre um horizonte oxidado representado pelas amostras Niq 114 e Niq 115. Essas amostras têm um teor elevado de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (62,66% e 68,95%), intermediário de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5,02% e 11%) e depleção de  $\text{SiO}_2$ . Acompanhando o elevado teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , destaca-se o elevado teor de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (até 6,81%) e NiO (~1,28%). Merecem atenção também os teores de CuO e CoO (figura 16).

Entre os elementos traço (Tab. 5) observa-se uma concentração de Pb e Zn nos horizontes oxidados (Niq 114 e Niq 115), mas em menor proporção quando comparadas com o perfil 1 (Tab. 3). O Sc também apresenta teor elevado na amostra Niq 115, correspondente ao horizonte oxidado. Os elementos Y, La e Ce que apresentam uma concentração maior nas amostras Niq 004 e Niq 005 expressos na tabela 3 apresentam valores depletados no perfil 2.

Tabela 4. Teores dos elementos maiores, dados em percentagem de seus óxidos.

	NIQ 114	NIQ 115	NIQ 116	NIQ 117
$\text{SiO}_2$	4,55	6,39	49,56	42,26
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5,02	11,00	4,44	1,30
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	68,95	62,66	9,78	9,86
CaO	0,02	0,02	2,65	2,47
MgO	2,23	1,27	27,89	35,98
$\text{Na}_2\text{O}$	0,01	0,01	0,07	0,02
$\text{K}_2\text{O}$	0,01	0,01	0,01	0,01
MnO	1,14	2,40	0,24	0,15
$\text{TiO}_2$	0,13	0,35	0,13	0,06
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	6,81	3,47	0,64	0,63
BaO	0,01	0,02	0,01	0,01
NiO	1,28	1,22	0,72	0,20
CoO	0,11	0,40	0,02	0,01
CuO	0,27	0,47	0,04	0,02
ZnO	0,07	0,04	0,02	0,01
$\text{V}_2\text{O}_5$	0,08	0,11	0,03	0,02
LOI	9,39	10,13	4,17	6,98
Total	100,08	99,97	100,41	99,98

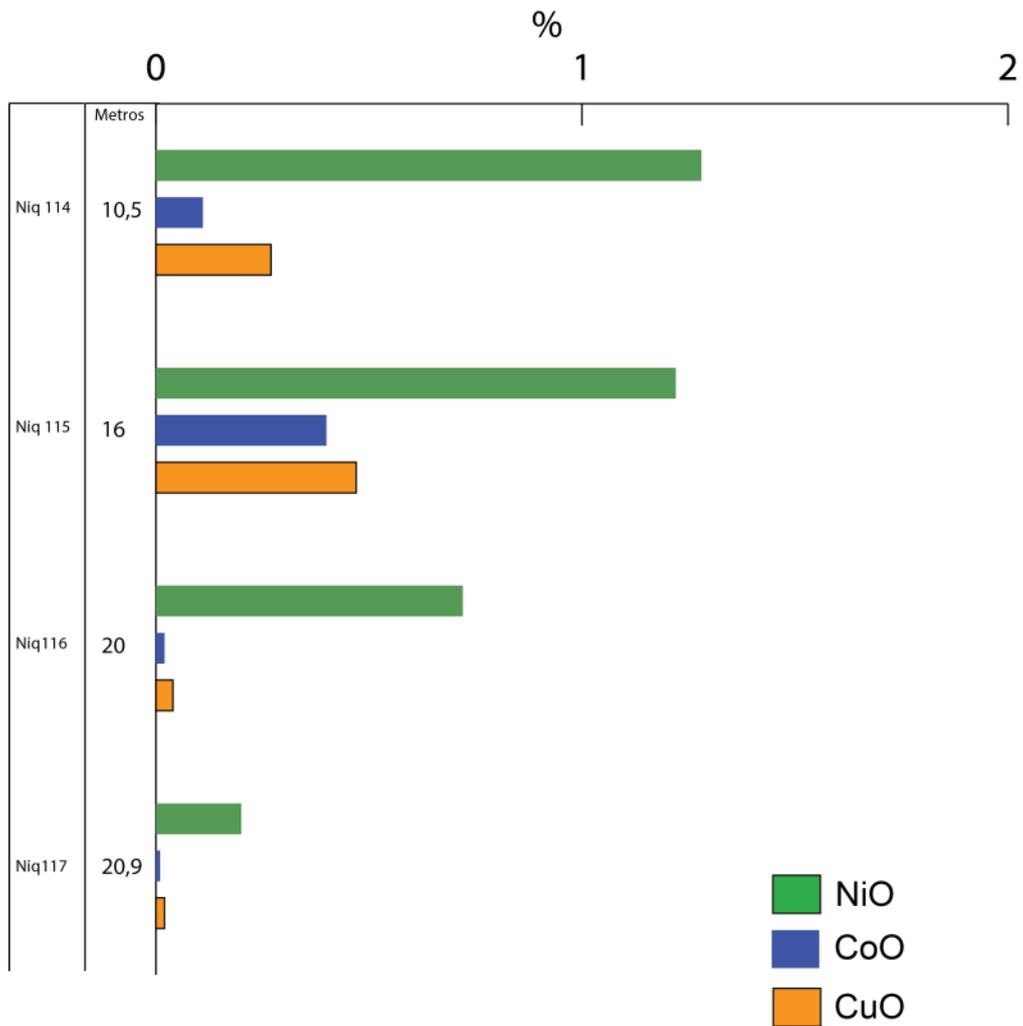


Figura 16. Distribuição em porcentagem dos óxidos de Co, Cu e Ni no perfil 2

Tabela 5. Composição química das amostras do perfil 2 - elementos traço dados em ppm.

	Niq 114	Niq 115	Niq 116	Niq 117
Mo	0,07	0,11	0,3	0,2
Pb	10,96	26,35	1,28	0,37
Zn	242,5	151,7	107,7	11,1
As	0,4	<0.1	<0.1	0,4
U	1,4	1,3	<0.1	<0.1
Th	0,4	0,4	<0.1	<0.1
Cd	0,33	0,48	0,7	0,03
Bi	1,23	1,92	0,14	0,06
Sc	36,5	>100.0	18,3	5
Tl	0,38	0,6	0,13	<0.02
Ga	3,3	6,4	2,3	0,3
Y	8,89	4,11	7,25	0,15
La	6,7	3,1	4,1	<0.5
Ce	17,4	11,4	0,7	0,1

### 7.2.3. Perfil 3 - Furo de sondagem CR12 9367

Neste furo de sondagem foram analisadas 5 amostras cuja composição está representada na tabela 6.

A rocha sã (Niq 222) foi caracterizada como um websterito. Sua composição está caracterizada pela semelhança de valores entre MgO (19,29%) e CaO (17,21%), com um teor de SiO<sub>2</sub> de 51,72% que a caracteriza como uma rocha básica. Sobre esta rocha sã encontra-se a amostra Niq 221, que tem um teor baixo de CaO e mais alto de MgO (17,72%), mostrando que não se trata da mesma rocha subjacente. Pela composição com elevado teor de SiO<sub>2</sub> (60,84%) associado as concentrações de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11,86%), parecem indicar que se trata de uma rocha que sofre algum tipo de silificação e oxidação. O horizonte oxidado representado pela amostra Niq 220 caracteriza-se pelo teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> acima de 65% bem como uma concentração intermediária de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6,21%) e baixa concentração de SiO<sub>2</sub>. Nesta amostra é característico o elevado teor de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5,18%) e também NiO (1,24%).

O horizonte silicatado é representado pela amostra Niq 219, cuja concentração de SiO<sub>2</sub> apresenta um elevado teor de 51,19%, alto teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14,20%) e teores intermediários de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8,26%) e MgO (7,86%). Os teores de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3,44%) e NiO são muito significativos. A amostra mais superficial (Niq 218) por ser heterogênea e com muitas variações minerais, apresenta uma composição um tanto diferenciada de todas as demais do perfil de alteração. Apresenta proporções semelhantes entre Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13,91%) e MnO (13,21%), com teor bastante significativo de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (16,69%), baixo teor de SiO<sub>2</sub> (27,21%). Pode se destacar o grande teor de NiO (4,91%) e CoO (4,48%) acompanhado com um valor significativo de CuO (1,22%). Entre os elementos traço (Tab. 7) há uma concentração de Zn nos horizontes de alteração, destacando-se principalmente no horizonte silicatado (Niq 219). O Sc ultrapassa o limite de detecção no horizonte de intemperização argilo-ferruginoso que contém o asbolano (Niq 218). Os elementos Y, La e Ce, mostram significativo aumento de concentração em relação à amostra de rocha sã.

Tabela 6. Teores dos elementos maiores, dados em porcentagem de seus óxidos, representativos do perfil 3

	NIQ 218	NIQ 219	NIQ 220	NIQ 221	NIQ 222
SiO <sub>2</sub>	27,21	51,19	9,55	60,84	51,72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,69	8,26	6,21	0,56	2,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,91	14,20	65,76	11,86	6,46
CaO	0,25	0,77	0,08	0,05	17,21
MgO	2,49	7,86	1,85	17,72	19,29
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,19
K <sub>2</sub> O	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01
MnO	13,21	0,76	0,82	0,15	0,15
TiO <sub>2</sub>	0,30	0,35	0,16	0,02	0,15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,40	3,44	5,18	0,49	0,59
BaO	0,47	0,02	0,01	0,01	0,01
NiO	4,91	4,48	1,24	0,99	0,08
CoO	4,48	0,22	0,14	0,02	0,01
CuO	1,22	0,45	0,25	0,02	0,03
ZnO	0,05	0,12	0,06	0,06	0,00
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	0,01	0,06	0,01	0,04
LOI	12,33	8,65	9,10	7,13	1,39
Total	99,02	100,81	100,49	99,95	99,99

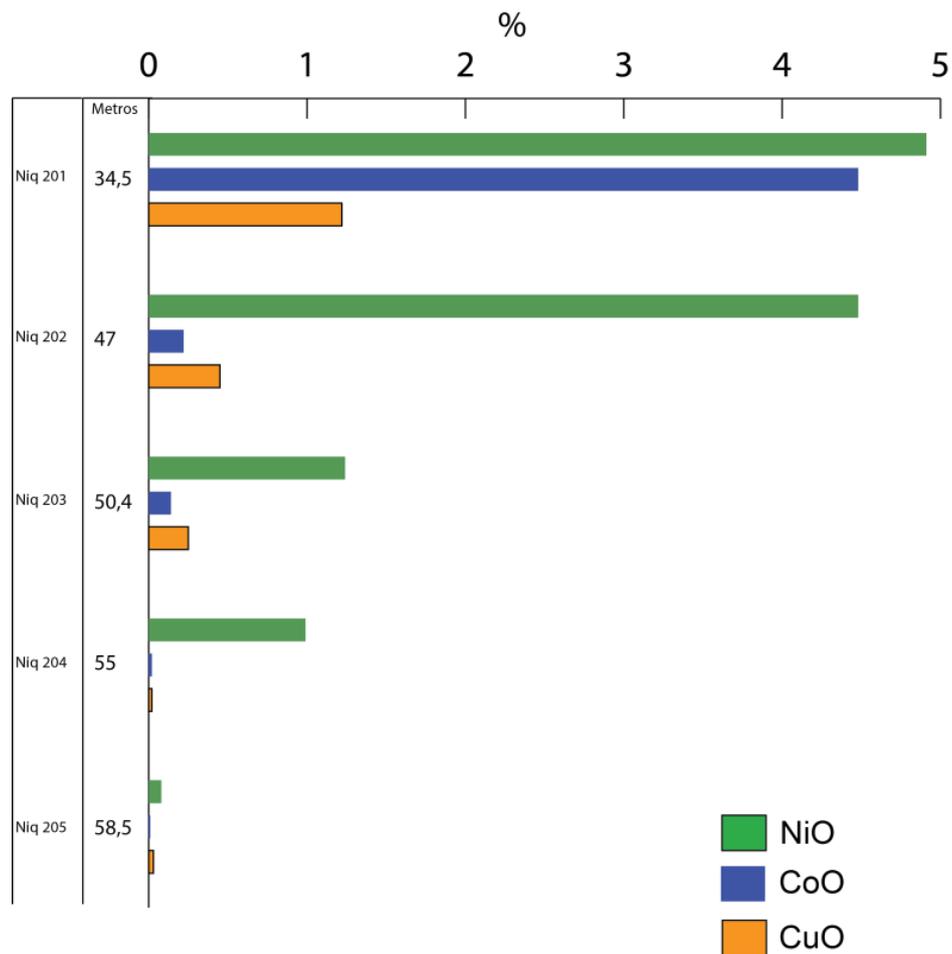


Figura 17. Distribuição em porcentagem dos óxidos de Co, Cu e Ni no perfil 1.

Tabela 7. Composição química das amostras do perfil 3 - elementos traço dados em ppm.

	Niq 218	Niq 219	Niq 220	Niq 221	Niq 222
Mo	0,6	0,05	0,04	0,11	0,16
Pb	6,17	1,82	6,82	0,28	0,63
Zn	323,9	661,2	179,7	388,3	11,2
As	4,6	1,1	0,5	0,3	<0.1
U	0,9	<0.1	0,3	<0.1	<0.1
Th	0,2	0,5	0,4	<0.1	<0.1
Cd	1,2	1	0,26	0,92	0,06
Bi	0,26	0,54	1,03	0,05	0,09
Sc	>100.0	97,3	51,4	6,8	10,7
Tl	4,69	0,25	0,12	<0.02	<0.02
Ga	6,6	5,8	3,8	0,4	1,1
Y	19,16	38,87	4,67	44,58	1,21
La	21,7	28,2	3,8	8,3	<0.5
Ce	134,5	12,8	4,4	0,7	0,6

### 7. 3. QUÍMICA MINERAL

Os principais minerais descritos na microroscopia foram submetidos a análises pontuais através de microsonda eletrônica com WDS, em algumas amostras de rocha sã e de horizontes de alteração.

