UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

OS DEPÓSITOS DE NÍQUEL LATERÍTICO DO BRASIL

Sonia Maria Barros de Oliveira

Concurso para obtenção do Título de
Livre - Docente junto ao Departamento
de Geologia Geral, na Área de
Conhecimento de Geoquímica.

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005363

SÃO PAULO
1990

ÍNDICE

I. Introdução	p.1
1. O níquel no mundo e no Brasil: aspectos econômicos	p.1
Situação do níquel no mundo	p.1
O níquel no Brasil: histórico e situação atual	p.2
2. Evolução dos conhecimentos relativos às lateritas niquelíferas no mundo e no Brasil	p.5
II. Contexto geológico e morfoclimático dos depósitos de níquel laterítico do Brasil	p.11
1. Complexos máfico-ultramáficos do Brasil	p.12
Maciços máfico-ultramáficos de grandes dimensões, associados a terrenos granito-gnaissicos	p.13
Maciços ultramáficos de pequeno porte e fortemente serpentinizados	p.14
Maciços ultramáfico-alcalinos	p.14
2. Condições climáticas	p.15
Clima equatorial quente e úmido (Região Norte)	p.15
Clima tropical de estações contrastadas (Região Central)	p.15
Clima tropical sub-quente e sub-úmido (Região Sudeste)	p.17
Clima tropical semi-árido (Região Nordeste)	p.17
Clima sub-tropical a temperado (Região Sul)	p.17
3. Características gerais do relevo brasileiro	p.18
III. Descrição dos depósitos	p.20
1. Depósitos da Região Central	p.20
Niquelândia	p.22
Barro Alto	p.29

Santa Fé	p.30
Morro do Engenho	p.31
2. Depósitos da Região Norte	p.32
Vermelho	p.34
Quatipuru	p.37
Puma e Onça	p.37
Jacaré	p.38
3. Depósitos da Região Sudeste	p.39
Jacupiranga	p.40
Morro do Níquel	p.42
Liberdade	p.42
Ipanema	p.44
4. Depósitos da Região Nordeste	p.45
São João do Piauí	p.48
IV. Gênese do perfil laterítico	p.53
1. Evolução mineralógica	p.53
2. Evolução geoquímica	p.57
3. Evolução geral dos depósitos de níquel laterítico, a partir do Terciário	p.60
V. Considerações finais	p.62
1. Papel do fator litológico	p.62
2. Papel do fator climático	p.64
3. Papel do fator topográfico	p.65
4. Resumo das principais características das lateritas níquelíferas brasileiras	p.66
VI. Referências bibliográficas	p.68

I

INTRODUÇÃO

1. O níquel no mundo e no Brasil: aspectos econômicos

Situação do níquel no mundo

O níquel é considerado um metal estratégico devido à sua grande importância como matéria-prima na indústria do aço, e devido também à distribuição de suas reservas no mundo, concentradas em alguns poucos países. Há apenas restritas possibilidades para a substituição do níquel, que é usado principalmente na produção de aços inoxidáveis e de ligas metálicas.

Dois tipos de depósito são responsáveis pela produção do níquel: os sulfetos magmáticos e as lateritas. Os primeiros formam-se por segregação de líquidos sulfetados imiscíveis na base da câmara magmática, a partir do resfriamento de magmas de natureza máfica a ultramáfica, e são principalmente de idade proterozóica. Um exemplo de depósito sulfetado é o de Sudbury, no Canadá, um dos maiores produtores de níquel do mundo. Os depósitos de níquel laterítico formam-se pelo intenso intemperismo de rochas ultramáficas, e são, em sua maior parte, de

Idade cenozóica. Ocorrem, principalmente, em área de clima tropical, como na Nova Caledônia, nas Filipinas e no Brasil. Outros tipos de depósito de níquel são os velos hidrotermais contendo sulfetos e os nódulos do fundo dos oceanos que, atualmente, não apresentam interesse econômico.

As reservas mundiais são da ordem de 97.10^6 toneladas de níquel contido. Em torno da metade está localizada na Nova Caledônia, e o restante encontra-se principalmente na Indonésia, Canadá, URSS, Cuba e Austrália. Cerca de 72% do total é do tipo laterítico (Vletter, 1978; DeYoung Jr. et al., 1985).

A produção do níquel foi de 630.10^3 toneladas de níquel contido, em 1982, das quais 65% provieram de minério sulfetado. Mais de 80% da produção derivou apenas de oito países: URSS, Canadá, Austrália, Nova Caledônia, Indonésia, Cuba, África do Sul e Filipinas (DeYoung Jr. et al., 1985).

A preferência pela exploração das reservas sulfetadas é explicada pelo fato de que esse tipo de minério pode ser facilmente concentrado através de técnicas bem estabelecidas, enquanto que o minério laterítico necessita de processos mais complicados, de alto consumo de energia, para seu tratamento. Além disso, os teores de níquel no minério sulfetado são mais altos, e os sub-produtos como cobre, cobalto e platinóides aumentam consideravelmente o valor desse tipo de minério. No entanto, como, de longe, a maior parte das reservas é do tipo laterítico, este será provavelmente o minério mais explorado no futuro.

O níquel no Brasil : histórico e situação atual

No Brasil, a primeira menção à ocorrência de minério de níquel data de 1889, e é referente ao distrito de Jacupiranga, no Estado de São Paulo (Felicíssimo, 1969). A partir de então, outras ocorrências foram mencionadas :

Niquelândia (1906) em Goiás, Liberdade (1916) e Morro do Níquel (1922) em Minas Gerais, e Barro Alto (1934) em Goiás. Na segunda metade do século XX, muitos depósitos foram descobertos, através da prospecção sistemática.

Hoje conhecem-se no Brasil importantes reservas de níquel, perfazendo $349,2 \cdot 10^6$ toneladas de minério, com teores variando de 1,2 a 2,2% Ni (Schobbenhaus et al., 1984). Toda essa reserva provém de depósitos lateríticos, espalhados por todas as regiões do país, sendo apenas mais raros no Nordeste e no Sul. A figura 1 mostra os principais depósitos de níquel laterítico do Brasil, dando uma indicação sobre a dimensão de suas reservas.

Apenas dois depósitos de níquel sulfetado são conhecidos no Brasil : Americano do Brasil, em Goiás, com $5,0 \cdot 10^6$ toneladas e teores de 0,62% Ni, 0,65% Cu e 0,04% Co (Nilson et al., 1986), e Fortaleza de Minas, em Minas Gerais, com $5,1 \cdot 10^6$ toneladas de minério, com 2,55% Ni, 0,45% Cu e 0,07% Co (Cruz et al., 1986).

O níquel foi explorado em pequena escala em Jacupiranga, durante a Segunda Guerra e em Liberdade, de 1927 a 1975. Atualmente, existem no Brasil três distritos produtores de níquel, cujo produto final é tanto o níquel eletrolítico, como a liga ferro-níquel; a matéria-prima é nos dois casos o minério laterítico. A Companhia Níquel Tocantins S/A, que explora o depósito de Niquelândia-Sul, é a única produtora de níquel eletrolítico no Brasil. A liga ferro-níquel é produzida pela CODEMIN e pela Companhia Morro do Níquel, a partir do minério das minas de Niquelândia-Norte e de Morro do Níquel, respectivamente. Em 1987 a produção total no Brasil foi de 1.308.655 toneladas de minério, com 22.092 toneladas de níquel contido (Anuário Mineral Brasileiro, 1988).

O Brasil exporta a liga ferro-níquel, mas importa produtos manufaturados de níquel. A importação decresceu significativamente nos últimos anos, desde que a usina de Niquelândia-Sul começou a produzir níquel eletrolítico (1980).

Figura 1. Depósitos de níquel laterítico do Brasil

2. Evolução dos conhecimentos relativos às lateritas níquelíferas no mundo e no Brasil

Até meados do século XIX, eram conhecidos apenas minérios de níquel de origem endógena, de tipo sulfetado. Em 1863 Garnier descobriu, na Nova Caledônia, um mineral de níquel de tipo diferente: era um silicato hidratado de magnésio e níquel que, em 1874, foi denominado de "garnierita". Os primeiros trabalhos publicados sobre esse tipo de minério atribuíram-lhe origem magmática, devido ao aspecto filoneano dos veios garnieríticos. Apenas em 1903, sua origem, a partir do intemperismo de certos tipos de rocha, foi reconhecida e, a partir daí, aceita sem mais polêmica (Avias, 1978). Os depósitos da Nova Caledônia foram, assim, o primeiro exemplo de minério laterítico de níquel do tipo silicatado descrito no mundo. Só em meados do século XX, análises mais detalhadas dos perfis lateríticos, reconhecendo a existência de mais um tipo de minério, o oxidado, foram publicadas, com relação aos perfis da Nova Caledônia (Lacroix, 1942; Chetelât, 1947), do Brasil (Pecora, 1944) e de Cuba (Vletter, 1955).

O aumento da demanda de níquel no mundo de pós-guerra explica o crescente interesse pelo estudo dos perfis lateríticos níquelíferos. Em nível regional, vários depósitos foram descritos : Venezuela (Jurkovic, 1963), Guiné (Bonifas, 1959 ; Percival, 1965), Filipinas (Santos-Ynigo, 1964), Indonésia (Schellmann, 1964) Austrália (Zeissink, 1969), Brasil (Costa, 1970) etc. Esses trabalhos caracterizaram os diferentes horizontes encontrados numa grande variedade de perfis.