As amostras de rocha sã escolhidas foram de dunito serpentizado (Niq 013), peridotito (Niq 116) e de piroxenito (Niq 222). Nestas amostras foram obtidas análises pontuais em serpentinas, ortopiroxênio, biotita e óxidos (Cr-epinélio e hematita).

Dois amostras de horizontes de alteração, foram submetidas a análises pontuais por microsonda. No horizonte silicatado (Niq 008) foram feitas análises em esmectita e de asbolano e no horizonte oxidado (Niq 020) foram estudados óxidos e hidróxidos ferruginosos.

#### 7.3.1. Ortopiroxênio

Na tabela 08, são apresentados os dados das análises pontuais realizadas em ortopiroxênio da amostra de peridotito Niq 116 constando também a respectiva fórmula estrutural calculada com base em 6 oxigênios.

A tabela 09 contém os dados das análises de ortopiroxênio de piroxenito da amostra Niq 222 com as fórmulas químicas calculadas com estes dados.

As fórmulas químicas médias dos ortopiroxênios de todos os pontos analisados nessas duas amostras são:

Fórmula média Niq 116:  $[ \text{Mg}_{1,63} \text{Fe}_{0,22} \text{Al}_{0,08} \text{Ca}_{0,03} \text{Mn}_{0,01} \text{Cr}_{0,01} ] [ \text{Al}_{0,10} \text{Si}_{1,90} ] \text{O}_{6,00}$

Fórmula média Niq 222:  $[ \text{Mg}_{1,73} \text{Fe}_{0,21} \text{Ca}_{0,06} \text{Mn}_{0,01} \text{Cr}_{0,01} ] [ \text{Si}_{1,99} ] \text{O}_{6,00}$

Ambas as amostras mostram proporções molares de  $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Ca}^{2+}$  compatíveis com a composição dos ortopiroxênios. Em menor proporção,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  também fazem parte do sítio octaédrico desses minerais. A figura 18 ilustra que Mg está na proporção de 92%, Fe pouco acima de 11% e Ca em torno de 4% no sítio octaédrico na maior parte dos pontos analisados. Isso permite classificar esses ortopiroxênios no campo da enstatita, no limite com pigeonita (Deer *et al.* 1967).

Existem 3 pontos, de número 7/1, 7/2 e 7/3 que têm uma proporção maior de Ca no sítio octaédrico, mas que não alcança a 10% do sítio octaédrico, o que assim os classifica como ortopiroxênio.

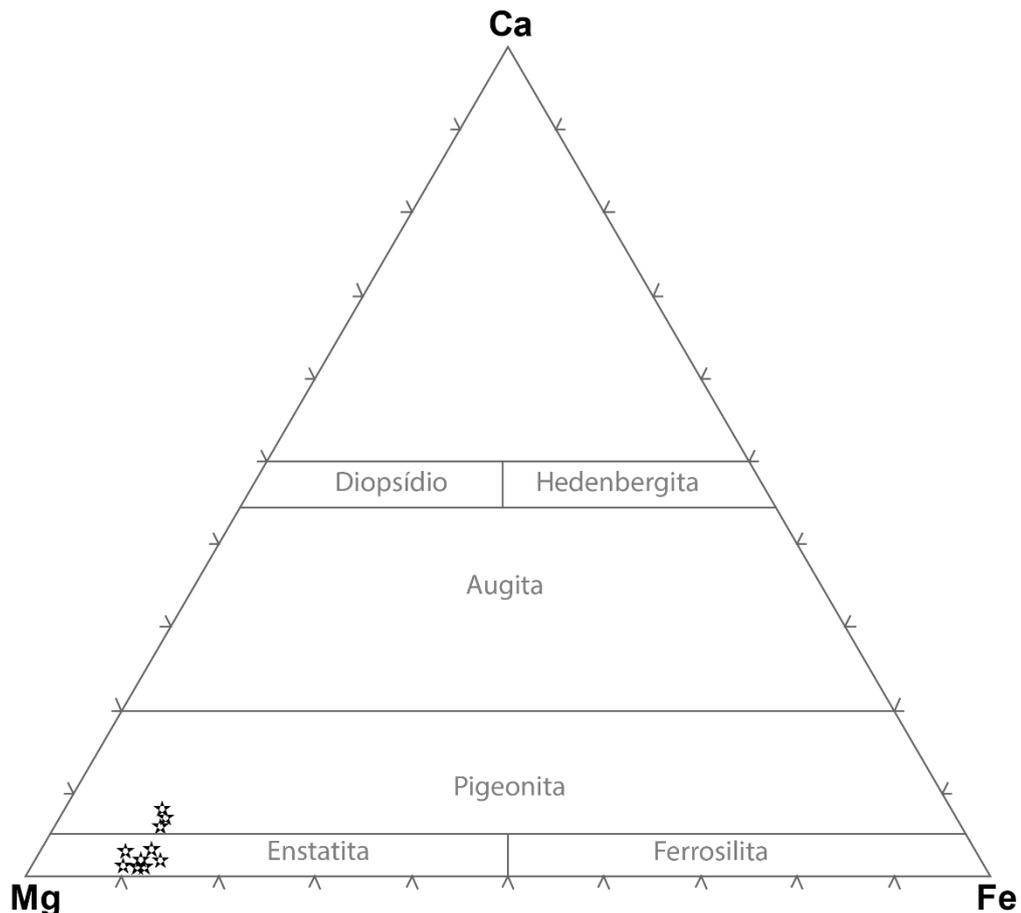


Figura 18. Diagrama ternário dos piroxênios analisados nas amostras Niq 016 e Niq 222.

Tabela 8. Composição química representativa do ortopiroxênio – amostra Niq 116 - peridotito.

	3	6	10	11	12	13	14	15	17	24	26	27
SiO <sub>2</sub>	55,18	54,47	54,72	54,67	54,81	54,84	54,32	54,47	54,65	55,61	55,79	55,58
MgO	32,51	31,97	31,81	31,98	31,68	31,96	31,10	31,92	31,94	31,67	31,61	31,47
CaO	0,66	0,29	0,35	0,65	0,68	0,98	1,90	0,26	0,54	0,23	0,17	0,24
FeO	7,31	7,61	7,59	7,28	7,33	7,37	7,08	7,32	7,45	9,51	9,58	9,52
MnO	0,19	0,16	0,17	0,16	0,14	0,16	0,17	0,22	0,16	0,25	0,26	0,25
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,00	0,01	0,01	0,02	0,04	0,03	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,44	0,42	0,41	0,48	0,49	0,47	0,46	0,50	0,44	0,38	0,36	0,35
CoO	0,01	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,06	0,05	0,00	0,01	0,00	0,01
NiO	0,07	0,07	0,10	0,10	0,04	0,04	0,04	0,06	0,08	0,06	0,04	0,00
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,77	5,10	4,86	4,89	5,11	4,35	4,88	5,25	4,86	2,28	2,32	2,42
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,10	0,07	0,07	0,09	0,08	0,08	0,13	0,08	0,08	0,05	0,04	0,05
Total	101,31	100,17	100,10	100,38	100,39	100,30	100,20	100,16	100,22	100,11	100,17	99,90
Mg	1,66	1,65	1,65	1,65	1,63	1,65	1,61	1,65	1,65	1,65	1,65	1,64
Ca	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,07	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,28	0,28	0,28
Cr	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al <sup>(VI)</sup>	0,08	0,10	0,10	0,09	0,10	0,08	0,09	0,10	0,09	0,04	0,05	0,05
Al <sup>(IV)</sup>	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,11	0,05	0,05	0,05
Si	1,89	1,89	1,90	1,89	1,89	1,90	1,89	1,89	1,89	1,95	1,95	1,95
O	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00

Fórmula estrutural calculada na base de 6 Oxigênios, segundo a metodologia de Deer et al.(1967).

Tabela 9. Composição química representativa do ortopiroxênio – amostra Niq 222 – piroxenito.

	1	2	3	4	5
SiO <sub>2</sub>	54,98	54,89	55,66	55,53	54,53
MgO	31,46	31,34	32,91	33,02	31,89
CaO	2,85	2,51	0,48	0,4	0,94
FeO	6,56	6,63	7,19	7,14	7,02
MnO	0,15	0,18	0,17	0,17	0,16
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,05	0,01	0,01	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35	0,35	0,32	0,31	0,33
CoO	0,01	0	0	0,02	0,02
NiO	0,04	0,04	0,04	0,08	0,04
Total	96,44	95,99	96,78	96,68	94,94
Mg	1,69	1,69	1,76	1,77	1,74
Ca	0,11	0,10	0,02	0,02	0,04
Fe	0,20	0,20	0,22	0,21	0,21
Mn	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Co	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Si	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99
O	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00

Fórmula estrutural calculada na base de 6 Oxigênios, segundo a metodologia de Deer et al.(1967).

### 7.3.2. Micas (biotita-flogopita)

Na tabela 10, são apresentados os dados das análises pontuais realizadas em mica de coloração escura da amostra de peridotito da amostra NIQ 116 constando as respectivas fórmulas estruturais calculadas com base em 24 oxigênios, segundo a metodologia de Deer *et al.*(1967).

As micas são filossilicatos com estrutura TOT, sendo a folha octaédrica (cátion em coordenação 6) situada entre duas camadas tetraédricas (coordenação 4). Esses conjuntos, formados por duas camadas tetraédricas e uma octaédrica (2:1), estão ligados entre si por uma camada de cátions, preferencialmente monovalentes, cujos raios iônicos possibilitam coordenação 12 com oxigênio.

Tabela 10. Composição química representativa da mica no peridotito – amostra Niq 222.

	1	2	3	5
SiO <sub>2</sub>	37,80	37,87	37,65	38,50
MgO	22,05	22,36	22,70	23,05
CaO	0,10	0,10	0,00	0,00
FeO	3,45	3,64	2,99	2,96
MnO	0,02	0,01	0,01	0,05
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,11	0,06	0,09
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,53	0,54	0,51	0,55
CoO	0,00	0,01	0,00	0,00
NiO	0,42	0,28	0,20	0,22
Na <sub>2</sub> O	1,21	0,86	0,40	0,38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,61	15,95	16,06	16,55
K <sub>2</sub> O	7,32	7,62	8,82	9,24
TiO <sub>2</sub>	2,88	3,01	2,87	3,08
Total	91,46	92,36	92,27	94,67
H <sub>2</sub> O*	8,54	7,64	7,73	5,33
K	1,25	1,32	1,53	1,64
Na	0,31	0,23	0,11	0,10
Ca	0,01	0,01	0,00	0,00
Mg	4,41	4,52	4,59	4,77
Fe	0,39	0,41	0,34	0,34
Mn	0,00	0,00	0,00	0,01
V	0,01	0,01	0,01	0,01
Cr	0,06	0,06	0,05	0,06
Ni	0,05	0,03	0,02	0,02
Ti	0,29	0,31	0,29	0,32
Al <sup>(VI)</sup>	0,00	0,00	0,00	0,06
Al <sup>(IV)</sup>	2,47	2,55	2,57	2,65
Si	5,07	5,13	5,11	5,35
O	16,35	17,10	17,01	19,07
OH	7,65	6,90	6,99	4,93

Fórmula estrutural calculadas na base de 24 oxigênios, segundo a metodologia de Deer *et al.*(1967). \* Valor calculado para 100 % (= 100 - TOTAL).

Pela tabela 10 verifica-se que o fechamento das análises é baixo, em torno de 94%, indicando que o mineral está relativamente alterado e apresenta excesso de

água. O sítio tetraédrico é ocupadas por  $\text{Si}^{4+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ , na proporção aproximada de 5 : 2,5 ( $2\text{Si}^{4+} : 1\text{Al}^{3+}$ ). A camada octaédrica é ocupada principalmente por  $\text{Mg}^{2+}$  (~4,5), com menor proporção de  $\text{Fe}^{2+}$  (~0,35). Esta proporção entre  $\text{Mg}^{2+} : \text{Fe}^{2+}$  no sítio octaédrico mostra tratar-se de flogopita. A fórmula estrutural média dos pontos analisados nestas micas é:



### 7.3.3. Serpentinhas

A tabela 11 apresenta os dados das análises químicas pontuais em serpentinhas na amostra NIQ 013 com as respectivas fórmulas estruturais. Os pontos analisados representam as três variações morfológicas de serpentinhas detectadas na petrografia: a serpentina fibrosa e incolor que se forma nas partições da olivina, a serpentina microfolhacea de coloração amarelada dos núcleos e a serpentina fibrosa perpendicular às paredes de fraturas.

Tabela 11. Composição química representativa da serpentina em rocha sã - amostra NIQ 013

	2	19	31	32	61	62	63	64	66	67	68	74	75
SiO <sub>2</sub>	41,14	41,78	38,62	41,03	41,24	40,78	40,46	41,91	42,12	41,00	40,78	41,52	42,37
MgO	38,31	40,13	37,96	39,24	38,99	39,08	38,18	39,45	39,24	38,30	38,24	39,74	39,18
CaO	0,04	0,03	0,06	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,05	0,07	0,08	0,06	0,08
FeO	6,46	4,78	6,58	5,49	5,82	5,82	6,13	3,76	4,33	5,67	6,24	4,64	4,88
MnO	0,14	0,01	0,08	0,06	0,06	0,07	0,06	0,02	0,05	0,04	0,07	0,07	0,04
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,16	0,55	0,42	0,00	0,20	0,17	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
CoO	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,04	0,01	0,01	0,00
NiO	0,36	0,01	0,05	0,10	0,39	0,03	0,12	0,44	0,35	0,35	0,29	0,30	0,35
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,05	0,03	0,06	0,04	0,00	0,02	0,06	0,04	0,04	0,09	0,03	0,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,28	1,62	0,82	0,06	0,54	0,36	0,02	0,00	0,04	0,00	0,00	0,03
K <sub>2</sub> O	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,00	0,01	0,03	0,03	0,05	0,06	0,02	0,06
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,07	0,47	0,27	0,01	0,15	0,14	0,02	0,02	0,02	0,00	0,01	0,00
Total	86,65	87,34	86,05	87,58	86,67	86,72	85,74	85,75	86,25	85,63	85,85	86,41	87,08
H <sub>2</sub> O*	13,35	12,66	13,95	12,42	13,33	13,28	14,26	14,25	13,75	14,37	14,15	13,59	12,92
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
Na	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
Ca	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
Mg	2,71	2,83	2,68	2,78	2,75	2,75	2,67	2,73	2,73	2,67	2,68	2,78	2,75
Fe	0,26	0,19	0,26	0,22	0,23	0,23	0,24	0,15	0,17	0,22	0,25	0,18	0,19
Mn	0,01	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	0,00	0,00
Cr	0,00	0,01	0,02	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Co	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
Ni	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Al <sup>(VI)</sup>	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
Ti	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al <sup>(IV)</sup>	0,00	0,02	0,09	0,05	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Si	1,95	1,97	1,83	1,95	1,95	1,93	1,90	1,95	1,97	1,92	1,92	1,95	2,00
O	4,78	5,01	4,60	5,06	4,80	4,82	4,54	4,59	4,72	4,52	4,56	4,75	4,94
(OH)	4,22	3,99	4,40	3,94	4,20	4,18	4,46	4,41	4,28	4,48	4,44	4,25	4,06

Fórmula estrutural das serpentinhas calculadas na base de 9 oxigênios, segundo a metodologia de Deer et al. \* Valor calculado para 100 % (= 100 - TOTAL)

Pelo exame das tabelas verifica-se que todas as análises dessas serpentinas do dunito mostram serem muito semelhantes, sem indicativo de diferenças composicionais. As diferenças são, portanto, apenas morfológicas e texturais.