Estudos mineralógicos de detalhe, com o objetivo de caracterizar as fases portadoras de níquel, foram empreendidos a partir dos anos sessenta. Com relação às garnieritas, os trabalhos de Maksimovic (1966, 1975), Brindley e Hang (1973), Hang e Brindley (1973), Uyeda et al. (1973), Springer (1974), Brindley e Maksimovic (1974) e Brindley (1978), por exemplo, indicaram que se trata de

uma mistura de silicatos magnesianos e níquelíferos hidratados, com distâncias interplanares de $7\text{\AA}$ (minerais 1:1) e $10\text{\AA}$ (minerais 2:1), sendo as séries mais comuns a da lizardita-nepoufita e a da kerolita-pimelita. Outros filossilicatos portadores de níquel foram descritos nos perfis lateríticos, como as cloritas, vermiculitas e esmectitas (Maksimovic, 1972; Wiewiora e Szpila, 1975). E o níquel também se mostrou presente como compostos amorfos, acumulados em microfissuras ou na superfície das serpentinas (Goni e Guillemin, 1964; Ammou Chokroum, 1972), ou ainda substituindo o magnésio no retículo cristalino desses minerais (Coy-Yll e Guilloux, 1972). No minério oxidado, o níquel evidenciou-se associado à goethita (Combes, 1963) e aos hidróxidos de manganês e cobalto (Ammou Chokroum, 1969).

Investigações experimentais, simulando o intemperismo das rochas ultramáficas no laboratório, foram realizadas por Pedro e Bittar (1966), Pedro e Delmas (1971), Delmas (1972), Bibent (1972), Bibent e Bourgeois (1973) e Perruchot (1976a). Esses estudos puseram em evidência a alteração da olivina por dissolução incongruente, com resíduo amorfo enriquecido em níquel, precedendo à da serpentina, esta por dissolução praticamente congruente. De modo geral, ficou demonstrada a lixiviação do Si e Mg e a acumulação residual do Fe. Nesses aspectos, a alteração *in vitro* reproduziu muito bem o que acontece na natureza. No entanto, no laboratório, em condições hidrolíticas, ocorre lixiviação preferencial do Si em relação ao Mg, o que é o oposto do que se dá na natureza. Isto é devido provavelmente à intensificação da drenagem, necessária no laboratório, para aumentar a velocidade das reações.

No sentido de interpretar os mecanismos formadores das acumulações de níquel laterítico ao nível de um depósito como um todo, foi fundamental a contribuição de Trescases (1975). Seu trabalho na Nova Caledônia, apresentando um balanço quantitativo do níquel nos vários setores da paisagem, esclareceu importantes aspectos concernentes ao ciclo desse elemento no ambiente

supérgeno.

Três artigos de síntese sobre a gênese dos depósitos de níquel laterítico devem ser mencionados : Lelong et al. (1976) , Golightly (1981) e Schellmann (1983). O primeiro trata dos mecanismos de acumulação do níquel nos perfis lateríticos e dos fatores que controlam essa acumulação. Golightly (1981), além de relacionar a variação na estruturação dos perfis lateríticos com as condições climáticas e a composição da rocha parental, elabora um ensaio explicativo das paragêneses observadas, em termos das reações de equilíbrio dissolução-precipitação da cada fase presente. Finalmente, no terceiro artigo, são detalhados os processos de formação do minério silicatado e oxidado.

Dos últimos anos da década de setenta em diante, os trabalhos publicados na literatura sobre o níquel laterítico estão ligados principalmente a dois temas (Trescases, 1986). O primeiro é o estudo de novos depósitos, ou o reestudo de depósitos já conhecidos: Nova Caledônia (Trolly et al., 1979), Filipinas (Ogura, 1977; Mercado, 1981), Índia (Sahoo et al., 1981), Costa do Marfim (Nahon et al., 1982), Senegal (Blot et al., 1976), Burma (Schellmann, 1989a), entre outros tantos, inclusive os depósitos brasileiros, que serão tratados mais adiante. Nesses trabalhos, além de uma caracterização do perfil de alteração que permite evidenciar as filiações mineralógicas, alguns autores tentaram esclarecer os mecanismos de concentração do níquel na escala da paisagem. Assim, hoje se tem um quadro bastante satisfatório do papel dos fatores tectônicos, litológicos e morfoclimáticos no controle da gênese dos depósitos de níquel laterítico.

O segundo tema extensivamente tratado na literatura diz respeito a estudos de mais detalhe que se referem a aspectos cristalquímicos das fases portadoras de níquel. O minério silicatado foi, neste aspecto, muito mais bem estudado que o minério oxidado. Dentre os trabalhos mais importantes referentes à cristalquímica do níquel nos minerais do minério silicatado estão os de Bish e Brindley

(1978), Poncelet et al. (1979), Brindley et al. (1979), Cervelle et Maquet (1982), Gérard e Herbillon (1983), Pelletier (1983), Manceau e Calas (1983) e Manceau (1984). Mais recentemente, modelos experimentais do que acontece na natureza em relação às fases silicatadas encontradas em perfis de alteração de rochas ultramáficas têm sido propostos. Por exemplo, Stroessel (1988) investigou aspectos termodinâmicos e cinéticos relativos à dissolução da kerolita em relação à sepiolita, e Velde (1988) tratou de reproduzir no laboratório a formação de Ni-talco e Ni-serpentina em pseudomorfoses sobre diopsídio.

Com relação ao minério limonítico, podem ser mencionados os trabalhos de Schellmann (1978), Kuhnel et al. (1978), Maquet et al. (1981) e Schwertmann e Lathan (1986). Nesses trabalhos há indicações de uma estreita associação entre óxidos de ferro e níquel, e são até apresentadas provas definitivas de substituição diadóquica entre esses dois elementos (Gerth, 1990), a exemplo do que acontece com o Mn (Stiers e Schwertmann, 1985) e Co (Schwertmann et al., 1989) nas goethitas sintéticas. Os asbolanos e outros óxidos de Mn portadores de Ni e Co vêm tendo seus aspectos cristaloquímicos elucidados, por exemplo, por Chukhrov et al. (1983) e Manceau et al. (1987). A adsorção do níquel por produtos amorfo foi investigada experimentalmente por Perruchot (1976b) e Couty e Perruchot (1980).

Esses estudos prosseguem e, fazendo uso de equipamento bastante sofisticado (espectroscopia de absorção no visível, infravermelho e raios X, difração de raios X em micro-amostras, microscopia eletrônica de alta resolução e microsonda eletrônica, por exemplo), vêm abordando o problema da localização do níquel a escalas cada vez menores. Além de importante contribuição teórica, investigações dessa natureza trazem valiosa informação para orientar o desenvolvimento de processos no tratamento do minério.

No Brasil, embora depósitos de níquel laterítico fossem conhecidos desde o século passado, até meados da década de setenta só se

encontravam na literatura estudos de caráter muito geral, abordando principalmente aspectos econômicos (Ferran, 1974; Lages et al., 1976; Berbert, 1977, por exemplo). A caracterização mineralógica e geoquímica dos perfis mineralizados começou a partir dessa época, e foi realizada, em sua maior parte, por um grupo de pesquisadores em geoquímica da alteração intempérica, pertencentes ao Departamento de Geologia Geral do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Os principais trabalhos produzidos por esse grupo e alguns colaboradores referem-se aos depósitos de Morro do Níquel (Trescases e Oliveira, 1978), Santa Fé (Oliveira e Trescases, 1980; Oliveira, 1980a e b), Barro Alto (Melfi, 1974; Trescases e Oliveira, 1981), Niquelândia (Oliveira e Trescases, 1982), Vermelho (Bernardelli et al., 1983), São João do Piauí (Trescases et al., 1986) e Jacupiranga (Oliveira e Trescases, 1985; Oliveira et al., 1988). Uma síntese preliminar que deu conta das principais características de alguns depósitos brasileiros e propôs uma hipótese sobre sua gênese foi elaborada por Melfi et al. (1980). No quadro mais amplo das jazidas lateríticas do Brasil, alguns depósitos brasileiros são descritos por Melfi et al. (1988). Outros trabalhos que ajudaram a caracterizar os principais depósitos de níquel laterítico brasileiros podem ser citados : Stache (1974) para Barro Alto, Santos (1974) para São João do Piauí, Barbour (1978) e Barbour e Hipólito (1983) para Santa Fé, Esson e Santos (1978a) para Liberdade e Correa et al. (1984) para o Vermelho. Em 1986 o Departamento Nacional da Produção Mineral lançou o segundo volume da série "Principais Depósitos Minerais do Brasil", onde consta uma descrição geral dos maciços de Niquelândia, Barro Alto, Morro do Engenho, São João do Piauí, Vermelho, Onça, Puma e Jacaré.

A investigação de aspectos mineralógicos de mais detalhe, referentes aos minérios de níquel lateríticos do Brasil, é bastante incipiente. Além de alguns trabalhos de caráter geral publicados na década de setenta, como Brindley e Souza (1975a e b), Bosio et al. (1975), Souza et al. (1978) e Esson e Santos (1978b) para as fases silicatadas enriquecidas em níquel, provenientes de Niquelândia,

Morro do Níquel, Jacupiranga, Barro Alto e Liberdade, quase mais nada consta da literatura. Merece menção apenas o trabalho de tese de doutoramento de Colin (1985) sobre os produtos de alteração dos piroxenitos de Niquelândia, onde o autor descreve minuciosamente a formação de toda uma população de esmectitas de composição química variável, com o aumento do grau de alteração do material. Sobre o minério oxidado, constam da literatura somente dois artigos, ambos relativos à laterita niquelífera de Barro Alto (Kuhnel et al., 1978; Schellmann, 1983).

O objetivo deste trabalho é o de organizar de maneira sistemática o conhecimento até agora gerado sobre as lateritas niquelíferas brasileiras. A maior parte da informação nele contida deriva de artigos de cuja elaboração participei diretamente, e a restante, de material obtido por exaustiva pesquisa bibliográfica. Assim, inicialmente serão comentadas as condições geológicas e morfoclimáticas do território brasileiro, associadas aos depósitos de níquel laterítico. Em seguida, esses depósitos serão caracterizados com respeito às especificidades do perfil de alteração que apresentam, e com relação à organização espacial de suas zonas mineralizadas. Finalmente, será discutida uma hipótese explicativa para a gênese desses depósitos, e será avaliada a influência relativa da rocha parental e da evolução morfoclimática na sua elaboração.

II

CONTEXTO GEOLÓGICO E MORFOCLIMÁTICO DOS DEPÓSITOS DE NÍQUEL LATERÍTICO DO BRASIL

Os depósitos de níquel laterítico são formados pela alteração intempérica de rochas ultramáficas, sob condições morfoclimáticas favoráveis.