A fórmula  $[\text{Mg}_{2,63}\text{Fe}_{0,23}\text{Ni}_{0,01}\text{Na}_{0,01}][\text{Al}_{0,01}\text{Si}_{1,88}]\text{O}_{4,35}(\text{OH})_{4,65}$  representa a média de todos esses pontos analisados sobre as serpentinas. As análises estão representadas no diagrama ternário ilustrado na figura 19 obtida através da tabela 11. Verifica-se que as análises se agrupam na linha de equilíbrio da serpentina.

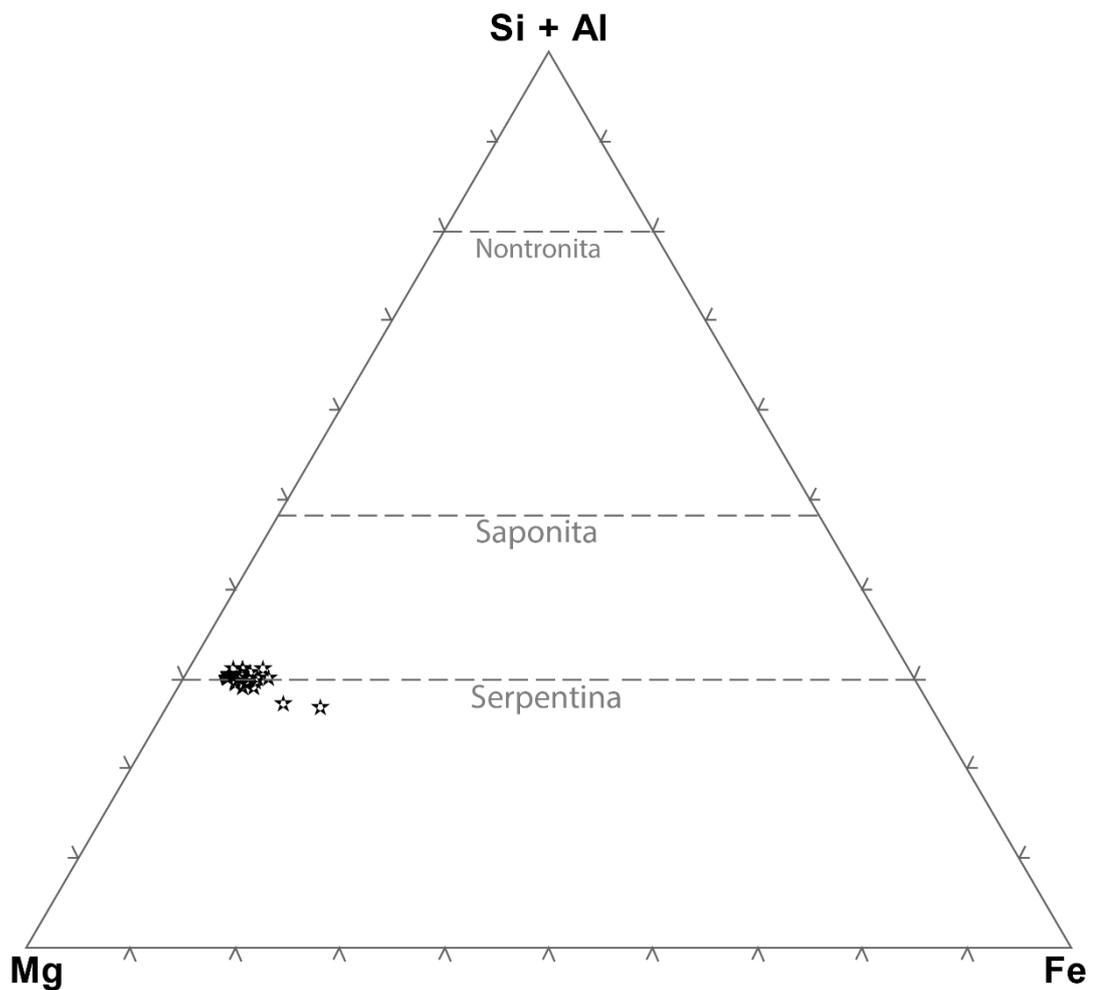


Figura 19. Diagrama ternário totalizando 78 pontos analisados na amostra Niq 013.

### 7.3.4. Óxidos em amostras de rocha

A tabela 12 apresenta os dados das análises pontuais realizadas em cristais descritos como espinélios na petrografia da amostra de piroxenito da amostra Niq 116. Alguns pontos das adjacências desses espinélios também foram analisados. Na tabela constam as fórmulas estruturais calculadas com base em 32 oxigênios para espinélio e 6 oxigênios para hematita, segundo a metodologia de Deer *et al.*(1967).

Os espinélios são óxidos com estrutura do tipo  $AB_2O_4$ , na qual o cátion A é normalmente bivalente com raio entre  $0,6A^\circ$  e  $0,8A^\circ$ , maior do que o B, que é normalmente trivalente e com raio iônico entre  $0,5A^\circ$  e  $0,7A^\circ$ . Na estrutura típica do espinélio, os íons A têm 4 oxigênios vizinhos, ao passo que os íons B têm seis. São considerados como óxidos múltiplos e sua estrutura tem um retículo cúbico, dando origem a cristais isométricos, hexaoctaédricos e octaédricos. Todos os membros do grupo do espinélio são isoestruturais e a substituição iônica é comum dentro dos limites impostos pelo tamanho dos íons envolvidos. A substituição de um íon B por outro depende do tamanho iônico, sendo incompleta a solução sólida relativamente aos íons do sítio B. Assim, embora algum  $Fe^{3+}$  e  $Cr^{3+}$  possam ocorrer no espinélio e na gahnita, não existe uma série completa entre o espinélio ( $MgAl_2O_4$ ) e a magnesioferrita ( $MgFe_2O_4$ ). Já na posição A pode haver uma solução sólida completa. Sua fórmula química é geral  $AB_2O_4$ , onde  $A = Mg^{2+}, Fe^{2+}, Ti^{4+}, Zn^{2+}, Mn^{2+}$ , etc. e  $B = Al^{3+}, Fe^{3+}, Cr^{3+}$ , etc. (Rodger, 1972).

Nos pontos analisados dos espinélios deste trabalho (Fig. 20) tem-se  $Mg^{2+}$  e  $Fe^{2+}$  como principais cátions bivalentes, sendo que os trivalentes são principalmente  $Al^{3+}$  e  $Cr^{3+}$ . A fórmula estrutural média desses espinélios (Tab. 12) mostra uma proporção aproximada de 5,8  $Mg^{2+}$  para 2,4  $Fe^{2+}$  na posição A e 13,8  $Al^{3+}$  para 1,8  $Cr^{3+}$  na posição B. Assim, recalculando para uma fórmula unitária, tem-se que a fórmula média pode ser representada por:  $[Mg_{0,73} Fe_{0,31} Ni_{0,01}] [Al_{1,74} Cr_{0,23}] O_{4,00}$ . A proporção  $Mg^{2+}: Fe^{2+}$  (2,5:1) corresponde aproximadamente ao indicado para o pleonasto, mas como há substituição de parte do  $Al^{3+}$  por  $Cr^{3+}$ , este mineral pode ser classificado como Cr-pleonasto ou simplesmente Fe-Cr-espinélio (Deer *et al.*, 1967). Dois pontos analisados nas proximidades de Fe-Cr-espinélio tiveram suas fórmulas calculadas para 6 oxigênios e foram classificados como hematita (Tab.12), cuja fórmula estrutural é:  $[Fe_{1,80} Mg_{0,05} Mn_{0,01} V_{0,01} Cr_{0,03} Al_{0,01} Ti_{0,09}] O_{3,00}$ .

Tabela 12. Composição química representativa dos óxidos – espinélio (pontos 1 a 6, fig. 20) e hematita em peridotito, amostra NIQ 117.

	Fe-Cr-espinélio						Hematita	
	1	2	3	4	5	6	7	8
MgO	18,68	18,05	18,65	18,74	18,71	18,88	2,40	0,13
FeO	13,88	13,77	13,92	14,00	13,86	13,88	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	84,13	95,65
MnO	0,16	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13	0,40	0,06
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,12	0,10	0,04	0,06	0,06	0,34	0,37
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,89	11,07	11,07	11,06	10,98	10,87	2,38	0,45
CoO	0,02	0,07	0,04	0,03	0,05	0,05	0,02	0,06
NiO	0,26	0,28	0,26	0,33	0,26	0,33	0,04	0,11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55,66	55,75	56,05	55,97	56,10	55,77	0,59	0,71
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,05	0,12	0,11	0,06	0,04	9,10	0,36
Total	99,67	99,28	100,34	100,41	100,20	100,01	99,40	97,88
Mg	5,89	5,89	5,71	5,87	5,86	5,93	0,18	0,01
Fe <sup>++</sup>	2,46	2,46	2,44	2,46	2,44	2,45	0,00	0,00
Fe <sup>+++</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,25	3,95
Mn	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00
V	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Cr	1,82	1,82	1,86	1,84	1,83	1,81	0,10	0,01
Co	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Ni	0,04	0,04	0,05	0,06	0,04	0,06	0,00	0,01
Al	13,88	13,88	13,95	13,86	13,90	13,86	0,04	0,01
Ti	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,35	0,00
O	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	6,00	6,00

Fe-Cr espinélio, fórmula estrutural calculada na base 32 oxigênios. Hematita fórmula estrutural calculada na base de 6 Oxigênios.

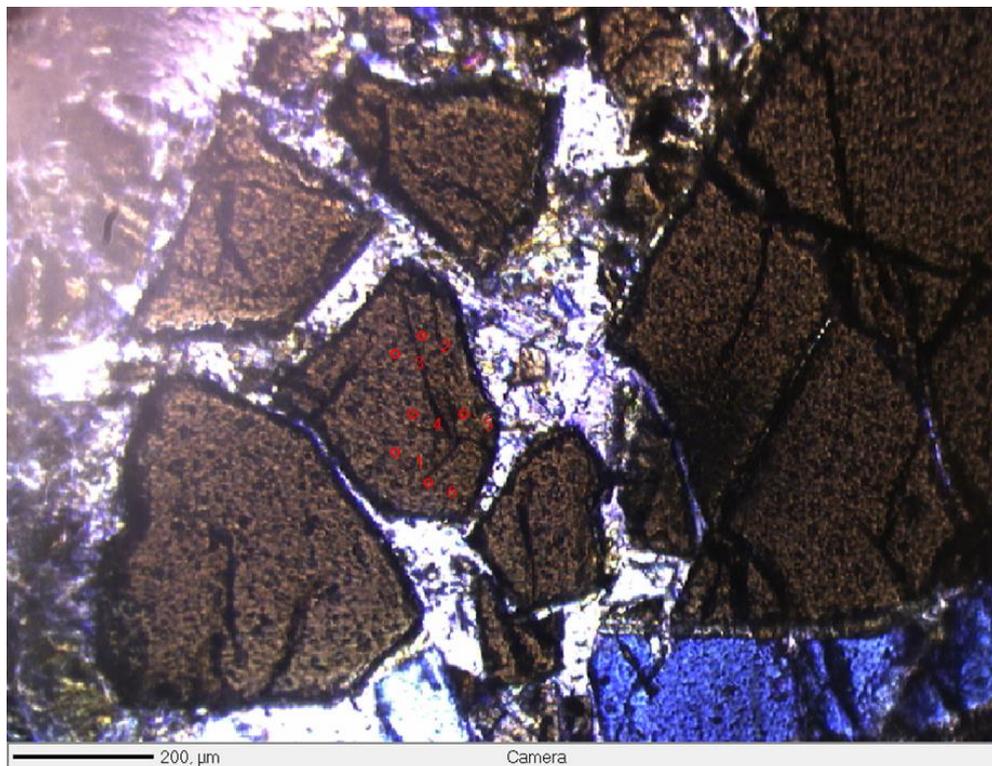


Figura 20. Fotomicrografia de luz transmitida com os pontos analisados no espinélio. Amostra Niq 116.

### 7.3.5. Minerais secundários nos horizontes de intemperização

#### 7.3.5.1. Óxidos e hidróxidos ferruginosos – horizonte oxidado

Os horizontes oxidados originados pela alteração intempérica de rochas ultramáficas ou mesmo máficas podem ser caracterizados como lateritas. Sua composição envolve uma considerável variedade de substâncias ferruginosas, desde géis amorfos até minerais bem cristalizados. Por se tratar de um horizonte com muita porosidade, muitas análises pontuais por microsonda foram prejudicadas, não alcançando fechamento considerado seguro.