No Brasil, ocorre um grande número de maciços ultramáficos, distribuídos por diferentes zonas climáticas e em diferentes compartimentos geomorfológicos. Em alguns deles, a alteração intempérica levou à formação de coberturas lateríticas enriquecidas em níquel.

A análise do meio físico atual não é suficiente para explicar a gênese desses depósitos, posto que eles são, como se verá, produtos de uma longa evolução. No entanto, essa análise é importante, pois as condições atuais imprimem aos mantos de alteração características próprias, que vão permitir classificar os depósitos de níquel laterítico do Brasil em função das zonas climáticas em que eles se situam.

Assim, serão descritos os tipos de maciços ultramáficos portadores de depósitos de níquel e as diferentes zonas climáticas do país, onde eles ocorrem. Além disso, eles serão associados a compartimentos do relevo atual, cuja história evolutiva será esboçada.

1.Complexos máfico-ultramáficos do Brasil

Nos últimos anos, o conhecimento geológico dos vários tipos de complexos máfico-ultramáficos cresceu muito, principalmente com relação aos maciços da região Central e Leste do país. A partir de 1968, esse conhecimento foi sintetizado (Scorza, 1968; Angeiras, 1968; Sad, 1968), e surgiram as primeiras propostas de classificação, dentre as quais pode-se destacar a de Berbert (1970). Mais recentemente, Danni e Teixeira (1981) apresentaram um esquema de sistematização do conhecimento para as associações pré-cambrianas do Estado de Goiás. Finalmente, Nilson (1984) se propôs a sintetizar o conhecimento sobre as rochas máfico-ultramáficas do Brasil de idade pré-cambriana e apresentou uma nova classificação.

Passando em revista todas essas propostas de classificação, chegou-se à conclusão que os principais maciços portadores de níquel laterítico no Brasil podem ser enquadrados em três categorias :

Maciços máfico-ultramáficos de grandes dimensões, associados a terrenos granito-gnaissicos

Três maciços desse tipo ocorrem no Estado de Goiás, formando um alinhamento de direção nordeste : Cana Brava, Niquelândia e Barro Alto, sendo apenas os dois últimos portadores de depósitos de níquel. São corpos de idade provavelmente proterozóica (Fugl, 1989), de uma centena de quilômetros de comprimento por dezenas de quilômetros de largura. Suas zonas ultramáficas, contudo, são muito mais restritas. Foram identificadas nos complexos de Barro Alto e Niquelândia quatro unidades, metamorfizadas nas fácies anfibolito e granulito, e que mergulham para oeste (Figueiredo et al., 1975) :

- uma zona gábrica basal;
- uma zona ultramáfica parcialmente serpentizada;
- uma zona gabro-norítica central;
- uma zona gabro-anortosítica de topo.

A espessura total dessas unidades é maior que 20 km, sendo que apenas cerca de 2 km correspondem à zona ultramáfica. Recentemente, Danni e Teixeira (1981) e Danni et al. (1982) sugeriram para Niquelândia a individualização da zona de topo como um corpo independente, de idade mais recente. Esta proposta foi contestada por Rivalenti et al. (1982) e Girardi et al. (1986). A mesma polêmica se encontra em aberto também para o complexo de Barro Alto: Danni e Teixeira (1981), Fuck et al. (1981), Danni et al. (1982), Marini et al. (1984) excluem a zona gabro-anortosítica do topo, enquanto Figueiredo et al. (1975) e Girardi et al. (1981) a consideram parte integrante do maciço. Para esses últimos autores, tanto Barro Alto como Niquelândia são maciços tipicamente estratiformes.

Maciços ultramáficos de pequeno porte fortemente serpentinizados

Esses maciços formam o *serpentine belt* (Almeida, 1967) e têm idades entre 600 e 3000 milhões de anos, sendo associados a vários ciclos orogênicos. Ocorrem ao longo de alinhamentos, principalmente nos Estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais. Alguns deles são portadores de depósitos de níquel, como São João do Piauí e os pequenos complexos do Estado de Minas Gerais (Angeli e Choudhuri, 1985). Esses maciços podem conter uma restrita zona máfica associada; a zona ultramáfica, derivada de dunitos e peridotitos, encontra-se sempre fortemente serpentizada. São considerados por alguns autores como do tipo "alpino".

Maciços ultramáfico-alcálinos

São maciços de idade cretácica a terciária, relacionados ao vulcanismo ocorrido à época da abertura do Oceano Atlântico (Ulbrich e Gomes, 1981). Formam um cinturão que circunda a Bacia do Paraná, desde o Estado do Rio Grande do Sul até o Estado de Mato-Grosso. Em geral, possuem forma circular com até uma dezena de quilômetros de diâmetro; as zonas ultramáficas estão geralmente em seus núcleos. Iporá, Santa Fé, Água Branca, Morro do Engenho e Jaupaci, no Estado de Goiás, e Jacupiranga, no Estado de São Paulo, pertencem a esta categoria (Lindenmayer e Lindenmayer, 1971; Berbert, 1973).

Alguns maciços não se enquadram na classificação acima, como o de Quatipuru, no Pará, considerado por Nilson (1984) como alojado tectonicamente em seqüências metassedimentares de faixas dobradas (Grupo Araxá). O maciço do Vermelho, também no Estado do Pará, é um corpo acamadado sin-

vulcânico de filiação basáltica, associado a terrenos *greenstone belt* (Nilson, 1984). Os maciços de Puma, Onça e Jacaré, no mesmo estado, não foram suficientemente estudados para serem enquadrados em qualquer classificação, mas parecem pertencer à mesma família do Vermelho (Heim e Castro Filho, 1986).

2. Condições climáticas

Sendo um país de extensão continental, o Brasil possui uma grande variedade de climas, que podem ser agrupados em cinco tipos (fig. 2):

Clima equatorial quente e úmido (Região Norte)

É o clima dominante na Região Amazônica. A precipitação média anual situa-se em torno de 2000 mm, com uma estação seca muito curta, de no máximo três meses. A temperatura média anual é de 26°C e é muito constante durante o ano. Os depósitos de níquel que ocorrem nesta zona climática são Vermelho, Onça, Puma, Jacaré e Quatipuru.

Clima tropical de estações contrastadas (Região Central)

Esta zona climática ocupa o Centro-Oeste brasileiro e é caracterizada por temperaturas médias anuais entre 22 e 25°C, com pequenas

Figura 2. Domínios climáticos do Brasil (Romaris, 1974)

variações durante o ano, e por precipitação média anual entre 1200 e 1800 mm, concentrada durante seis meses. A estação seca não excede 3 a 4 meses. As mais importantes reservas de níquel do Brasil encontram-se associadas a este tipo de clima: Barro Alto, Niquelândia, Santa Fé e os demais depósitos do Estado de Goiás.

Clima tropical sub-quente e sub-úmido (Região Sudeste)

É o clima do litoral atlântico do Sudeste. A temperatura média anual situa-se por volta de 20°C, variando sensivelmente do verão ao inverno. A precipitação é bem distribuída ao longo do ano, situando-se, em média, entre 1500 e 1900 mm. Os depósitos de Jacupiranga, Morro do Níquel, Liberdade e Ipanema estão relacionados a esta zona climática.

Clima tropical semi-árido (Região Nordeste)

Ocorre no interior do Nordeste brasileiro, e é caracterizado por temperaturas médias entre 24 e 26°C, com pequenas variações durante o ano, e pluviosidade média inferior a 800 mm, concentrada em três ou quatro meses, sendo o resto do ano completamente seco. O único depósito de níquel importante nessa zona climática é o de São João do Piauí.

Clima sub-tropical a temperado (Região Sul)

É o clima dominante no Sul do Brasil. Nenhum depósito

de níquel laterítico é conhecido nessa zona climática.

3. Características gerais do relevo brasileiro

Os grandes traços do relevo brasileiro resultaram de uma evolução iniciada no Cretáceo Superior, com o levantamento do continente sul-americano. Um longo período erosivo nivelou a paisagem brasileira a um imenso peneplano, que foi designado de Superfície Sul-americana por King (1956). No Terciário Inferior, fase de aggradação da Superfície Sul-americana, o intemperismo levou à formação de importantes coberturas de alteração, de natureza principalmente ferrálica (Pedro e Volkoff, 1984).

Um novo levantamento do continente no Terciário Superior provocou o desenvolvimento de um novo ciclo erosivo, Velhas, que desmantelou a antiga superfície, deixando alguns relevos remanescentes preservados, principalmente no Planalto Central Brasileiro. Esses relevos residuais encontram-se a cotas de 500 a 1000 m no Centro-Oeste, caindo a valores de até 300 m na Região Amazônica. A Superfície Velhas está em cotas de 400 a 800 m no Centro-Oeste, chegando a 150 m na Região Amazônica (Braun, 1971).

A retomada do intemperismo se deu tanto sobre a Superfície Velhas, como sobre os restos da Superfície Sul-americana, levando à elaboração de novos perfis ferrálicos (Pedro e Volkoff, 1984).

A fase erosiva sub-atual a atual vem degradando a Superfície Velhas, que se encontra toda entalhada pela drenagem. Assim, as coberturas ferrálicas vão sendo destruídas.

Os maciços ultramáficos portadores de depósitos lateríticos no Brasil encontram-se relacionados às duas superfícies, em função de estarem mais ou menos erodidos. Morro do Níquel e Vermelho, por exemplo, constituem relevos residuais sul-americanos, emergentes da Superfície Velhas. Por outro lado, Barro Alto e Santa Fé encontram-se parcialmente arrasados ao nível Velhas.

O estudo dos perfis de alteração desenvolvidos sobre os maciços ultramáficos portadores de níquel, situados em uma e em outra superfície, permitirá o esclarecimento da história evolutiva desses maciços, sob a ação dos agentes intempéricos.

III

DESCRIÇÃO DOS DEPÓSITOS

A descrição dos depósitos de níquel laterítico do Brasil será feita de acordo com a zona climática onde ocorrem.