A tabela 13 contém algumas análises químicas que puderam ser consideradas satisfatórias, em pontos de uma amostra de um horizonte oxidado (Niq 220). A partir da tabela, foram calculadas fórmulas químicas 6 O+OH (Deer *et al.*, 1967).

Tabela 13. Composição química representativa dos óxidos e hidróxidos ferruginosos na amostra Niq 220 do horizonte oxidado

Amostra	Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) parcialmente hidratada				Goethita (FeO.OH) hidratada				Hidróxido férrico hidratado		
	EDS2-2	EDS5-4	EDS4-01	EDS3-4	EDS4-2	EDS5-1	EDS5-2	EDS5-3	EDS2-3	EDS3-3	EDS3-7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,20	0,07	0,85	1,21	1,10	1,09	1,25	1,65	2,29	2,17
SiO <sub>2</sub>	2,29	0,47	0,16	0,85	6,07	5,22	5,28	6,44	5,07	5,70	5,28
MgO	0,52	0,01	0,02	0,31	0,15	0,12	0,17	0,14	0,10	0,12	0,07
CoO	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,37	0,00	0,04	0,46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	93,33	92,55	95,90	70,93	75,54	69,59	75,89	75,83	52,39	56,57	67,28
NiO	0,04	0,00	0,00	0,01	3,80	3,91	4,11	3,91	0,82	0,73	0,82
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,02	1,42	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,06	0,05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,08	0,06	20,18	0,27	0,32	0,31	0,36	0,95	0,84	0,89
CaO	0,09	0,13	0,03	0,18	0,09	0,04	0,07	0,09	0,10	0,09	0,06
ZnO	0,00	0,04	0,01	0,10	0,01	0,01	0,03	0,01	0,07	0,09	0,04
MnO <sub>2</sub>	1,10	0,12	0,01	0,45	0,19	0,16	0,19	0,17	0,02	0,09	0,11
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,00	0,00	0,10	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
CuO	0,00	0,02	0,04	0,00	0,42	0,48	0,52	0,49	0,00	0,00	0,00
Total	97,44	94,01	96,31	95,38	87,76	81,17	87,65	89,07	61,19	66,63	77,24
H <sub>2</sub> O*	2,56	5,99	3,69	4,62	12,24	18,83	12,35	10,93	38,81	33,37	22,76
Fe	3,50	3,30	3,57	2,54	2,36	1,99	2,38	2,41	1,16	1,33	1,80
Mn	0,02	0,00	0,00	0,01	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
Cr	0,00	0,00	0,00	0,76	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Co	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,12	0,14	0,13	0,02	0,02	0,02
Zn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,00	0,01	0,00	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,09
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00
Ti	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Si	0,11	0,02	0,01	0,04	0,25	0,20	0,22	0,27	0,15	0,18	0,19
Mg	0,04	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Ca	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O	5,53	5,05	5,39	5,23	2,84	2,39	2,84	2,94	1,42	1,64	2,15
(OH)	-	-	-	-	2,84	2,39	2,84	2,94	1,42	1,64	2,15
H <sub>2</sub> O	0,47	0,95	0,61	0,77	0,27	1,19	0,30	0,07	3,10	2,64	1,62

Todas as fórmulas estruturais foram calculadas na base de 6 oxigênios.

Com esses dados, constata-se que os óxidos e hidróxidos analisados são constituídos por hematita, goethita e  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  com diferentes graus de hidratação. A hematita tem pequenas proporções de substituição do  $\text{Fe}^{3+}$  por  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  ou  $\text{Ti}^{4+}$ , além de presença  $\text{H}_2\text{O}$  (hidratação). A goethita tem pequena substituição de  $\text{Fe}^{3+}$  por  $\text{Al}^{3+}$ , mas a substituição do  $\text{Fe}^{3+}$  por  $\text{Ni}^{2+}$  é significativa. O  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  tem substituições discretas de  $\text{Fe}^{3+}$  por  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  e  $\text{Ni}^{2+}$ .

#### 4.3.5.2. Óxido-hidróxido de Manganês e Níquel – Asbolano.

Nas proximidades do horizonte oxidado superior, ocorrem veios e bolsões de material friável de cor marron muito escuro a preto, associados a uma parte silicatada (garnierita). Foram realizadas análises pontuais neste material, com uso de microsonda eletrônica. Muitas dessas análises ficaram prejudicadas por não alcançar um fechamento que permitisse confiabilidade. Na tabela 14 estão os dados de algumas análises que deram uma resposta suficientemente confiável. A partir das composições, foram calculadas fórmulas estruturais, como óxido-hidróxido para 4 O+OH (Deer *et al.*, 1967).

Óxido-hidróxidos de Mn-Ni-Co são comuns nos perfis lateríticos originados sobre rochas ultramáficas (Trescases, 1975). No asbolano, os átomos de Ni produzem camadas parciais de  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  com ligações de hidrogênio entre camadas de  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  e  $\text{MnO}_2$ . Por isso, entende-se que o asbolano possui uma estrutura de camada mista. Ni-Co-asbolano tem camadas de  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  ao longo do eixo c. São minerais de natureza heterogênea em uma escala muito fina (Manceau *et al.*, 1992). A caracterização de óxidos de manganês hidratados em geral é difícil e frequentemente incompleta.

No presente estudo (Tab. 14), esses minerais têm em sua fórmula estrutural predominância de Mn (0,5 a 1,14 apfu) e Ni (0,22 a 0,53 apfu). O Co está presente em proporção mais baixa (0,02 a 0,05 apfu). Fe, Al, Si, Mg, Ca são considerados impurezas comuns nestes minerais. Pela composição de sua fórmula estrutural, estes óxido-hidróxidos podem ser caracterizados como Ni-asbolano. A sua respectiva fórmula estrutural é:



Tabela 14. Composição química representativa de concentrações de asbolano que ocorrem no horizonte silicatado. Amostra Niq 008.

	EDS3-04	EDS3-06	EDS4-6	EDS4-10	EDS4-11
SiO <sub>2</sub>	24,06	21,50	22,91	4,42	11,58
MgO	2,57	1,54	4,81	6,37	4,30
CaO	0,23	0,16	0,51	0,43	0,61
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,15	1,90	14,76	9,50	11,15
MnO <sub>2</sub>	19,62	22,91	22,75	45,44	36,39
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,23	0,06	0,02	0,04	0,09
CoO	2,24	2,88	2,93	2,06	1,40
NiO	23,73	30,53	14,31	13,57	18,05
ZnO	0,40	0,86	0,28	0,30	0,37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,74	2,51	4,24	3,60	3,57
CuO	0,94	1,37	2,44	3,47	2,57
TiO <sub>2</sub>	0,15	0,08	0,38	0,13	0,27
TOTAL	87,23	86,47	91,68	89,48	90,61
(H <sub>2</sub> O)*	12,77	13,53	8,32	10,52	9,39
Fe	0,13	0,03	0,25	0,14	0,18
Mn	0,54	0,63	0,64	1,14	0,97
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Co	0,04	0,05	0,05	0,03	0,02
Ni	0,41	0,53	0,26	0,22	0,30
Zn	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
Al	0,12	0,06	0,11	0,08	0,09
Cu	0,02	0,02	0,04	0,05	0,04
Ti	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Si	0,52	0,47	0,51	0,09	0,24
Mg	0,08	0,05	0,16	0,19	0,13
Ca	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
O	2,47	2,42	2,81	2,97	2,92
(OH)	1,21	1,21	1,15	0,68	0,86
H <sub>2</sub> O	0,32	0,38	0,04	0,36	0,23

Fórmula estrutural do asbolano, calculadas para 4 O+OH (Deer et al., 1967).

(\*) - Valor calculado para 100% (= 100 - Total)

#### 4.3.5.3. Esmeclitas

Nos horizontes argilosos e nos bolsões argilo-ferruginosos (Fig. 5) ocorrem argilominerais (esmeclita e caulinita) contidos em um material friável esverdeado (garnierita). Na tabela 15 são apresentados os dados das análises pontuais e as respectivas fórmulas estruturais dos diferentes pontos analisados por microsonda eletrônica desses argilominerais, no caso esmeclitas (Fig. 21 e 22).

As esmeclitas são um grupo de argilominerais que têm sua estrutura formada

por agrupamentos constituídos por uma folha octaédrica (coordenação 6) com os cátions ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , etc) entre duas folhas tetraédrica (coordenação 4) com os cátions  $\text{Si}^{4+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ . Essas camadas são interligadas por cátions trocáveis ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) e  $\text{H}_2\text{O}$ . O conjunto tem espessura de  $\sim 14 \text{ \AA}$ , mas, por causa da variação do grau de hidratação, pode dilatar e contrair, com variação de  $10 \text{ \AA}$  a  $14 \text{ \AA}$ .

Tabela 15. Composição química representativa da esmectita da parte silicatada (garnierita) do horizonte de veios e bolsões do perfil 1, amostra Niq 008.

	EDS1-01	EDS1-02	EDS2-01	EDS2-02	EDS2-03	EDS2-04	EDS4-04	EDS4-9	EDS4-13	EDS5-01	EDS5-03	EDS6-05
$\text{SiO}_2$	51,19	55,47	40,46	49,74	49,30	31,33	48,36	50,97	50,97	43,67	46,42	46,67
$\text{MgO}$	3,94	3,48	3,08	3,07	2,32	2,27	4,47	4,54	3,77	3,53	2,57	3,03
$\text{CaO}$	0,74	0,94	0,79	1,14	1,00	0,63	0,62	0,72	0,82	0,70	0,11	0,69
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	17,33	17,73	24,67	15,94	12,92	50,01	20,53	19,95	18,23	26,08	11,42	15,01
$\text{MnO}_2$	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,13	0,02	0,17	0,00	0,00	0,00
$\text{V}_2\text{O}_3$	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	1,49	0,79	1,23	1,22	0,44	0,78	0,00	0,08	0,06	1,10	1,20	0,86
$\text{CoO}$	0,00	0,13	0,52	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,04	0,00
$\text{NiO}$	9,50	9,87	7,95	11,30	15,45	4,19	5,60	7,44	10,11	6,80	15,55	9,26
$\text{Na}_2\text{O}$	0,06	0,05	0,09	0,11	0,05	0,01	0,28	0,35	0,27	0,19	0,05	0,19
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2,86	3,12	2,15	2,50	2,98	1,51	2,34	2,80	2,53	2,68	3,22	2,81
$\text{K}_2\text{O}$	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	1,04	1,28	0,99	0,27	0,89
$\text{TiO}_2$	0,05	0,10	0,09	0,05	0,14	0,29	0,06	0,07	0,07	0,40	0,06	0,09
$\text{CuO}$	0,30	0,21	0,80	1,39	0,14	1,00	0,38	0,31	0,30	0,97	0,16	0,29
$\text{BaO}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,02
Total	87,49	91,91	81,85	86,47	84,87	92,02	83,42	88,29	88,56	87,27	81,13	79,81
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,17	0,22	0,17	0,04	0,14
Na	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,00	0,07	0,09	0,07	0,05	0,01	0,04
Ca	0,10	0,14	0,11	0,16	0,14	0,10	0,08	0,10	0,12	0,10	0,01	0,09
Mg	0,76	0,70	0,59	0,59	0,44	0,51	0,83	0,89	0,74	0,70	0,48	0,55
Fe	1,69	1,79	2,38	1,56	1,25	5,73	1,93	1,97	1,82	2,64	1,07	1,38
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	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	0,00
Cr	0,15	0,08	0,12	0,13	0,04	0,09	0,00	0,01	0,01	0,12	0,12	0,08
Co	0,00	0,01	0,05	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Ni	0,99	1,06	0,82	1,18	1,60	0,51	0,56	0,78	1,08	0,73	1,56	0,91
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,17	0,22	0,17	0,04	0,14
Al	0,44	0,49	0,32	0,38	0,45	0,27	0,34	0,43	0,39	0,42	0,47	0,40
Si	6,63	7,44	5,17	6,46	6,33	4,76	6,03	6,67	6,74	5,85	5,78	5,67
O	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
(OH)	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

Fórmula estrutural da esmectita, calculadas na base de 24  $\text{O}+(\text{OH})$ .

Nas amostras analisadas neste trabalho, verifica-se que a folha octaédrica é ocupada principalmente por  $\text{Fe}^{3+}$ , seguido por  $\text{Ni}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ . O principal ocupante da folha tetraédrica é o  $\text{Si}^{4+}$ , mas com substituição parcial por  $\text{Al}^{3+}$ . Os cátions trocáveis

são principalmente  $\text{Ca}^{2+}$  e menores proporções de  $\text{Na}^+$ . Trata-se, portanto, de esmectita predominantemente férrica e pode ser classificada como nontronita.