1. Depósitos da Região Central

As mais importantes reservas de níquel laterítico encontram-se na Região Central do Brasil (fig. 1), principalmente no Estado de Goiás, perfazendo uma reserva de quase duzentos milhões de toneladas (tab. 1). Os maciços ultramáficos ocupam geralmente as partes altas da paisagem, formando elevações capeadas por uma camada de material silicificado (silcrete). As partes baixas da paisagem correspondem à rocha encaixante ou aos setores mais dissecados dos maciços ultramáficos. Melfi et al.(1980) sugeriram que as baixadas correspondem à Superfície Velhas, formada no Terciário Superior, e que os topos silicificados representam relevos residuais, restos de uma superfície de erosão mais antiga, a Sul-

Depósitos	Reservas	
	10 ⁶ ton	% Ni
Iporá	13,6	1,5
Santa Fé	21,2	1,5
Água Branca	24,8	1,5
Morro do Engenho	26,8	1,1
Jaupaci	11,1	1,5
Barro Alto	47,0	1,4-2,1
Niquelândia	50,6	1,2-2,1
Total	195,1	

Tabela 1 - Reservas de níquel na Região Central do Brasil (Schobbenhaus et al., 1984)

americana, formada no Terciário Inferior. O grau de incisão e desmantelamento da Superfície Sul-americana e o conseqüente desenvolvimento da Superfície Velhas varia, dependendo das litologias e das dimensões dos maciços. Assim, os perfis enriquecidos em níquel podem ser encontrados tanto nas baixadas, como nos topos, sob a camada silicificada, mais ou menos preservada.

Niquelândia (Pecora, 1944; Costa, 1970; Santivañez, 1972; Araújo et al., 1972; Oliveira e Trescases, 1982; Pedroso e Schmaltz, 1986; Colin et al., 1989)

Em Niquelândia, apesar da enorme dimensão do maciço, a zona ultramáfica não é muito desenvolvida, formando apenas uma faixa estreita com 40 x 0,7 a 3 km de largura, orientada norte-sul. Na porção central e sul da faixa ultramáfica, as litologias dominantes são dunitos e peridotitos serpentinizados, intercalados com piroxenitos. Aí os depósitos de níquel (Jacuba, Coriola, Angiquinho, Córrego da Fazenda, Vendinha e Ribeirão do Engenho) encontram-se mais ou menos preservados da erosão, a cotas sempre superiores a 900 m, num platô ondulado, relacionado à Superfície Sul-americana. As áreas duníticas, capeadas por silcrete, correspondem aos topos, e as intercalações piroxeníticas, aos vales suspensos (fig. 3). Na porção norte da faixa ultramáfica, onde apenas ocorrem dunitos serpentinizados, a dissecação mais profunda do relevo resultou em morrotes alinhados segundo a direção norte-sul, de altitudes de até 800 m (remanescentes da Superfície Sul-americana), que emergem de uma planície à cota de 600 m, correspondente à Superfície Velhas (fig. 3). Essa planície, esculpida em rochas ultramáficas, encontra-se à mesma altitude em que estão o setor máfico do maciço e as rochas encaixantes do Complexo Basal.

Os depósitos de níquel relacionados aos dunitos e peridotitos serpentinizados são constituídos, no platô, por pequenos morros

Figura 3. Seções geológicas de Niquelândia e Santa Fé

arredondados capeados por silcrete. O perfil de alteração é geralmente pouco espesso, e o minério do tipo oxidado: o saprolito ferruginoso (goethita) jaz diretamente sobre a rocha pouco alterada. Exceção a esse esquema geral é o depósito de Angiquinho, onde ocorre minério silicatado (esmectita), desenvolvido sobre rochas dunfíticas, intercaladas com veios de piroxenitos. Esse depósito é capeado por um nível de couraça ferruginosa de 12 m de espessura média. Nesse caso, o minério silicatado ocorre em bolsões envolvidos por material ferruginoso e é composto principalmente por garnierita (serpentina com até 14,2% NiO e pimelita com até 17,2% NiO), e por esmectita tipo saponita com até 12,1% NiO, derivada da alteração dos piroxênios (Colin, 1985).

Na porção norte da faixa ultramáfica, os perfis de alteração mineralizados situam-se nos topos dos morrotes sob silcrete, nas partes inferiores das encostas e nas planícies adjacentes. São geralmente pouco espessos e o minério é do tipo silicatado nos topos, e silicatado e oxidado nas baixadas.

Um perfil típico de baixada varia de 8 a 20 m e apresenta dois grupos de horizontes (fig.4). O primeiro grupo, desenvolvido na base do perfil, é composto da rocha ultramáfica alterada que conserva sua estrutura original (saprolito). Esse grupo 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). A espessura do saprolito grosseiro e argiloso é respectivamente 2 a 4 m e 2 a 6 m. Nesses níveis saprolíticos, a densidade aparente decresce progressivamente de 2,6 a 3,0 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; o conteúdo de Fe, Cr, Al, e Ni, ao contrário, cresce 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

Figura 4. Perfil de alteração esquemático nas áreas de baixada em Niquelândia

saprolito 1 = rocha alterada ; saprolito 2 = saprolito grosseiro ; saprolito 3 = saprolito argiloso ; laterita 1 = saprolito ferruginoso ; laterita 2 = laterita vermelha.

esmectita. A garnierita pode ocorrer em veios, juntamente com o quartzo (quando de cor esverdeada, devido a impurezas de níquel, é chamado crisopráso), 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 a 5%.

O segundo grupo de horizontes é essencialmente ferruginoso (laterita). Da base para o topo, a cor varia de amarelo (laterita 1) a vermelho (laterita 2). Na laterita 1, ainda há vestígios das estruturas originais da rocha, e por isso esse nível pode ser considerado como um saprolito ferruginoso. Sua espessura é de 0 até 2 m. O tamanho das partículas, inicialmente muito reduzido ($1\mu\text{m}$), cresce em direção ao topo, com a formação de concreções pisolíticas milimétricas. Nos níveis lateríticos a goethita é o mineral predominante, acompanhada de hematita no topo do perfil (laterita vermelha, com 2 m de espessura). Quando o conteúdo em NiO é maior que 1%, o saprolito ferruginoso constitui o minério oxidado ou laterítico. O material vermelho superficial representa uma cobertura geralmente estéril, devido a seu baixo teor de níquel; apenas seus níveis inferiores podem apresentar teores de cerca de 1% NiO.

Nos topos dos morrotes, em vez de uma laterita vermelha, o perfil de alteração, de desenvolvimento incipiente, é capeado por silcrete.

Os perfis desenvolvidos sobre piroxenito, como em Jacuba, têm espessura de até 50 m e compõem-se de um nível basal de saprolito grosseiro (8 m de espessura), cortado por veios de garnierita (pimelita), e composto principalmente por piroxênio e esmectita. À medida que o piroxênio vai desaparecendo, dando lugar à esmectita, o saprolito grosseiro passa a saprolito argiloso (25 m), que constitui o principal horizonte mineralizado (2 a 5% NiO, em média). Existem na literatura vários dados disponíveis sobre a natureza e o quimismo das esmectitas de Jacuba. Segundo Brindley e Souza (1975b) e Souza et al. (1978), trata-se de montmorillonitas com até 6,5% NiO. Bosio et al. (1975) referem-se a nontronitas com

até 5,4% NiO. Mas foi Colin (1985) quem procedeu ao estudo mais completo desses minerais, e chegou à conclusão que esses filossilicatos são, no início da alteração, da família das Fe-saponitas (22% Ni) e, com o avanço do processo, passam a Fe-Al-saponitas (19% Ni), a hisingeritas (11% Ni) e, finalmente, a beidellitas (9,7% Ni).

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.

Sobrepoë-se ao saprolito argiloso um horizonte laterítico marron-arroxeadado (goethita e caulinita) aloterítico, que mostra sinais de compactação, o que eleva sua densidade aparente para 1,6. Sua espessura está em torno de 15 m e seu teor em NiO varia de 0,1 a 1,5% . O perfil é capeado por uma laterita vermelha , onde podem ocorrer concreções soltas de asbolano.

Em resumo, no maciço de Niquelândia, o minério de níquel é principalmente do tipo silicatado, associado aos níveis de saprolito grosseiro e argiloso. Quando derivado das lentes de piroxenito que ocupam os vales suspensos dos platôs, o níquel incluído na esmectita é proveniente dos dunitos que estão em posição topográfica mais alta: o conteúdo de níquel do piroxenito fresco não é suficiente para explicar os elevados níveis de enriquecimento nesse elemento em seus produtos de alteração. Uma parte do minério de Niquelândia é do tipo oxidado, relacionado aos níveis ferruginosos. A tabela 2 mostra a composição química média dos diferentes níveis do perfil de alteração desenvolvidos sobre dunitos, nas baixadas, e sobre piroxenito, em Jacuba.

	SiO ₂	MgO	*Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	NiO	Cr ₂ O ₃	CoO	MnO ₂
Rocha fresca								
I	53	25	10	4	0,1	n.d.	n.d.	n.d.
II	38	39	9	0,8	0,30	n.d.	n.d.	n.d.
III	42,3	44,3	8,4	0,8	0,25	0,44	n.d.	0,15
IV	39,4	40,2	9,0	0,4	0,29	0,39	0,02	0,22
Rocha alterada								
I	44	12	12	6	0,1-0,3	n.d.	n.d.	n.d.
II	35	34	12	1,2	0,7-2,0	n.d.	n.d.	n.d.
III	35,7	31,5	12	2,9	1,2-1,3	0,77	0,02	0,29
IV	41	33,4	10,4	0,5	0,3-1,3	0,44	0,02	0,20
Saprolito grosseiro								
II	35	17	14	2	1,0-1,5	n.d.	n.d.	n.d.
III	34,0	25,9	16,4	4,1	2,1-2,5	1,04	0,03	0,40
IV	40,8	28,3	15,5	0,7	0,4-1,6	0,64	0,03	0,28
Saprolito argiloso								
I	42	3	20	6	2,0-5,0	n.d.	n.d.	n.d.
II	35	6	20	6	2,0-5,0	n.d.	n.d.	n.d.
III	34,3	3,6	36,6	9,5	2,2-2,7	1,92	0,09	0,35
Saprolito ferruginoso								
II	4	1	70	5	0,4-2,5	n.d.	n.d.	n.d.
III	14,8	1,6	60,4	9,7	0,8-1,5	1,66	0,19	0,76
IV	30,9	16,4	34,6	1,9	0,7-2,1	2,21	0,06	0,44
Laterita vermelha								
I	17	0	57	11	0,1-1,0	n.d.	n.d.	n.d.
II	18	1	60	10	0,4-1,0	n.d.	n.d.	n.d.
III	15,7	1,5	53,0	13,9	0,5-1,3	3,2	0,09	0,86
IV	10,1	1,6	70,8	3,5	0,4-1,2	6,2	0,15	1,01

Tabela 2 - Composição química média (% em peso) dos horizontes dos perfis de alteração dos depósitos de: I=Niquelândia-piroxenito (Oliveira e Trescases, 1982), II=Niquelândia-dunito (Oliveira e Trescases, 1982), III=Barro Alto (Trescases e Oliveira, 1981), IV=Santa Fé (Oliveira e Trescases, 1980)

*Fe total como Fe₂O₃

Barro Alto (Baeta Jr. et al., 1972; Melfi, 1974; Stache, 1974; Figueiredo, 1978; Trescases e Oliveira, 1981; Baeta Jr., 1986)

Como em Niquelândia, a zona ultramáfica do maciço de Barro Alto é bem restrita, formando uma faixa alongada de direção nordeste com 30 km de extensão por 1,4 km de largura média. A litologia é representada por harzburgitos parcialmente serpentinizados, localmente intercalados com piroxenitos.

Do ponto de vista geomorfológico, distinguem-se na faixa ultramáfica zonas altas, ocupando a porção central, e baixadas nas extremidades (Superfície Velhas). Nas zonas altas, restritos platôs capeados por silcrete distribuem-se por entre relevos de encostas convexas ou íngremes. Nesses platôs, o saprolito grosseiro, recortado por veios de garnierita, é diretamente recoberto pelo silcrete. O perfil de alteração é mais bem desenvolvido nas encostas convexas (25 m), onde comporta horizontes de saprolito grosseiro (serpentina e esmectita), cortado por veios de garnierita (serpentina niquelífera e pimelita), saprolito argiloso (esmectita), ferruginoso (goethita) e laterita vermelha (goethita e hematita). Nas encostas íngremes, uma delgada camada de laterita vermelha jaz diretamente sobre o saprolito grosseiro. Nas baixadas, o perfil volta a se desenvolver melhor (18 m), com todos os horizontes de alteração presentes, embora com espessuras menores que nas encostas convexas.

A tabela 2 mostra a composição química média dos diferentes horizontes de alteração, encontrados nas baixadas de Barro Alto.

Os sítios mais favoráveis para a exploração são as encostas convexas e as baixadas, sendo considerado minério a rocha alterada, o saprolito grosseiro e argiloso (1,2 a 2,7% NiO), e o saprolito ferruginoso, onde o níquel está associado à goethita (Kuhnel et al., 1978), atingindo teores de 0,8 a 1,5% NiO. Localmente a cobertura de laterita vermelha apresenta valores interessantes para a exploração. O minério oxidado representa cerca de 10% do total, sendo 20% do tipo

transicional e 70% do tipo silicatado (Baeta Jr., 1986).

Santa Fé (Barbour, 1978; Oliveira, 1980a; Oliveira, 1980b; Oliveira e Trescases, 1980; Barbour e Hypólito, 1983)

O maciço ultramáfico-alcálico de Santa Fé é um corpo oval, de 38 km², formado por um núcleo dunítico (26 km²), envolvido por anéis concêntricos e descontínuos de peridotitos e piroxenitos, principalmente. A paisagem do maciço (fig. 3) encontra-se num estado avançado de erosão, sendo dominada por uma extensa planície (Superfície Velhas) a 470 m de altitude, de onde emergem algumas elevações capeadas por silcrete (550 a 650 m).

O perfil de alteração sobre dunitos é bem desenvolvido nas baixadas (20 m de espessura) e, num grau menor, no sopé das encostas. O perfil completo da baixada consiste em três horizontes : saprolito grosseiro (serpentina), recortado por veios de quartzo e garnierita, com até 15 m de espessura, saprolito ferruginoso (goethita e serpentina), com espessuras variando de 0 a 2 m, e laterita vermelha (goethita e hematita) de 1 a 4 m de espessura, concrecionar, localmente endurecida, formando couraça. Em Santa Fé, o saprolito argiloso derivado da alteração de dunito é ausente. A composição química média dos horizontes da alteração sobre dunito consta da tabela 2.

No topo das elevações, o saprolito grosseiro, recortado por veios de quartzo e garnierita, é diretamente recoberto por silcrete.

Os níveis mineralizados são o saprolito grosseiro (0,4 a 1,6% de NiO), o saprolito ferruginoso, com teores de 0,7 a 2,1% de NiO, e a parte basal da laterita vermelha, que apresenta valores da ordem de 1% NiO. Os valores mais altos de níquel encontram-se na zona de transição entre o saprolito grosseiro e o saprolito

ferruginoso.

Nas zonas piroxeníticas, o relevo é todo arrasado e os perfis de alteração, de natureza esmectítica (Oliveira e Melfi, 1979), não atingem valores superiores a 0,6% NiO, não constituindo, portanto, minério. Localmente, os perfis sobre peridotito podem encontrar-se mineralizados, mas a restrita ocorrência desse tipo litológico no maciço reduz sua importância como minério.

A jazida encontra-se localizada principalmente nos sopés e baixadas desenvolvidas sobre dunito. O minério silicatado representa 53% da reserva, sendo 47% correspondente ao minério oxidado (Barbour, 1978). Este é composto, em sua maior parte, pelo saprolito ferruginoso que, em Santa Fé, não é muito evoluído (teores médios de MgO de 16,4%).

Morro do Engenho (Chaban e Santos, 1973; Berbert, 1986)

A intrusiva ultramáfico-alcálica de Morro do Engenho apresenta-se sob a forma de duas elevações alongadas (1,4 x 0,4 km e 0,4 x 0,4 km) de rochas duníticas serpentinizadas, com desníveis entre 90 e 120 m em relação à Superfície Velhas, na área, cotada a 160 m de altitude. Essas elevações constituem o núcleo dunítico de um maciço que contém também rochas peridotíticas, piroxeníticas, gábricas e sieníticas.

O minério de níquel é principalmente do tipo silicatado, com teor médio de 1,1% Ni (tab. 1). Encontra-se tanto sobre as rochas duníticas nos topos das duas elevações capeadas por silcrete e nas baixadas circundantes, como sobre os peridotitos e piroxenitos, onde o perfil é do tipo argiloso e os teores são mais baixos.

Além das jazidas descritas, podem-se ainda mencionar, no Estado de Goiás, outros depósitos de níquel laterítico. Em Serra Água Branca (Justo, 1973), o depósito consiste de um nível de minério silicatado desenvolvido sob uma camada de silcrete, que capeia uma serra de topo tabular, com desníveis de aproximadamente 100 m em relação à Superfície Velhas. Os maciços ultramáfico-alcalinos de Iporá, Jaupaci e Piranhas também comportam ocorrências de níquel de porte restrito. No Estado de Mato-Grosso, Gouvea e Gouvea (1980) reportam a existência de um maciço serpentínico, Morro Sem Boné, com valores de até 1,9% Ni, nos níveis superiores do perfil de alteração. O serpentinito alterado chegaria até a 5,3% Ni. Não há dados na literatura sobre reservas e teores médios.

Em resumo, pode-se dizer que os depósitos da Região Central do Brasil são principalmente do tipo silicatado. As zonas mineralizadas estão tanto nas partes altas da paisagem (platôs, encostas convexas e vales suspensos), onde a composição é mais argilosa, como nas baixadas e sopés, onde uma evolução laterítica mais intensa levou à formação de minério oxidado que inclui, além do saprolito ferruginoso, os níveis inferiores da laterita vermelha.

2. Depósitos da Região Norte

Na região da Serra dos Carajás, entre os rios Araguaia e Xingu, cinco depósitos de níquel laterítico são mencionados na literatura geológica : Vermelho, Quatipuru, Onça, Puma e Jacaré, perfazendo mais de 100.10^6 toneladas de minério (tab. 3).

Depósitos	Reservas	
	10 ⁶ ton	% Ni
Quatipuru	13	1,3
Vermelho	45	1,5
Onça	18	2,2
Puma	25	2,2
Jacaré	23	1,2
Total	124	

Tabela 3 - Reservas de níquel na Região Norte do Brasil(Schobbenhaus et al., 1984).

Vermelho (Bernardelli et al., 1983; Correa et al., 1984; Alves et al., 1986)

A área do Vermelho é constituída por dois corpos ultramáficos (peridotitos e dunitos fortemente serpentinizados), V1 (2,5 x 1,5 km) e V2 (1,5 x 0,5 km), localizados na zona central de um maciço máfico-ultramáfico. Esses corpos formam colinas de topo tabular que emergem de uma superfície aplainada (Velhas), apresentando desníveis de até 200 m. Lentes piroxeníticas intercaladas no serpentinito são comuns. Em V1, por exemplo, uma espessa lente piroxenítica aflora num vale suspenso, entre duas cristas serpentínicas (fig. 5).

Nos topos tabulares, sob uma espessa camada de silcrete, desenvolveram-se os níveis ferruginosos e silicatados do perfil de alteração. Nas encostas suaves, com a ausência do silcrete, esses níveis afloram (fig. 5). Quando os declives são acentuados, o perfil é praticamente ausente, consistindo apenas de rocha pouco alterada.

Um perfil típico, com até 50 m de espessura, consta de um horizonte saprolítico (serpentina e clorita) de 20 a 25 m, e de um horizonte ferruginoso (goethita e quartzo), de espessura muito variável (0 a 30 m). Intercalações de níveis argilosos de natureza esmectítica nos níveis saprolíticos são comuns. Fraturas preenchidas por verdadeiras garnieritas não foram encontradas. Uma delgada camada de laterita vermelha (goethita, hematita e quartzo) recobre o perfil. Nos níveis saprolíticos silicatados, os teores de NiO variam de 0,5 a 3,0% e nos níveis ferruginosos de 0,4 a 5,0% (tab.4). O silcrete e a laterita vermelha contém baixos teores de níquel e não são considerados minério.