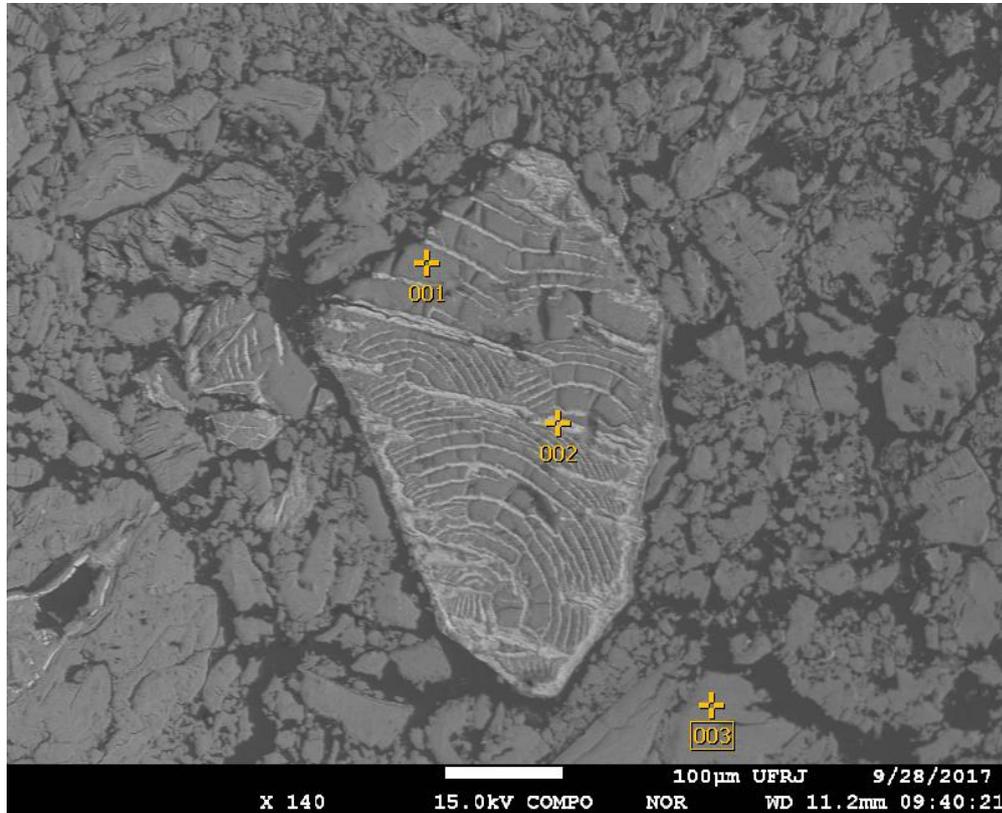


Figura 21. Fotomicrografia de esmectita (parte cinza), mostrando linhas de acúmulo de óxidos nplanos de clivagem (estrias claras). Pontos 001 e 003 = esmectita e ponto 002 = goethita.

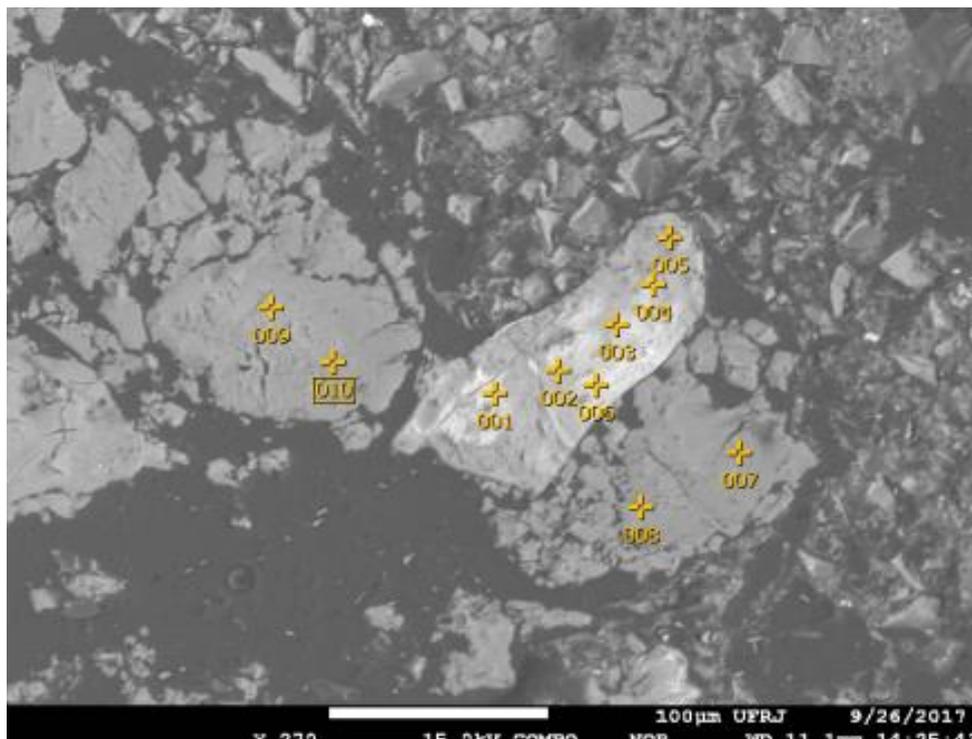


Figura 22. Fotomicrografia de esmectita (partes cinza), mostrando linhas de acúmulo de óxidos nos planos de clivagem (manchas claras).

Nontronita -  $\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2((\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  – é um mineral *dioctaédrico*, isto significa que três espaços estruturais na folha octaédrica são ocupados por dois cátions trivalentes ( $2 \text{Fe}^{3+}$ ). A Pimelita -  $\text{Ni}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  - é *trioctaédrica*, o que significa que três espaços são ocupados por três cátions bivalentes ( $\text{Ni}^{2+}$ ).

Deer *et al.* (1967) acha pouco provável que exista solução sólida entre esmectitas dioctaédricas e trioctaédricas, mas cita que a saponita (trioctaédrica) pode conter alguns cátions trivalentes para compensar cargas de substituições de  $\text{Si}^{4+}$  por  $\text{Al}^{3+}$ . Este mesmo raciocínio poderia explicar esmectitas com alto conteúdo de  $\text{Ni}^{2+}$  junto com  $\text{Fe}^{3+}$ , como as caracterizadas neste trabalho.

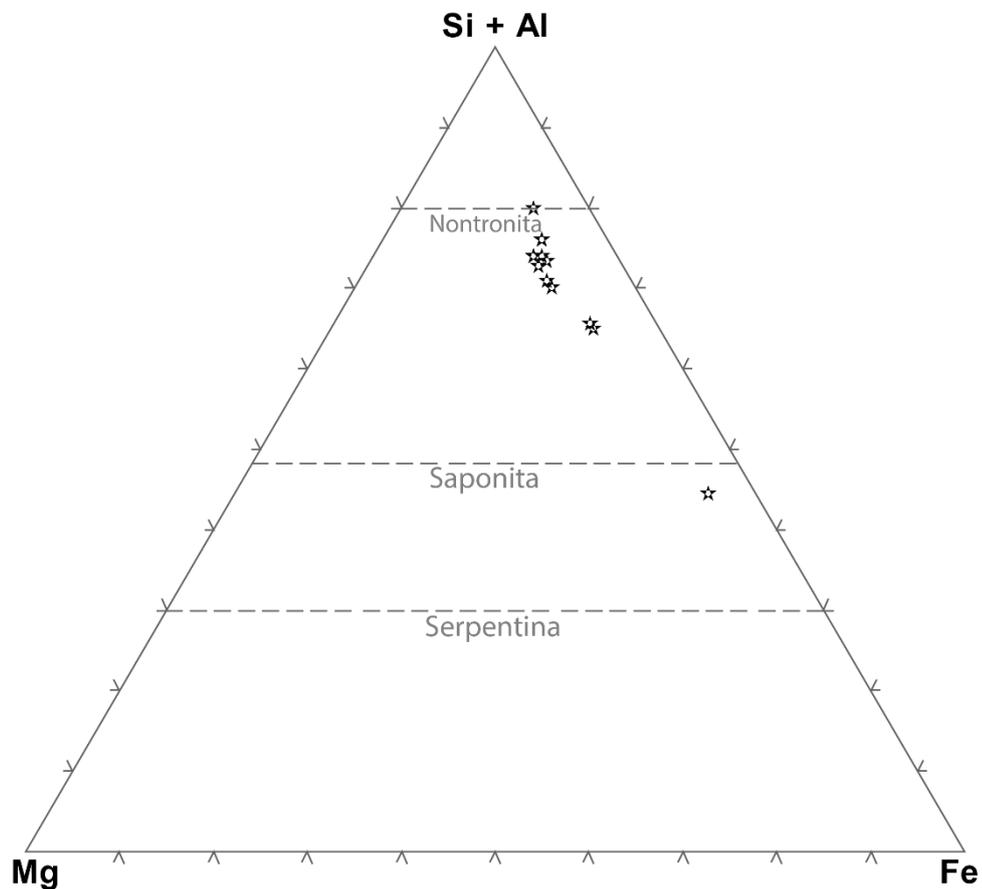


Figura 22. Diagrama ternário das análises das esmectitas da amostra Niq 008

As análises feitas para este trabalho indicam que se tem desde nontronita até esmectita com alta proporção de Ni (pimelita), como no ponto EDS2-03 (Tab. 23), além de diversos pontos intermediários de nontronita com proporções variáveis de

$\text{Ni}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ . Estes dados concordam com os obtidos por Mano *et al.* (2011), que através de análises de DRX, indicaram a presença de esmectitas di e tri-octaédricas, uma rica em ferro e outra com teores significativos de níquel.

Por outro lado, cabe ressaltar que as fotomicrografias feitas na microsonda eletrônica (Fig. 21 e 22) mostram que as esmectitas têm acúmulos de óxidos e hidróxidos (Fe, Mn) em suas clivagens, fato que pode interferir nos resultados analíticos em alguns pontos. A fórmula estrutural mais representativa da esmectita é:



## 8. DISCUSSÃO

### 8.1 OS PERFIS ESTUDADOS NO CONTEXTO MORFOCLIMÁTICO

Alguns fatores controlam a formação das lateritas niquelíferas. Entre eles são importantes a composição do protólito com seu contexto tectônico, o clima com suas variações de temperatura e taxa de precipitação, as condições locais do relevo e o tempo de duração do processo.

Os perfis de alteração estudados neste trabalho correspondem a três furos de sondagem realizados na parte ultramáfica do CMUN. Este complexo consiste principalmente de rochas básicas gabróicas associadas a acamadamentos ultramáficos na parte inferior.

Como se trata de um complexo estratiforme, os três perfis de alteração são representativos somente das faixas de dunitos serpentinizados (perfil 1) e da faixa de peridotitos (perfil 2) piroxenitos (perfil 3) intercalados (Fig. 4).

Considerando os fatores que desenvolvem os perfis de alteração, estes três perfis têm muita identidade entre si. Todos os três têm protólito composto por rocha ultramáfica – dunito serpentinizados, peridotito e piroxenito. Os demais fatores, como contexto tectônico, topografia e clima, são também coincidentes pois ocorrem no mesmo contexto regional.

Faz-se necessário considerar que o CMUN tem bandamento e foliação concordantes e orientados NNE-SSW, com mergulho de  $45^{\circ}$  -  $50^{\circ}$  para W na parte

leste do complexo aumentando o seu mergulho para  $60^{\circ}$  na parte central e para subvertical nas partes mais a Oeste do complexo. Esta razão, em vista desses perfis estarem situados na parte Leste do CMUN que é subvertical, permite considerar que as fácies intemperizadas existentes sobre eles sejam resultantes do intemperismo dos três protólitos descritos.

Com referência às condições climática, os três perfis estudados estão situados a  $\sim 13^{\circ}$  de latitude Sul. Este fato indica que sua situação climática é concordante com a afirmação de Marsh & Anderson (2011), segundo os quais os depósitos de Ni-Co lateríticos ocorrem dentro da faixa de  $20^{\circ}\text{N}$  e  $20^{\circ}\text{S}$  do equador com poucas exceções. Sua distribuição global é reflexo de dois fatores: o protólito ultramáfico a partir do qual eles desenvolveram e o clima que sobre eles atuou.

Retallack (2010) fornece uma análise completa sobre a variação secular das lateritas de Ni. Ele descreve os depósitos retomando um conceito discutido por Hay e Wood (1990) e Wilkinson *et al.* (2009), pois são depósitos de superfície e, portanto, facilmente suscetíveis à erosão. Retallack (2010) também descreve a importância do  $\text{CO}_2$  no processo de intemperismo e que antes de 392 Ma houve escassez de formação de laterita porque a quantidade de  $\text{CO}_2$  produzida em solos da floresta tropical não existia. Uma combinação de picos de  $\text{CO}_2$  atmosférico e flutuações paleoclimáticas ocorreram durante o desenvolvimento dos depósitos que se formaram longe do equador, como aqueles em Oregon e nos Montes Urais.

As características do relevo do Brasil central, onde se situa o CMUN, resultaram de uma evolução iniciada no Cretáceo superior, quando houve levantamento geral do continente sul-americano, seguido de um longo período erosivo que nivelou a paisagem e estabeleceu a Superfície Sul-Americana (King, 1956). No Terciário inferior o intemperismo levou à formação de coberturas de alteração de natureza ferralítica (Pedro & Volkoff, 1984). Novo levantamento ocorrido no Terciário superior promoveu outro ciclo erosivo, formando a Superfície Velhas, que desmantelou a antiga superfície, mas deixou alguns relevos residuais (Braun, 1971). Tanto sobre a Superfície Velhas, quanto sobre os relevos residuais da Superfície Sul-Americana, houve retomada do intemperismo que formou novos perfis ferralíticos (Pedro & Volkoff, 1984). A atual fase erosiva está degradando a Superfície Velhas, entalhada pela drenagem, ocasionando a destruição das coberturas ferralíticas.

Os depósitos de Níquel laterítico do Brasil central estão relacionados às duas

superfícies, em função de estarem mais ou menos arrasados. O Depósito de Niquelândia está parcialmente arrasado à superfície Velhas nas partes mais baixas, mas tem remanescentes da Superfície Sul-Americana nos topos mantidos por camada silicificada (Oliveira, 1990). Entre os três perfis estudados, o perfil 1 é o mais completo, tendo a camada silicificada no topo. Os perfis 2 e 3 não têm a camada silicificada no topo e representam, portanto, partes mais arrasadas pela erosão. Estes dois perfis estão situados na parte mais baixa, onde está sendo erodida a Superfície Velhas.

## 8. 2 EVOLUÇÃO DOS PERFIS NO PROCESSO DE LATERITIZAÇÃO

Os horizontes desenvolvidos pela alteração das rochas nos três perfis estudados são semelhantes entre si, ainda que tenham diferenças nas suas espessuras. Todos eles desenvolveram horizontes argilosos e horizontes oxidados. O perfil 1, desenvolvido sobre dinito serpentizado, é de maior espessura e com melhor definição de seus horizontes. O perfil 2, formado sobre peridotito, é o de menor espessura e com menor variação de seus horizontes, desenvolvendo apenas horizontes oxidados. O perfil 3, proveniente da alteração de piroxenito é semelhante ao perfil 1, mas com menor espessura.

Estas observações concordam com Marsh & Anderson (2011) que afirmam: *“De todos os depósitos o principal tipo de rocha fonte dos depósitos de níquel laterítico são os peridotitos ofiolíticos, pois predominam harzburgitos e dunitos com diferentes níveis de serpentização. O nível de serpentização do protólito tem um controle importante sobre a formação dos jazimentos lateríticos de Ni-Co. Quanto maior o nível de serpentização do protólito maior será o horizonte saprolítico, entretanto, os peridotitos com menor nível de serpentização tendem a formar depósitos do tipo oxidado, com um horizonte saprolítico menos espesso”*

No que se refere à evolução mineralógica, os três perfis são semelhantes. Nas partes argilosas, destaca-se a esmectita, associada a caulinita em menor proporção. A esmectita é representada por nontronita com substituição de  $\text{Fe}^{3+}$  por  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em diferentes proporções. Em alguns pontos, a esmectita alcança teores de  $\text{Ni}^{2+}$  e  $\text{Co}^{2+}$  que pode ser classificada como pimelita. Estes dados concordam com os obtidos por Mano *et al.* (2011) através de análises de DRX, que indicaram a presença de esmectitas di e tri-octaédricas, uma rica em ferro e outra

com teores significativos de níquel nesta mesma área.

Alguns veios e bolsões que aparecem associados às partes argilosas, contêm óxido-hidróxido de Mn-Ni-Co hidratados, com altas concentrações nesses metais, que foi caracterizado como asbolano.

Nos horizontes oxidados, o desenvolvimento do perfil de alteração leva à formação de diferentes óxidos e hidróxidos ferruginosos. Estes materiais variam deste géis amorfos, passando por  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  hidratado, goethita e até hematita, mas a goethita predomina. Em todos eles, há presença de outros metais que substituem o  $\text{Fe}^{3+}$ .

Estas observações mineralógicas também corroboram as afirmações de Marsh & Anderson (2011), segundo os quais a alteração intempérica de uma rocha são ultramáfica serpentizada forma uma camada de saprólito cujo topo transiciona para uma camada argilosa. Acima das argilas há uma camada de limonita com goethita, hematita e oxí-hidróxidos de Mn, como asbolano.

Tabela 16. Tabela 16. Percentagens de perdas e ganhos dos elementos maiores no perfil 1, calculados em relação à rochas são (NIQ 013) pelo método isoalumínio (Krauskopf, 1972).

	NIQ 001	NIQ 002	NIQ 003	NIQ 004	NIQ 005	NIQ 006	NIQ 007	NIQ 008	NIQ 009	NIQ 010	NIQ 011	NIQ 012	NIQ 013
$\text{SiO}_2$	493	503	-97	-89	-87	-96	-89	-72	-72	-84	-96	-79	0
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	28	136	-64	-81	-81	50	-88	-57	-57	-54	0	-72	0
CaO	0	25	-97	-30	-5	-91	-48	310	268	160	-51	370	0
MgO	-100	-98	-100	-99	-99	-100	-100	-98	-97	-98	-99	-84	0
$\text{Na}_2\text{O}$	0	150	-94	-90	-60	-82	-93	-79	-79	-87	-86	-80	0
$\text{K}_2\text{O}$	0	150	-94	-20	-90	-64	-93	-79	-79	-87	-86	-80	0
MnO	0	105	-17	759	186	253	-57	-29	-27	-31	8	-65	0
$\text{TiO}_2$	0	-17	-28	-60	-57	110	5	12	19	-13	-21	-7	0
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0	110	-82	-85	-82	5	-97	-52	-50	-75	12	-8	0
BaO	0	150	-76	750	70	242	-86	-79	-79	-87	-86	-80	0
NiO	0	47	-94	93	91	-95	-77	789	728	-46	-38	-3	0
CoO	0	-25	46	1591	759	-68	20	60	55	-27	30	-72	0
CuO	0	1650	428	16030	7870	1124	810	5549	7271	875	1538	60	0
ZnO	0	50	-82	190	196	-14	-69	610	799	7	127	-44	0
$\text{V}_2\text{O}_5$	0	195	-84	-78	-85	-35	-95	-47	-33	-76	7	-13	0
LOI	-33	-74	-97	-93	-93	-95	-97	-89	-89	-93	-93	-89	0

A evolução composição química nos perfis mostra forte enriquecimento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , junto com MnO, NiO e CoO nos horizontes de intemperização, o que é característico do processo de lateritização. A maior parte do Co ocorre no oxi-hidróxido de Mn asbolano. Nontronita é um argilomineral de Fe, que pode conter

Ni, característico do minério laterítico do tipo silicatado (Marsh & Anderson, 2011). Com a finalidade de quantificar o comportamento dos principais elementos químicos foi realizado um balanço de massa, aplicando-se o método de balanço geoquímico isoalumínio (Krauskopf, 1972). Este método baseia-se na premissa de calcular as perdas ou ganhos percentuais de cada elemento, nos diferentes horizontes de um perfil de alteração, em função de um elemento referência, que é considerado como imóvel. O Al é o metal que melhor preenche esta condição de baixa mobilidade e ter distribuição aproximadamente homogênea na rocha sã sobre a qual o perfil se desenvolveu.

As tabelas 16, 17 e 18 mostram as perdas (valores negativos) ou os ganhos (valores positivos), relativos ao Al, dos elementos maiores nos três perfis estudados. As figuras 23 e 24 ilustram as perdas e ganhos dos principais elementos no perfil 1. Tratando-se de rochas ultramáficas, os três elementos importantes e de alto teor são Mg, Fe e Si. Verifica-se que há perdas de Mg importantes em todos os horizontes de alteração (Tab. 16, 17 e 18), alcançando a valores de perda total (- 100%), o que é função de sua alta solubilidade e facilidade de lixiviação frente aos agentes de intemperismo químico.

Tabela 17. Percentagens de perdas e ganhos dos elementos maiores no perfil 2, calculados em relação à rochas sã (NIQ 104) pelo método isoalumínio (Krauskopf, 1972).

	NIQ 101	NIQ 102	NIQ 103	NIQ 104
SiO <sub>2</sub>	-97	-98	-66	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	82	-24	-71	0
CaO	-100	-100	-69	0
MgO	-98	-100	-78	0
Na <sub>2</sub> O	-87	-94	2	0
K <sub>2</sub> O	-74	-88	-71	0
MnO	98	92	-54	0
TiO <sub>2</sub>	-44	-30	-37	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	181	-34	-71	0
BaO	-74	-76	-71	0
NiO	70	-26	6	0
CoO	126	273	-57	0
CuO	249	181	-44	0
ZnO	186	-21	-25	0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	37	-9	-46	0
LOI	-65	-83	-83	0

O Si é parcialmente solúvel no intemperismo químico e sua lixiviação

depende das condições climáticas e de drenagem. Em condições hídras de alto fornecimento de água (alta pluviosidade), com drenagem aberta e relevo que permite o escoamento, o Si pode ser lixiviado em proporções altas, ocasionando a formação de óxi-hidróxidos dos metais menos solúveis, como Al, Fe, Mn e outros. Onde as condições do meio não propiciam a lixiviação total de Si, formam-se diferentes argilominerais em função da velocidade de lixiviação. Quando a velocidade de lixiviação é alta, mas incompleta, permanecem no meio quantidades de Si suficientes para formar caulinita, que pode associar-se aos óxidos e hidróxidos de Fe e Al. Quando a velocidade de lixiviação é menor, permanece meio maior quantidade de Si suficiente para originar esmectitas. Se o meio é confinando, com lixiviação impedida, todo o Si liberado pela alteração dos silicatos é retido, são criadas condições para formar silicificações. Portanto, a mineralogia das fácies que se desenvolvem sobre um perfil de alteração é condicionada velocidade de lixiviação do Si, determinada pelas condições do meio.

Tabela 18. Percentagens de perdas e ganhos dos elementos maiores no perfil 3, calculados em relação à rocha sã (NIQ 222) pelo método isoalúminio (Krauskopf, 1972).

	NIQ 218	NIQ 219	NIQ 220	NIQ 222
SiO <sub>2</sub>	-92	-68	-92	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-66	-30	338	0
CaO	-100	-99	-100	0
MgO	-98	-87	-96	0
Na <sub>2</sub> O	-99	-98	-98	0
K <sub>2</sub> O	-36	-68	-57	0
MnO	1309	62	135	0
TiO <sub>2</sub>	-68	-25	-54	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-62	87	278	0
BaO	572	-36	-57	0
NiO	865	1662	557	0
CoO	11167	1020	837	0
CuO	640	444	307	0
ZnO	588	2876	2093	0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-81	-91	-45	0
LOI	42	99	182	0

Nos perfis estudados (Tab. 16, 17 e 18), verifica-se perdas muito significativas de SiO<sub>2</sub> praticamente em todos os horizontes de alteração, quando comparados com a rocha sã, exceto no topo do perfil 1 (amostras NIQ 002 e 001). No topo do perfil 1, pelo contrário, há um forte ganho de SiO<sub>2</sub> (Fig. 24). Esta observação está em

consonância com a mineralogia encontrada nesses perfis. O perfil 1 tem horizontes oxidados (óxi-hidróxidos+goethita+hematita) alternando com horizontes argilosos e culmina com um horizonte silicificado no topo (silcrete). Este fato indica que a evolução do perfil ocorreu com variações morfoclimáticas que permitiram longos períodos de lixiviação total do  $\text{SiO}_2$  (horizontes oxidados), outros períodos com lixiviação parcial (horizontes argilosos) e um período de dinâmica hídrica confinada sem lixiviação da sílica (Silcrete). Na formação do horizonte silicificado, além do impedimento da lixiviação da sílica, é possível que tenha ocorrido o aporte de sílica de fora do ambiente, o que tem relação com as condições do relevo.

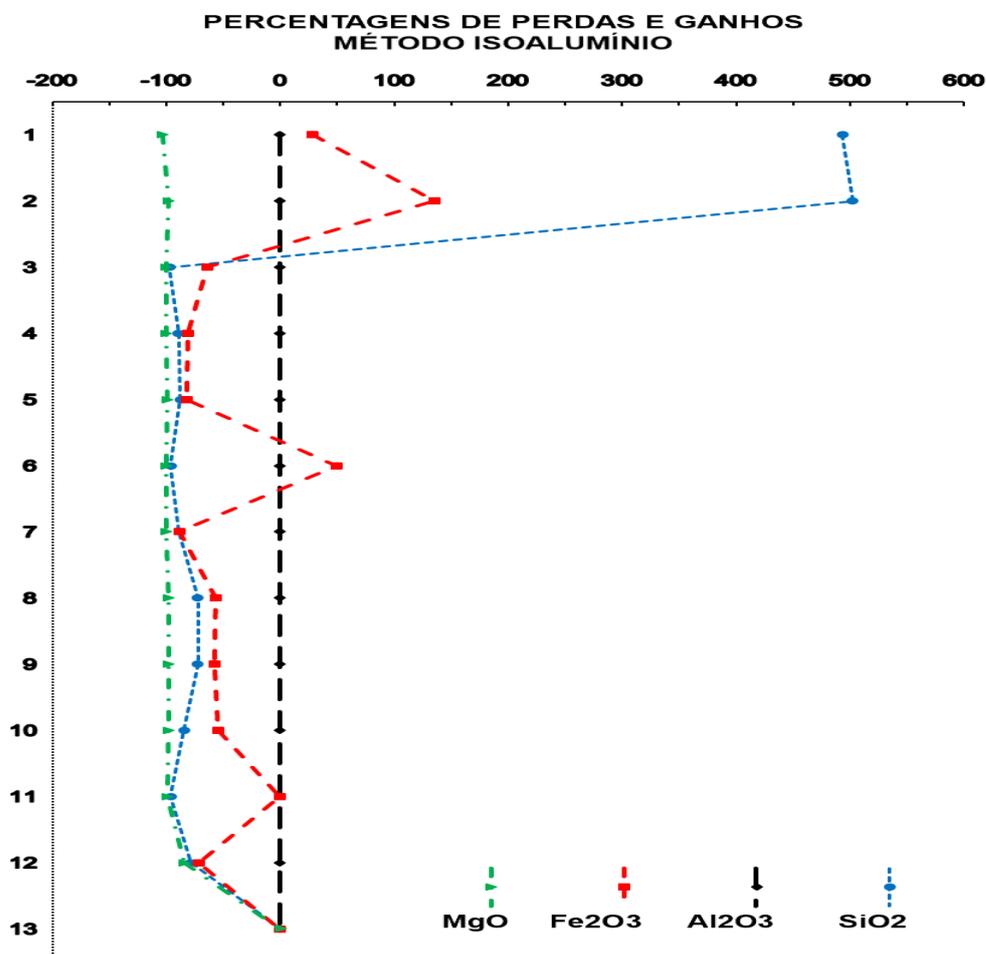


Figura 23. Gráfico que ilustra as percentagens de perdas e ganhos de Si, Fe e Mg no perfil 1, calculados em relação aos Al, pelo método isoaluminio (Krauskopf, 1972). Pontos 1 a 13 correspondem às amostras NIQ 01 a NIQ 013 (tabela 16).

Um terceiro elemento de teor importante nas rochas ultramáficas é o Fe. Dependendo das condições de clima e relevo, o Fe pode ser incorporado em argilominerais, como na nontronita, ou evoluir para hidróxidos e/ou óxidos, como

goethita e hematita. Pode evoluir para a formação de Lateritas, que são formações superficiais resultantes da alteração intempérica em condições tropicais (Pedro & Melfi, 1983). Lateritização é, portanto, um processo típico de alteração de minerais e rochas sob condições tropicais. O termo foi utilizado inicialmente para um processo que leva à formação de materiais ferruginosos. As condições de intemperismo tropical, quando atuam sobre rochas, geram um processo que pode ser chamado de ferralitização, envolvendo sistemas ferro-alumínicos. No caso de rochas ultramáficas, pela baixa proporção de Al, o processo é denominado de ferruginização. As principais características deste processo são: a alteração dos principais minerais levam à desalcalinização total; a liberação de Fe individualizado, forma óxi-hidróxidos, separadamente e independentemente dos argilominerais.