Das 40.10⁶ toneladas de minério cubadas no Vermelho, cerca de metade é de minério tipo silicatado com 2% em média de NiO. O restante é do tipo oxidado, com teores médio mais baixos, da ordem de 1,5% NiO (Alves et al., 1986). No silcrete, altos conteúdos de níquel podem ocorrer localmente, mas, de modo

	SiO ₂	MgO	*Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	H ₂ O ⁺	MnO ₂
(5)	17	0	63	6	2	0,3-1,0	6	n.d.
(4)	80	0	12	0,5	0,5	0,5	3	n.d.
(3)	5	0,7	69	4	2	0,4-5,0	10	n.d.
(2)	34	27	22	1	1	0,5-3,0	15	n.d.
(1)	32	36	12	1	0,4	0,3	15	n.d.

Tabela 4 - Composição química média (% em peso) dos horizontes do perfil de alteração no depósito do Vermelho (Bernardelli et al., 1983).

*Fe total como Fe₂O₃

(1) Rocha fresca; (2) Saprolito grosseiro; (3) Saprolito ferruginoso; (4) Silcrete; (5) Laterita vermelha

Figura 5. Seção geológica do depósito do Vermelho

geral, essa espessa cobertura é estéril, dificultando o aproveitamento do minério. No Vermelho, o horizonte ferruginoso é muito mais espesso que nos outros depósitos brasileiros, e muito mais evoluído, chegando a valores de até 69% Fe_2O_3 e 0% MgO .

Quatipuru (Cordeiro e McCandless, 1976; Sá, 1980)

A serra do Quatipuru corresponde a um corpo ultramáfico (dunito e peridotito serpentinizados) com 45 km de extensão por 1 a 3 km de largura, de direção geral norte-sul, apresentando desníveis de até 300 m.

O perfil de alteração, com até 6 m de espessura, é formado por um horizonte saprolítico na base (2 m), recoberto por um horizonte ferruginoso (1 m). No topo do perfil, ocorrem cerca de 3 m de laterita vermelha mais ou menos concrecionar. Os dois primeiros horizontes correspondem, respectivamente, ao minério silicatado e ao minério oxidado. Os níveis superiores do perfil encontram-se fortemente silicificados.

Puma e Onça (Heim e Castro Filho, 1986)

Puma e Onça são complexos máfico-ultramáficos (dunitos e peridotitos serpentinizados, piroxenitos e gabros), de forma alongada e de direção aproximadamente leste-oeste, que se sobressaem na paisagem como serras de topo tabular, com desníveis de até 200 m.

Puma, com 23 km de comprimento por 3 km de largura, é composto de peridotitos serpentinizados, na sua porção ultramáfica. Sobre essas rochas desenvolveu-se um capeamento laterítico com saprolito silicatado na base

(serpentina, clorita e esmectita) e material ferruginoso no topo (goethita, hematita e quartzo). O perfil de alteração é mais bem desenvolvido nas zonas de menor declive e, no topo tabular da serra, está sempre recoberto por um espesso nível de silcrete. Nos níveis inferiores do perfil de alteração, o saprolito é recortado por velos de quartzo e garnierita. Os teores médios de Ni, Fe e Co do minério são, respectivamente, 2,20%, 26,4% e 0,084%, indicando que se trata de um minério com forte componente oxidado.

Na serra da Onça (22 x 3 km), as rochas ultramáficas são representadas por dunitos serpentinizados e piroxenitos. O perfil de alteração é semelhante ao de Puma, sendo que também em Onça aparece o nível de silcrete capeando os topos da serra, e veios preenchidos por quartzo e garnierita na base do perfil. Os teores médios de Ni, Fe e Co são, respectivamente, 2,14%, 15,9% e 0,067%, caracterizando, portanto, um minério menos oxidado que o de Puma.

O depósito Puma-Onça possui altos teores de níquel (teor médio acima de 2 % Ni para um *cut-off* de 1,5% Ni), e tonelagens acima de 40 milhões (tab. 3).

Jacaré (Castro Filho e Mattos, 1986)

A serra do Jacaré é uma elevação alongada de direção norte-sul, tendo comprimento aproximado de 19 km e largura máxima de 4 km. Sua parte norte é mais elevada, chegando a desníveis de 200 m, com topografia sustentada por capeamento de silcrete, de até 30 m de espessura. A parte sul atinge apenas 100 m de desnível. Possui uma extensão para sudoeste denominada Jacarezinho, com 4 km de comprimento, 2 de largura e diferenças de cota de 150 m.

Trata-se de um maciço máfico-ultramáfico, cuja porção ultramáfica é representada por serpentinitos derivados de dunitos e de harzburgitos. O

perfil de alteração típico comporta, da base para o topo, saprolito silicatado (serpentina) e saprolito oxidado (goethita, serpentina e clorita), mais ou menos concrecionar. São considerados minério o saprolito silicatado, com 1,45% Ni, e o saprolito oxidado, com 1,29% Ni. A espessura de ambos os horizontes é de cerca de 4 m. A avaliação das reservas e teores médios está na tabela 3.

Os depósitos de níquel laterítico da Região Norte do Brasil estão relacionados a perfis capeados por um espesso nível silicificado, e comportam um horizonte oxidado mais espesso e mais evoluído do que o que ocorre nos demais depósitos brasileiros. As zonas mineralizadas encontram-se nos topos das elevações e nas encostas suaves.

3. Depósitos da Região Sudeste

No Sudeste brasileiro, apenas quatro maciços ultramáficos apresentam depósitos de níquel laterítico : Jacupiranga, no Estado de São Paulo, Liberdade, Ipanema e Morro do Níquel, no Estado de Minas Gerais. No Estado do Rio de Janeiro, o maciço de Três Rios constitui-se numa pequena ocorrência de níquel laterítico, de tonelagem insignificante (Fonseca et al., 1979).

Jacupiranga, situado à latitude de 24°44'S, representa a mais meridional ocorrência de níquel laterítico no Brasil. Outros maciços ultramáficos localizados mais ao sul, como Piên, em Santa Catarina (Trescases e Schevciw, 1980) e Pedras Pretas, Passo do Ivo e Cerro Mantiqueiras, no Rio Grande do Sul (Menegotto,

1983) não mostraram uma evolução supérgena do tipo laterítico. Neles, o perfil de alteração, pouco espesso e pouco evoluído, levou apenas a uma ligeira concentração de níquel.

Jacupiranga (Felicíssimo Jr., 1968; Oliveira e Trescases, 1985; Oliveira et al., 1988)

O complexo alcalino de Jacupiranga consiste numa associação de rochas ultramáficas, alcalinas e carbonatíticas, intrusivas no embasamento cristalino. É um corpo oval, de eixo maior orientado norte-noroeste, em cuja metade superior, perfazendo uma área de cerca de 20 km², ocorre um núcleo de dunitos serpentinizados. São essas rochas que, afetadas pelo intemperismo, enriqueceram-se em níquel, formando o depósito. A metade inferior da intrusão é dominada por piroxenitos alcalinos (jacupiranguitos), cujos produtos de alteração intempérica são constituídos essencialmente por um saprolito argiloso rico em esmectitas da família das beidellitas (Oliveira e Delvigne, 1988). É um material pobre em níquel, atingindo, no máximo, uns 500ppm nesse elemento, mas rico em TiO₂ (até 10%), não constituindo, entretanto, concentração de interesse econômico (Oliveira et al., 1988).

O relevo do maciço na região dunítica consiste de um platô a oeste, que grada para uma morfologia mais dissecada, de morrotes meia-laranja, separados por vales estreitos, a leste. No setor piroxenítico, a topografia é mais arrasada e segmentada.

O perfil de alteração sobre dunito, espesso de até 60 m (fig.6), comporta, na sua base, um nível saprolítico esverdeado, composto por serpentina mais ou menos alterada e impregnada por material amorfo niquelífero, esmectita niquelífera e por bolsões de clorita; esta, designada por Brindley e Souza

(1978b) como schuchardita, possui camadas vermiculíticas interestratificadas e é portadora de até 8% de NiO. Veios de quartzo e garnierita (serpentina níquelífera e pimelita) cortam o saprolito, principalmente em sua porção basal. No topo são comuns concreções de asbolano. O horizonte como um todo atinge espessuras de 30 a 40 m, sendo mais argiloso em direção ao topo. Os teores de NiO variam de 0,4 a 2,0% , e são máximos nos segmentos do perfil mais ricos em veios de garnierita.

Sobrepoë-se ao saprolito esverdeado um horizonte muito heterogêneo, que pode ser concebido como uma mistura, em proporções variadas, de um polo saprolítico ferruginoso composto essencialmente por goethita e de um polo quartzoso. Atinge, nos platôs, espessuras de até 30 m, diminuindo sensivelmente nas encostas. Os teores de níquel dependem da quantidade de quartzo presente, variando de menos de 0,1% (polo quartzoso) até 1% de NiO (polo ferruginoso).

Capeando o perfil, ocorre um horizonte de até 10 m de espessura, de cor avermelhada, composto de caulinita, goethita aluminosa e um pouco de quartzo. A assinatura geoquímica desse horizonte, caracterizada por altos teores de Al, Ti, Zr, V e P, e baixos teores de Cr, Ni e Co (Oliveira et al., 1988), é um forte argumento a favor da hipótese de uma origem, pelo menos, parcialmente alóctone. Coberturas contaminadas por material alóctone, capeando perfis de laterita níquelífera, são descritos na literatura, em vários depósitos (Schellmann, 1986b).

De maneira geral, o nível silicificado, que dificulta a exploração e empobrece o minério, é mais espesso na parte oeste do maciço. Assim, os setores mais interessantes do depósito seriam os flancos dos morrotes a leste que, entretanto , não representam uma grande reserva de minério.

Morro do Níquel (Santivañez, 1965; Langer, 1969; Griffon e Richter, 1976; Trescases e Oliveira, 1978)

Em Morro do Níquel, o depósito é representado por um morrote (0,3 km²) de serpentinito com topo tabular e encostas bastante inclinadas.