O  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  não existe no estado cristalino – as duas únicas formas cristalinas formadas em meio bem arejado são a Goethita ( $\alpha\text{FeO}\cdot\text{OH}$ ) e a Hematita ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Nas amostras naturais, freqüentemente ocorrem hidratos de Fe amorfos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), que recebem diversos nomes sem significação cristaloquímica, como Limonita, Stilpnosiderita.

A hidrólise dos minerais durante o intemperismo não é necessariamente acompanhada pela lixiviação de  $\text{OH}^-$  na mesma velocidade. Estudos realizados por Melfi & Pedro (1977 e 1978) e Melfi, *et. al.*, (1970) e Pedro e Melfi, (1983) indicaram que a gênese dos hidratos férricos resulta da complexação entre íons  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{OH}^-$ . Quando a concentração em  $\text{OH}^-$  nas soluções de hidrólise dos minerais é baixa, com razão molar  $\text{OH}^-/\text{Fe} < 2$ , há formação de polímeros pequenos (denominados de  $\text{H}^+$ -hidróxidos), que se associam para formar Goethita. Se a concentração de  $\text{OH}^-$  é alta, com razão molar  $\text{OH}^-/\text{Fe} > 2$ , formam-se grandes polímeros com estruturas tridimensionais denominados de Oxi-hidróxidos. Esses compostos são muito porosos e adsorvem íons do meio. Por isso, são relativamente estáveis e evoluem lentamente até cristalizar Hematita. A evolução é lenta e podem ser encontrados diversos compostos intermediários precursores da Hematita, como Protohematita ou hematita hidratada -  $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$  (com n desde bem pequeno, até  $n=1,5$ ) e Ferihidritas -  $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$  (com n variável,  $n>3$ ).

Os perfis referentes a este trabalho têm o Fe com perdas em alguns horizontes e ganhos em outros (Tab. 16, 17 e 18), quando comparados à rocha sã. Este fato tem a ver com as variações morfoclimáticas ao longo do tempo, durante o seu desenvolvimento. Períodos hídricos com maior presença de água no ambiente,

com escoamento parcial e sem lixiviação total da sílica, contribuíram para vincular parte do Fe às esmectitas (nontronitas), associadas a géis ferruginosos amorfos, processo denominado de *ferrissilicificação* por Trescases (1975). Períodos com mais facilidade de escoamento da água e maior lixiviação da sílica ocasionaram o desenvolvimento de Oxi-hidróxidos de Fe hidratados, goethita e hematita hidratada que, mesmo associadas a caulinita, caracterizam o processo ferralítico.

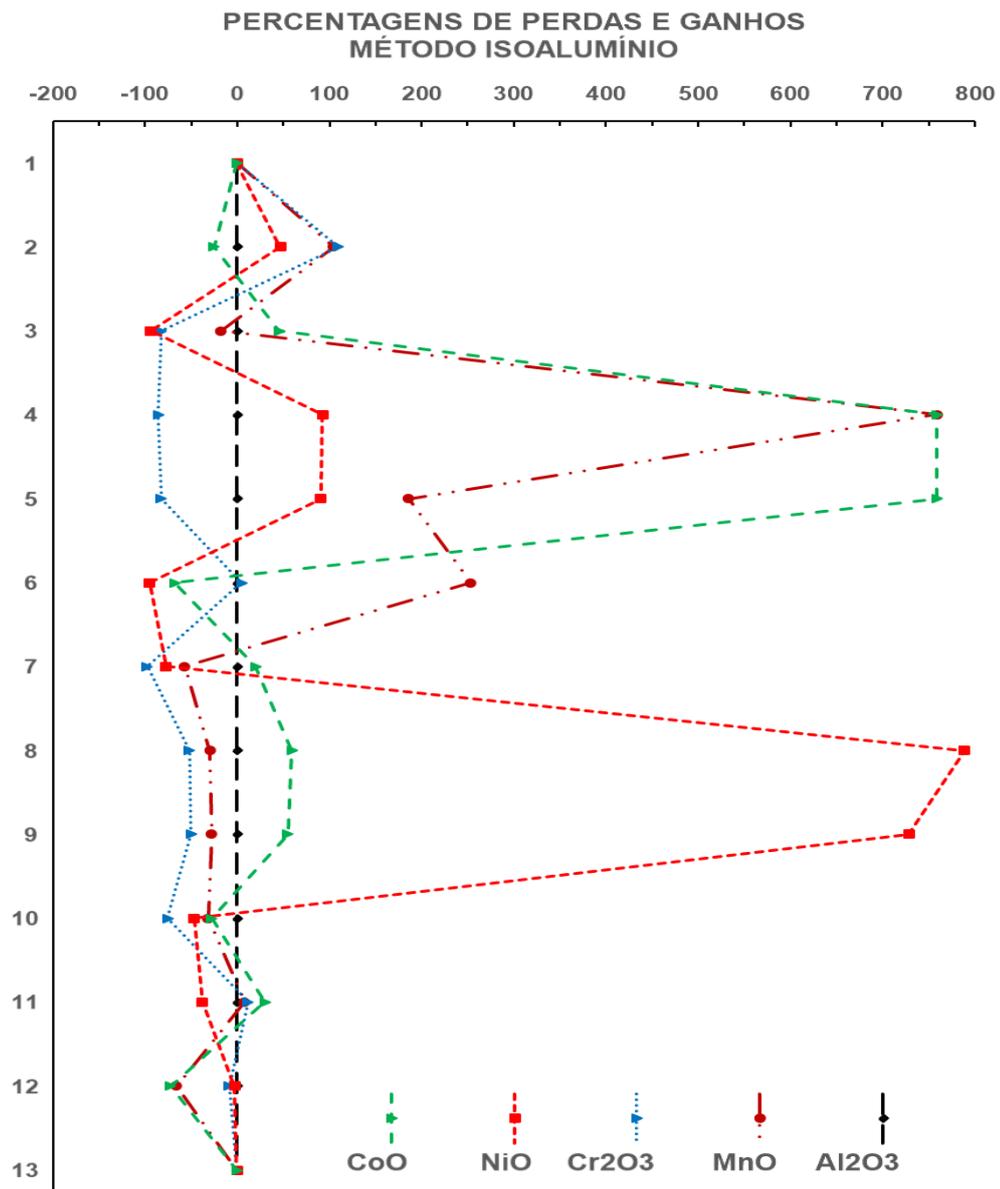


Figura 24. Gráfico que ilustra as percentagens de perdas e ganhos de Mn, Cr, Ni e Co no perfil 1, calculados em relação ao Al, pelo método isoalumínio (Krauskopf, 1972). Pontos 1 a 13 correspondem às amostras NIQ 01 a NIQ 013 (tabela 16)

A figura 23 mostra três picos positivos no balanço do Fe, dois correspondentes a dois horizontes oxidados e um terceiro referente ao silcrete do topo do perfil. A figura 24 mostra que o Mn acompanha, em grande parte, o comportamento do Fe. O balanço de massa do Ni, metal objeto de mineração com fins econômicos no local, mostra que este metal acompanha apenas em parte o Fe. Junto com o Co, o Ni tem ganhos nos horizontes oxidados como Fe e Mn, mas têm um ganho maior num horizonte de veios e bolsões argilo-ferruginosos (Fig. 5). Nesse horizontes há forte concentração de Mn, Ni e Co, dando origem aos asbolano.

A figura 25 mostra que o Co acompanha o comportamento do Ni, com mais intensidade ainda acompanha o Mn. O Ni, liberado dos minerais alterados, passa por diversas armadilhas (materiais amorfos sílico-ferruginosos, garnieritas, serpentina, esmectitas, asbolanos, goethita), nos diferentes níveis do perfil de alteração. Os horizontes de minério oxidado (laterita amarela e laterita vermelha) constituem a zona de maior estabilidade do Mn e do Co, que são menos móveis que o Ni e precipitam mais facilmente nos óxidos e hidróxidos junto com o Fe. Cálculos de balanço geoquímico indicam que o Ni tem enriquecimento absoluto nos níveis de alterita silicatada, que podem alcançar a 400% em depósitos como Santa Fé (Oliveira e Trescases, 1980), ou entre 700% e 800% em Barro Alto (Trescases & Oliveira, 1978). Esses valores, segundo esses autores, indicam que o enriquecimento do Ni, nos depósitos de Ni laterítico, não podem ser explicados unicamente pela alteração das rochas em um único episódio. Ocorreu suprimento de Ni proveniente de perfis de alteração pretéritos superpostos, que ocasionaram um enriquecimento prévio. Este aspecto indica que a evolução dos depósitos de Ni laterítico são, geralmente, polifásicos.

No caso dos depósitos brasileiros de Ni laterítico, sua história vem desde o Terciário inferior, quando ocorreu intensa silicificação, gerando os silcretes e intensa lateritização abaixo dos silcretes. Os silcretes hoje capeiam e protegem os perfis contra a erosão. Repetidos processos de levantamento e aprofundamento dos perfis ocorreram até o presente, enriquecendo os depósitos de Ni laterítico.

Alguns depósitos de Ni mundialmente conhecidos podem ser comparados aos dados dos perfis estudados: o depósito de Nickel Mountain em Riddle, Oregon, é uma laterita niquelífera do tipo silicato hidratado, como o são também os depósitos

em Nova Caledônia, Califórnia e Carolina do Norte. O depósito Cawse na Austrália, bem como muitos dos depósitos em Cuba, são depósitos de minério de Ni-Co também com estas características. O depósito Bulong na Austrália Ocidental contém minerais de óxido e argila. O depósito de Goro na Nova Caledônia tem teores econômicos de Ni em todas as zonas de seu perfil (Marsh & Anderson, 2011).

## 9. CONCLUSÕES

Os perfis estudados neste trabalho representam a alteração intempérica sobre a parte ultramáfica do CMUN. Eles apresentam características semelhantes entre si, ainda que tenham diferenças nas espessuras e na composição química e mineralógica. Desenvolveram horizontes argilosos e horizontes oxidados indicando variações e repetições climáticas durante a sua evolução:

- O perfil 1, desenvolvido sobre dunito serpentizado, é de maior espessura e com melhor definição de seus horizontes, com três eventos de ferralíticos intercalados com eventos argilosos (ferrossilicificação).
- O perfil 2, formado sobre peridotito, é o de menor espessura e com menor variação de seus horizontes, contém apenas os eventos ferralíticos.
- O perfil 3, proveniente da alteração de piroxenito é semelhante ao perfil 1, mas com menor espessura, tendo um evento argiloso, um ferralítico e um misto com argilas e materiais ferruginosos.

Nas partes argilosas, destaca-se a esmectita representada por nontronita com substituição de  $\text{Fe}^{3+}$  por  $\text{Ni}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em diferentes proporções. Em alguns pontos, a esmectita alcança teores de  $\text{Ni}^{2+}$  que pode ser classificada como pimelita. Nas partes ferralíticas destaca-se óxido-hidróxidos de ferro amorfos, goethita e eventualmente hematita hidratada, associadas a pequenas proporções de caulinita. Alguns veios e bolsões que aparecem associados às partes argilosas, contêm óxido-hidróxido de Mn-Ni-Co hidratados, com altas concentrações nesses metais, que foi caracterizado como asbolano.

A diferenciação dos horizontes caracteriza as variações climáticas ocorridas. Os horizontes argilosos indicam períodos em que a drenagem era incompleta, havendo lixiviação parcial da sílica, permanecendo quantidade suficiente de sílica

para formar argilominerais do tipo 2:1 (nontronita). Os horizontes oxidados (ferralíticos) indicam períodos com drenagem mais acentuada e lixiviação aberta e quase total da sílica. O capeamento silicificado indica período de drenagem confinada mantendo a sílica no sistema, com possibilidade de aporte externo.

O níquel, que é objeto de mineração, liberado dos minerais alterados, passa por armadilhas (materiais amorfos sílico-ferruginosos, garnieritas, serpentina, esmectitas, asbolanos, goethita), nos diferentes níveis do perfil de alteração. Junto com o Co, o Ni tem ganhos nos horizontes oxidados como Fe e Mn, mas têm um ganho maior num horizonte de veios e bolsões argilo-ferruginosos. Nesses horizontes há forte concentração de Mn, Ni e Co, dando origem ao asbolano. O enriquecimento do Ni, não pode ser explicado unicamente pela alteração das rochas em um único episódio. Ocorreu suprimento de Ni proveniente de perfis de alteração pretéritos superpostos, que ocasionaram um enriquecimento prévio. Este aspecto indica que a evolução dos depósitos de Ni laterítico é polifásica.

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA, I.O. – 2012 – Modelo de depósito do Complexo Máfico Ultramáfico de Niquelândia, GO, com base em dados multitemáticos – Tese para a obtenção do título de Doutor em Geoquímica, UNB
- BERGER, V.I., Singer, D.A., Bliss, J.D., and Moring, B.C., 2011, Ni-Co laterite deposits of the world— Database and grade and tonnage models: U.S. Geological Survey Open File Report 2011–1058, 26p.
- BRAND, N.W., Butt C.R., Elias M. 1998. Nickel laterites: classification and features. *Journal of Australian Geology & Geophysics* , 17(4):81-88.
- Braun, O.P.G. Contribuição à geomorfologia do Brasil central. *Revista Brasileira de Geografia*, 3:3-39.
- BUCHANAN, F., 1807, A journey from Madras through the countries of Mysore, Kanaram and Malabar, volume 2: East India Company, London, 590p.
- BUTT, C.R.M., 2004, Geochemical dispersion, process and exploration models, chap. 6 of Butt, C.R.M. Cornelius, M., Scott, K.M., and Robertson, I.D.M., *Regolith expression of Australian ore systems— A compilation of geochemical case histories and conceptual models: Canberra, Australia, CRC Landscape Environment and Mineral Exploration Monograph*, p. 81–106.
- BUTT, C.R.M., and Elias, Mick, 1998, Nickel laterites—Classification and features: *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17: 81–88.
- CHACE, F.M., Cumberlidge, J.T., Cameron, W.L., and Van Nort, S.D., 1969, Applied geology at the Nickel Mountain Mine, Riddle, Oregon: *Economic Geology*, 64:1–16.
- COLIN, F. – 1985 – Etude pétrologique des altérations de pyroxénite du gisement nickelifere de Niquelândia (Brésil). TDM ORSTOM F17, ISBN 2-7099-0769-0
- COLIN, F., Trescases, J.J., Nahon, D. E Melfi, A.J – 1989 – Lateritic weathering of pyroxenites from Niquelândia, Goiás, Brazil: The supergene behavior of nickel
- CORNELIUS, M., Smith, R.E., and Cox, A.J., 2001, Laterite geochemistry for regional exploration surveys—A review, and sampling strategies: *Geochemistry—Exploration, Environment, Analysis*, v. 1, no. 3, p. 211–220.
- CORREIA, C.T., 1994. Petrologia do Complexo Máfico-Ultramáfico de Cana Brava. Goiás.Unpublished Ph.D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 151 pp.
- CORREIA, C.T., Girardi, V.A.V., Lambert, D.D., Kinny, P.D., Reeves, S.J., 1996. 2Ga U–Pb(SHRIMP II) and Re–Os ages for the Niquelândia basic–ultrabasic layered intrusion, central Goiás, Brazil. In: 39th Cong. Bras. Geologia, Anais, vol. 6, Salvador, SBG, pp. 187–189.