O perfil de alteração (fig.6), com mais de 50 m de espessura, apresenta um horizonte basal saprolítico, composto essencialmente por serpentina tipo crisotila (Souza et al., 1978), associada a compostos amorfos de Fe e Ni. Veios de garnierita (serpentina e pimelita), associada geralmente a quartzo, recortam esse horizonte (Esson e Santos, 1978b). Uma variedade de clorita de cor dourada também se encontra presente no horizonte de saprolito, e chega a conter até 6% NiO (Brindley e Souza, 1974). O horizonte como um todo contém de 0,4 a 3,9% de NiO e é coberto por um espesso nível de silcrete. Localmente, entre o horizonte silicificado e o nível saprolítico, ocorrem bolsões de um material ferruginoso (goethita e quartzo), com cerca de 1% NiO. O silcrete é um *boxwork* de quartzo preenchido por um material ferruginoso, com teores de menos de 0,5% NiO. Uma camada pouco espessa de solo laterítico, derivado da desintegração do silcrete, cobre o perfil.

Cerca de dois terços do total do minério é do tipo silicatado, representado pelo saprolito. O terço restante das reservas localiza-se abaixo da cobertura silicificada, e é de natureza oxidada e rico em quartzo (Schobbenhaus, 1986). A usina da Companhia Morro do Níquel S/A trabalha com uma mistura ajustada dos dois tipos de minério.

Liberdade (Esson e Santos, 1978a)

O corpo ultramáfico de Liberdade é composto

Figura 6. Perfis de alteração dos depósitos da Região Sudeste

essencialmente por serpentinito e subsidiariamente por peridotito serpentizado. Forma um morrote de encostas suaves, com área de 1,5 km². O manto de alteração, de até 10 m de espessura nas áreas mais planas, subdivide-se em uma zona basal, contendo principalmente serpentina, talco e clorita, e uma zona de topo silicificada e rica em goethita. Velos de garnierita, perfazendo menos de 5% do nível saprolítico, são constituídos por minerais do grupo da serpentina e talco, e podem conter de 3 a 20% de NiO (Esson e Santos, 1978b).

O minério é principalmente do tipo silicatado, estando relacionado aos níveis inferiores do perfil de alteração, onde os teores de NiO variam de 1,1 a 2,9%. Acima desses níveis, ocorre um minério de tipo parcialmente oxidado, com teores de Fe₂O₃ elevados (>50%), mas ainda com quantidade considerável de MgO (2-5%); o teor de NiO situa-se entre 1 e 2%.

Ipanema (Angeli et al., 1984; Angeli, 1989)

Em Ipanema há vários pequenos corpos mineralizados (em torno de 0,5 km² cada um), sendo os mais importantes Santa Cruz e Santa Maria. No primeiro deles, predominam peridotitos e dunitos serpentizados, enquanto que no segundo, as litologias predominantes são peridotitos e piroxenitos. Apresentam-se como morrotes, em cujos topos e porções mais altas das encostas desenvolvem-se perfis lateríticos mineralizados.

Em Santa Cruz, o perfil típico, com até 30 m de espessura (fig.6), apresenta em sua porção inferior uma fácies saprolítica rica em esmectita, com teores médios de NiO entre 1,1 e 3,5%. Sobrepe-se a ela um nível de saprolito ferruginoso silicificado, não muito evoluído, contendo ainda quantidades razoáveis de silicatos endógenos, como talco, clorita e anfibólio, embora não mais possua olivina ou

serpentina. Nesse material o NiO pode atingir até 1%, mas a faixa mais freqüente de teores situa-se entre 0,6 e 0,9%. Um nível de até 6 m de laterita vermelha estéril capela o perfil.

No caso de Santa Maria, os perfis são geralmente menos espessos (em torno de 20 m) e comportam apenas minério silicatado com 1 a 2% de NiO.

Nos quatro maciços descritos, o nível saprolítico silicatado constitui, de longe, o principal tipo de minério e é mais ou menos argiloso, dependendo do conteúdo de esmectita. Em Jacupiranga, esse conteúdo é máximo, e em Morro do Níquel e Liberdade a esmectita está completamente ausente.

A tabela 5 mostra a composição química média dos horizontes de alteração para os quatro maciços. O minério apresenta concentração moderada em Cr e Co, sem interesse do ponto de vista econômico.

Os dados referentes aos teores médios e às tonelagens estão na tabela 6. Pode-se dizer que se trata de pequenos depósitos, com quantidades moderadas de Ni. A posição topográfica da zona mineralizada restringe-se, nos quatro casos, aos topos e porções superiores das encostas. Esses setores topográficos são sempre capeados por uma cobertura estéril, o que dificulta a exploração.

4. Depósitos da Região Nordeste

Na Região Nordeste do Brasil, há dois depósitos de níquel

	SiO ₂	MgO	*Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	NiO	Cr ₂ O ₃	CoO	MnO ₂
Rocha fresca								
I	40	37	10	0,2	0,3	0,4	0,02	0,30
II	35,7	38,5	5,7	0,8	0,4	0,1	0,02	n.d.
III	37	37,7	8,6	1,5	0,2	0,4	0,02	0,11
Saprolito grosseiro								
I	45	25	16	0,5	0,4-2,0	1,2	0,03	0,50
II	43	33	7	0,7	0,4-3,9	0,1	0,02	n.d.
III	33	17	29	2,2	1,1-2,9	1,0	0,05	0,36
IV	44	28	3	1,0	1,1-3,5	0,3	0,01	0,15
Saprolito argiloso								
I	45	12	24	0,9	0,4-1,5	1,2	0,04	0,50
Saprolito ferruginoso silicificado								
I	11-87	0,5	7-70	1,6	0,0-1,0	1,5	0,01	0,30
II	86	2,4	7	0,9	0,4-0,5	0,2	0,03	n.d.
IV	46,7	14,1	26,3	1,9	0,6-0,9	0,8	0,35	0,38
Laterita vermelha								
I	30	0,2	32	20	0,1	1,3	0,01	0,20
II	74,3	0,3	17,2	3,8	0,3	0,9	0,04	n.d.
III	32	3,9	36,0	9,9	0,1	1,5	0,09	0,57

Tabela 5 - Composição química média (% em peso) dos horizontes dos perfis de alteração dos depósitos de I=Jacupiranga (Oliveira e Trescases, 1985), II=Morro do Níquel (Trescases e Oliveira, 1978), III=Liberdade (Esson e Santos, 1978a), IV=Ipanema (Angeli et al., 1984)

*Fe total como Fe₂O₃

Depósitos	Reservas	
	10 ⁶ ton	% Ni
Jacupiranga	2,2	1,5
Liberdade	2,0	1,7
Morro do Níquel	0,95	1,5
Ipanema	4,0	1,2-1,5
Total	9,2	

Tabela 6 - Reservas de níquel na Região Sudeste do Brasil (Schobbenhaus et al., 1984).

laterítico, Serra das Marrecas, no Estado da Bahia, e São João do Piauí, no Estado do Piauí, sendo que apenas o último representa uma reserva considerável (tab.7)

São João do Piauí (Santos, 1974; Dino, 1984; Trescases et al., 1986; Santos, 1986)

O depósito de São João do Piauí desenvolveu-se sobre a zona ultramáfica de um maciço máfico-ultramáfico. A zona máfica, constituída de gabros, está nivelada às mesmas cotas que a rocha encaixante (Superfície Velhas), a cerca de 300 m de altitude. A zona ultramáfica (7 km²), representada por serpentinito, emerge da paisagem sob forma de uma colina de extensas e suaves encostas, com topo tabular (480 m de altitude), sustentado por uma espessa camada de silcrete (fig. 7).

O perfil de alteração pode ser subdividido em duas camadas. Na base, ocorre um horizonte saprolítico, composto por serpentina, nos seus níveis inferiores (rocha alterada e saprolito grosseiro), e esmectita, na parte superior (saprolito argiloso). Esse horizonte, com cerca de 20 m de espessura, apresenta grau variável de silicificação, e é sotoposto por um horizonte de 10 m de espessura média, formado por blocos de serpentinito silicificado (silcrete), misturados com escassas concreções ferruginosas .

No topo tabular da colina, o horizonte saprolítico é mais espesso e de composição mais argilosa. Nas encostas, o nível argiloso é mais delgado e o nível saprolítico, menos desenvolvido como um todo, é principalmente formado pela fácies saprolito grosseiro. Quando a inclinação da encosta é muito íngreme, o perfil é praticamente ausente (fig. 7). O grau de silicificação do saprolito é maior no topo e nas partes superiores das encostas e é menor em direção à planície.

O minério consiste no saprolito grosseiro e argiloso,

Depósitos	Reservas	
	10 ⁶ ton	% Ni
Serra das Marrecas	0,9	1,5
São João do Piauí	20	1,6
Total	20,9	

Tabela 7 - Reservas de níquel na Região Nordeste do Brasil (Schobbenhaus et al., 1984).

Figura 7. Seção geológica do depósito de São João do Piauí

apresentando os melhores teores quando esse material não é muito silicificado. É encontrado, portanto, nas partes baixas das encostas, e os teores variam entre 1 e 2% de NiO. No topo, os níveis saprolíticos apresentam teores sempre inferiores a 0,6% NiO. Uma feição característica deste depósito é a ausência de garnierita na base do perfil.

A tabela 8 mostra a composição química média dos diferentes horizontes do perfil de alteração. É notável que os valores de sílica contida nos silicatos seja constante ao longo de todo o perfil (tab.8), indicando que não houve lixiviação de sílica, típica da alteração laterítica. De fato, a laterização foi um processo restrito a áreas do topo da colina, onde um escasso material ferruginoso é encontrado, envolvendo blocos rochosos silicificados.