CORREIA, C.T., Sinigoi, S., Girardi, V.A.V., Mazzucchelli, M., Tassinari, C.C.G., Giovanardi, T. – 2012 - The growth of large mafic intrusions: Comparing Niquelândia and Ivrea igneous complexes. *Lithos* 155 pp. 167-182

CRUZ, F.F. da, Brenner, T.L. – 1986 – Jazida de Ni-Cu-C de Fortaleza de Minas, MG. In "Principais Depósitos Mineraiis do Brasil", D.N.P.M – C.R.D., v. II, p.275-306

CUMBERLIDGE, J.T., and Chace, F.M., 1968, Geology of the Nickel Mountain Mine, Riddle, Oregon, in Ridge, J.D., ed., *Ore deposits of the United States, 1933–1967 (Graton-Sales Volume)*: New York, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, v. 2, p. 1650–1672.

DALVI, A.D., Bacon, W.G., and Osborne, R.C., 2004, The past and the future of nickel laterites, in PDAC 2004 International Conference Trade Show and Investors Exchange, Toronto, Canada, March 7–10, 2004, *Proceedings: Toronto, Canada, Prospectors and Developers Association of Canada*, 27 p.

DE VLETTER, D.R., 1955, How Cuban nickel ore was formed—A lesson in laterite genesis: *Engineering and Mining Journal*, v. 156, p 84–87.

DE VLETTER, D.R., 1978, Criteria and problems in estimating the global laterite nickel resources: *Mathematical Geology*, v. 10, p. 533–542. Direct Nickel, 2010, The DNi process: Sydney, Australia, Direct Nickel, accessed August 25, 2011, at <http://www.directnickel.com/process/index.htm>.

DEER, W.A., Howie, R.A. & Zussman, J. *An Introduction to the rock-forming minerals*. Longmans, Green and Co. Ltd. London, 1967. 528 p.

EALLES, H.V., Cawthorn, R.G., 1996. The Bushveld Complex. In: Cawthorn, R.G. (Ed.), *Layered Intrusions*. Elsevier, Amsterdam, pp. 181–229.

ECKSTRAND, O.R., Yakubchuck, A., Good, D.J., and Gall, Q., comps., 2008, Ni-PGE-Cr deposits, in *World Minerals Geoscience Database Projects: Geological Survey of Canada Beta Release 3.5*, accessed August 25, 2011, at [http://apps1.gdr.nrcan.gc.ca/gsc\\_minerals/gquerycache/nipgecr/DP/dp249.html](http://apps1.gdr.nrcan.gc.ca/gsc_minerals/gquerycache/nipgecr/DP/dp249.html).

*ELIAS, M. (2002): Nickel laterite deposits – Geological overview, resources and exploration. En cooke, D., Pontgratz, J., eds. Giant ore deposits. Characteristics, genesis and exploration: CODES Special Publication 4, Hobart, University of Tasmania, 205-220.*

ELIAS, M., 2006, Laterite nickel mineralization of the Yilgarn craton: *Society of Economic Geologist Special Publication 13*, p.195–210.

ELIAS, M., DONALDSON, M.J. and GIORGETTA, N., 1981. Geology, mineralogy, and chemistry of lateritic nickel-cobalt deposits near Kalgoorlie, Western Australia. *Economic Geology*, 76: pp. 1775-1783.

FERREIRA FILHO, C.F., Silva, C.B., Lopes, R.O., 1996. Variação críptica de olivina

em dunitos da Unidade Ultramáfica do Complexo de Niquelândia, GO. In: Proceedings of the 39th Cong. Bras. Geologia, Anais, vol. 6, Salvador, SBG, pp. 179–182.

FREYSSINET, P., Butt, C.R.M., Morris, R.C., and Piantone, P., 2005, Ore-forming processes related to lateritic weathering: Economic Geology 100th Anniversary Volume, p. 681–722

GAUDIN, A., Decarreau, A., Noack, Y., and Grauby, O., 2005, Clay mineralogy of the nickel laterite ore developed from serpentinised peridotites at Murrin Murrin, Western Australia: Australian Journal of Earth Sciences, v.52, p. 231–241.

GERTH, J., 1990. Unit-cell dimensions of pure and trace metal-associated goethite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: pp. 363-371.

GIRARDI, V. A. V., Rivalenti, G., and Sinigoi, S., 1986, The petrogenesis of the Niquelandia layered basic-ultrabasic complex, central Goias, Brazil: *Jour. Petrology*, v. 27, p. 715-744..

GLEESON S.A., Butt C.R.M., Elias M. (2003): Nickel laterites: A review. *SEG Newsletter*, 54, 11-18.

GOLIGHTLY J.P. 1981. Nickeliferous laterite deposits. *Economic Geology*, 75th anniversary volume, 710-735.

GOLIGHTLY, J.P., 2010, Progress in understanding the evolution of nickel laterites, in Goldfarb, R.J., Marsh, E. E., and Monecke, T., eds., *The challenge of finding new mineral resources—Global metallogeny, innovative exploration, and new discoveries: Society of Economic Geologists Special Publication 15*, p. 451–485.

HAY, W.W., and Wood, C.N., 1990, Relation of selected mineral deposits to the mass/age distribution of Phanerozoic sediments: *Geologische Rundschau*, v. 79, p. 495–512.

HELGREN, D.M. and Butzer, K.W., 1977, Paleosols of the southern Cape Coast, South Africa— Implications for laterite definition, genesis, and age: *Geographical Review*, v. 67, p. 430–445

KRAUSKOPF, K. B. *Introdução à geoquímica*. Trad. M. Lando e P.S. Borges. Editora Universidade de São Paulo, 2 vol. 605p. 1972.

LELONG, F., Tardy, Y., Grandin G., Trescases J.J., and Boulange, B., 1976, Pedogenesis, chemical weathering and processes of formation of some supergene ore deposits, in Wolf K.H., ed., *Handbook of stratabound and stratiform ore deposits—I—Principles and general studies—Vol. 3—Supergene and surficial ore deposits; texture and fabrics*: Amsterdam, Elsevier, p. 93–133.

- LINCHENAT, A. and Shirokova, I., 1964, Individual characteristics of nickeliferous iron (laterite) deposits of the northeast part of Cuba (Pinares de Mayari, Nicaro and Moa), in International Geological Congress, 24th, Montreal, 1972, Proceedings: International Geological Congress, p. 172–187.
- MANO, E.S. ; André S. Mexias, A.S.; CHAVES, A. P. & Loureiro, P de O. Caracterização dos argilominerais portadores de níquel do depósito laterítico de Niquelândia – GO. IN: **XIII Congresso Brasileiro e Geoquímica**, Anais, p. 1399-1402. 2011.
- MARSH, E.E., Anderson E.D. 2011. *Ni-Co laterite deposits*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1259. 9 p.
- MARSH, E. E. and Anderson, E. Ni-Co Laterites—A Deposit Model. Report 2011–1259. U.S. Department of the Interior U.S. *Geological Survey*. Reston, Virginia: 2011.
- MELFI, A.J., Trescases J.J., Oliveira S.M.B. 1980. Les "laterites" nickelíferes du Brésil. *Cahier de Orstom* , Série Géologie, 11:15-42.
- MELFI, A.J. & Pedro, G. & Volkoff, B. 1970. Camissão V - Gênese, morfologia e classificação dos solo. Natureza e distribuição dos compostos ferríferos nos solos do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do solo* **3**:47-54.
- MELFI, A.J. & Pedro, G. 1977. Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil. Parte 1 – caracterização e repartição dos principais tipos de evolução pedogeoquímica. *Revista Brasileira de Geociências*, **7**:271-286.
- MELFI, A.J. & Pedro, G. 1978. Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil. Parte 2 – considerações sobre os mecanismos geoquímicos envolvidos na alteração superficial e sua repartição no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **8**:11-12.
- MONTI, R., and Fazakerley, V.W., 1996, The Murrin Murrin nickel cobalt project, in Grimsey, E.J., and Neuss, I., eds., Nickel '96 mineral to market: Australian Institute of Mining and Metallurgy Special Publication 6/96, p. 191–195. Norton, A.S., 1973, Laterite and bauxite formation: *Economic Geology*, v. 68, p. 353–361.
- NAHON, D. & Tardy, Y. (1992): *The ferruginous laterites*. In: Butt, C.R.M. Zeegers, H. Eds., *Regolith exploration geochemistry in tropical and sub-tropical terrains. Handbook of Exploration Geochemistry No. 4*, 41–55.
- OGURA, Y., 1986, Mineralogical studies on the profiles of nickeliferous laterite deposits in the Southwestern Pacific Area: Geological Survey of India Memoir 120, p. VI-1–VI-12
- OHMOTO, H., Watanabe, Y., Allwood, A., Burch, I.W., Knauth, L.P., Yamaguchi, K.E., Johnson, I., and Altinok, E., 2007, Formation of probable lateritic soils approximately 3.43 Ga in the Pilbara Craton, Western Australia: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 71, no. 15S, p. A733.

OLIVEIRA, S. M. B. e Trescases, J. J. – 1980 – Geoquímica da alteração supérgena das rochas ultramáficas de Santa Fé (Goiás, Brasil). *Rev. Bras. Geoc.*, **10**(4):243-257.

OLIVEIRA, S.M.B. Os depósitos de Níquel laterítico do Brasil. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências, USP. 89 p. 1990.

PEDRO, G. & Melfi, A. J., 1983. The superficial alteration in tropical region and the lateritisation phenomena. In: A.J. Melfi and A. Carvalho (Editors), *Lateritisation processes*, p. 3-13.

PEDRO, G. & Volkoff, B. Grandes provinces pédologiques du Brésil. Cah. ORSTOM, sér. Géol. XIV (2): 171-172. 1984.

PEDROSO, A. C., and Schmaltz, W. H., 1981, Jazimentos de níquel laterítico de Niquelandia, Goiás: Simposio Geologie Centro Oeste Brasileiro, v. 1, p. 185-207.

PROENZA, J.A., Tauler, E., Melgarejo, J.C., Gali, S., Labrador, M., Marrero, N., Perez-Nelo, N., RojasPuron, A.L., and Blanco-Moreno, J.A., 2007, Mineralogy of oxide and hydrous silicate Ni-laterite profiles in Moa Bay area, northeast Cuba, in Andrew, C.J., and others, eds., *Mineral exploration and research—Digging deeper*, 2: Irish Association of Economic Geology, p. 1389–1392.

RETALLACK, G.J., 2010, Lateritization and bauxitization events: *Economic Geology*, **105**:655–667.

RODGER, K. A. - The decomposition and analysis of chrome spinel. A survey of some published techniques. *Mineralogical Magazine*, 1972, VOL. 38, PP. 882-9

ROQUÉ-ROSELL, J., Mosselmans, J.F.W., Proenza, J.A., Labrador, M., Galí, S., Atkinson, K.D., Quinn, P.D., 2010, Sorption of Ni by “lithiophorite–asbolane” intermediates in Moa Bay lateritic deposits, eastern Cuba: *Chemical Geology*, v. 275, p. 9–18. Rye, R., and Holland, H.D., 1998, Paleosols and the evolution of atmospheric oxygen—A critical review: *American Journal of Science*, v. 298, p. 621–672.

SAMAMA, J., 1986. Ore fields and continental weathering: New York, Van Nostrand Reinhold Co., 326p.

SCHELLMANN, W., 1986, A new definition of laterite: Geological Survey of India Memoir 120, p. 1–7.

SHELDON, N.D., 2006, Precambrian paleosols and atmospheric CO<sub>2</sub> levels: *Precambrian Research*, v. 147, p. 148–155.

TRESCASES, J.J. L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques em zone tropicale. Formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calèdonie. *Mémoires ORSTOM*. 78, 1975, 260 p.

TRESCASES, J.J., Oliveira, S. M. B. – 1978 – Alteração de serpentinitos de Morro do Níquel (MG). Anais XXX Congre. Bras. Geol., Recife, 4:1655-1669.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2011, Riddle: Mg hydrous silicate Ni-Co laterite deposit in Oregon, United States of America: U.S. Geological Survey, accessed online August 25, 2017, at [http://tin.er.usgs.gov/laterite/show-laterite.php?rec\\_id=119](http://tin.er.usgs.gov/laterite/show-laterite.php?rec_id=119).

Wells, M.A., and Butt, C.R.M, 2006, Geology, geochemistry and mineralogy of the Murrin Murrin nickel laterite deposit: CRC Landscape Environment and Mineral Exploration Open File Report 207, 200 p.

WILKINSON, B.H., McElroy, B.J., Kesler, S.E., Peters, S.E., and Rothman, E.D., 2009, Global geologic maps are tectonic speedometers—Rates of rock cycling from area-age frequencies: *Geological Society of America Bulletin*, v. 121, p. 760–779.