Em um clima semi-árido como o do Nordeste, a erosão tende a prevalecer sobre a alteração. Em consequência, quase todos os maciços ultramáficos da região não contém depósitos de níquel. A pequena ocorrência de níquel laterítico de Serra das Marrecas (Schobbenhaus, 1976) não é senão um vestígio de uma acumulação que pode ter sido semelhante à de São João do Piauí. Da erosão, apenas restou uma delgada camada saprolítica silicificada com 1,5% de NiO. No Estado da Paraíba, em Catingueira (Farina, 1969), o perfil de alteração desenvolvido sobre dois pequenos corpos ultramáficos é formado apenas por um nível fortemente silicificado, portador de garnierita, (até 11,56% NiO), em contato com a rocha fresca. Em Andorinha, no Estado da Bahia, o maciço ultramáfico está completamente erodido, nivelado à Superfície Velhas. O perfil de alteração, de apenas alguns decímetros de espessura, é formado por material esmectítico silicificado.

	*SiO ₂	**SiO ₂	MgO	#Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO
(6)	52,7		0,9	27,6	n.d.	n.d.	n.d.	0,53
(5)	2,5	39,2	6,7	24,0	12,6	0,50	0,47	1,60
(4)	32,7	39,5	3,3	13,3	2,7	0,58	0,15	1,04
(3)	3,6	39,2	17,0	21,1	5,1	0,61	0,33	1,98
(2)	28,6	39,4	9,3	13,0	2,2	0,56	0,15	0,41
(1)	1,2	40,9	32,8	13,4	1,0	0,21	0,15	0,50

Tabela 8 - Composição química média dos horizontes do perfil de alteração no depósito de São João do Piauí (Trescases et al., 1986).

*SiO₂ = quartzo + calcedônia; **SiO₂ nos silicatos; #Fe total como Fe₂O₃

(1) Rocha fresca; (2) Saprolito grosseiro silicificado; (3) Saprolito grosseiro; (4) Saprolito argiloso silicificado; (5) Saprolito argiloso; (6) Laterita vermelha

IV

GÊNESE DO PERFIL LATERÍTICO

1. Evolução mineralógica

Os perfis lateríticos enriquecidos em níquel, descritos acima, derivaram de rochas ultramáficas formadas essencialmente por olivina, serpentina, e uma certa quantidade de orto e clinopiroxênios, tendo como minerais acessórios principalmente a magnetita e a cromita.

No início da alteração, a olivina é gradualmente hidrolisada, com lixiviação quase total do magnésio e parcial da sílica. Nesse ambiente, alcalino e oxidante, o ferro e o níquel são insolúveis e precipitam, juntamente com a sílica, nas cavidades deixadas pela dissolução da olivina. Esses produtos podem também ocupar as descontinuidades existentes entre as fibras da serpentina, dando a ela uma cor amarelada e um alto conteúdo em níquel. Oliveira e Trescases (1980) e Silva (1980) demonstraram que, nos níveis inferiores do perfil de alteração de Santa Fé, o níquel e o ferro provenientes da hidrólise da olivina encontram-se, em sua maior parte, como compostos amorfos. Besset e Coudray (1978), analisando à microsonda produtos amorfos desse tipo, de composição sílico-ferruginosa, mostraram que a

variação composicional é muito ampla, e que o conteúdo em NiO pode variar de 0 a 16%.

Pode também ocorrer que a alteração da olivina se faça de forma incongruente, deixando como resíduo esmectitas trioctaédricas magnesianas e níquelíferas, da família das saponitas. De acordo com Trescases (1975), o aparecimento de esmectita substituindo olivina estaria, na Nova Caledônia, relacionado às condições de drenagem dos perfis. Em perfis bem drenados, a substituição da olivina pela fase amorfa seria mais comum, enquanto que em perfis mal drenados, como os de platô, ou em climas relativamente secos, prevaleceria a formação de esmectita.

Os piroxênios alteram depois da olivina, e dão inicialmente como produtos esmectitas magnesianas. Em Niquelândia, essas esmectitas, submetidas a tratamento mais refinado, mostraram-se como minerais interestratificados, onde camadas trioctaédricas com magnésio estão intercaladas a camadas dioctaédricas com ferro e alumínio (Decarreau et al., 1987). No caso de haver possibilidade de aporte lateral de níquel, proveniente de rochas duníticas a montante, como em Niquelândia, esse elemento encontra-se substituindo o magnésio no retículo cristalino do filossilicato. A passagem piroxênio-esmectita pode se fazer ou não através de uma fase amorfa (Colin et al., 1985).

Enquanto a olivina e o piroxênio vão sendo destruídos, a serpentina permanece estável, porém parte de seu magnésio octaédrico pode ser substituído por níquel, provocando um ligeiro desarranjo na sua estrutura (Trescases, 1979).

Nas fraturas da rocha em início de alteração, minerais neoformados precipitam a partir das soluções provenientes da alteração da olivina e do piroxênio. Essas soluções, ricas em silício, magnésio e níquel, geram as garnieritas. A partir delas pode também precipitar quartzo e calcedônia, contendo ou não impurezas

de níquel. A garnierita pode apresentar-se coloforme, com forte zoneamento composicional, ou maciça, não mostrando nenhuma estrutura.

Acumulações irregulares de clorita e vermiculita, de origem provavelmente hipógena, relacionada ao processo de serpentinização, que se apresentam ligeiramente alteradas e enriquecidas em níquel, são mencionadas com frequência na base dos perfis de alteração, como, por exemplo, em Morro do Níquel e em Santa Fé.

Quando as ultramáficas são recortadas por veios de material feldspático, estes podem mostrar, ao longo de suas clivagens, argilominerais níquelíferos, o que lhes confere cor verde característica, como acontece em Niquelândia (Melfi et al., 1980) e em Jacupiranga (Oliveira e Trescases, 1985). Nesses casos, a fonte do níquel é, evidentemente, a rocha ultramáfica encaixante.

Uma vez a olivina dissolvida, a porosidade do material aumenta, e as soluções de alteração se tornam mais diluídas. Em consequência, as esmectitas magnesianas, formadas previamente, não são mais estáveis e se dissolvem. As esmectitas derivadas dos piroxênios passam de variedades mistas de magnésio, ferro e alumínio para variedades puramente dioctaédricas (Paquet et al., 1983; Colin et al., 1989), com perda de níquel. Agora, a alteração da serpentina começa, resultando geralmente apenas num resíduo goethítico, enriquecido em níquel, como acontece em Morro do Níquel e em Santa Fé, por exemplo. Mais raramente, como em condições climáticas mais áridas (São João do Piauí), ou, localmente, em zonas mal drenadas (Barro Alto), a serpentina pode também evoluir para argilas esmectíticas.

As garnieritas também se tornam instáveis com a intensificação do processo intempérico, e acabam por se dissolver. Nas fraturas, aparece agora uma mistura de óxidos e hidróxidos de manganês, níquel, cobalto e ferro que geralmente compreende litioforita, criptomelano e todorokita.

Todas essas transformações começam nas

descontinuidades do material rochoso, a partir de onde um produto mais alterado envolve os blocos residuais de rocha pouco alterada. Este é o nível de saprolito grosseiro. Com o avanço do processo, o produto mais alterado se torna predominante, em detrimento dos blocos de rocha alterada e, se ele for de natureza argilosa, forma-se o horizonte de saprolito argiloso. Esses horizontes, onde os silicatos são os minerais dominantes, constituem o minério silicatado, com 1 a 4% NiO.

Nos níveis superiores do perfil, a paragênese silicatada dá lugar, sobre os dunitos, a uma paragênese essencialmente oxidada : esmectitas e serpentina transformam-se em hidróxidos de ferro amorfo e goethita. No caso dos piroxenitos, que evoluem em direção a esmectitas aluminosas, os níveis superiores do perfil são compostos por goethita e caulinita

Os produtos ferruginosos, quando derivados da serpentina, mantém até certo ponto a textura da rocha original e, por essa razão, os horizontes ferruginosos são designados de saprolito ferruginoso. O níquel, nesse ambiente mais ácido, é mais solúvel, e parte dele migra para baixo, alimentando os horizontes de saprolito silicatado. Em geral, uma quantidade de níquel da ordem de 1% permanece no saprolito ferruginoso, que constitui o minério oxidado ou laterítico.

Com relação à mineralogia do níquel no saprolito oxidado, Kuhnel et al. (1978), numa investigação sobre o minério de Barro Alto, demonstraram que o níquel se associa à goethita mal cristalizada. Schellmann (1983) mostrou que existe forte correlação negativa entre o grau de cristalinidade da goethita e seu conteúdo em níquel. No entanto, a exata posição do níquel no retículo cristalino da goethita ainda não é bem conhecida, sendo admitidas tanto a hipótese de verdadeira solução sólida, com uma substituição do par $\text{Si}^{4+}\text{-Ni}^{2+}$ por 2Fe^{3+} , o que resolveria o problema das cargas, como a hipótese de o níquel ocupar defeitos no retículo cristalino. Kuhnel et al. (1978) sugeriram que o níquel esteja, em sua maior quantidade, associado à ferridrita, material precursor da goethita, com alto grau de imperfeição

estrutural e, portanto, de grande capacidade de sorção. De maneira geral, no horizonte de saprolito ferruginoso, mais de 90% do níquel está associado aos óxidos de ferro; os 10% restantes estão associados aos asbolanos (Schellmann, 1978).

No topo do perfil de alteração, a goethita transforma-se em hematita, com perda de níquel em favor dos horizontes subjacentes. Essa perda se dá em função do fato de que a hematita, tendo uma estrutura mais ordenada que a da goethita, não é capaz de incorporar elementos estranhos, como o níquel, em seu retículo (Besset e Coudray, 1978). A transformação goethita-hematita se dá com a destruição completa das texturas originais da rocha, e com a mudança de coloração do material, de tons amarelados para tons avermelhados. A laterita vermelha apresenta frequentemente concrecionamento. Nas baixadas (Santa Fé) e nas zonas deprimidas dos platôs (Niquelândia), sua evolução pode alcançar o estágio de ferricrete.

2. Evolução química

As tabelas 2, 4, 5 e 8 mostram que o intemperismo das rochas ultramáficas é caracterizado por lixiviação preferencial de magnésio e, com um certo atraso, de sílica. Em consequência, os elementos mais insolúveis, como o ferro, alumínio e crômio, são concentrados residualmente.

O níquel, liberado dos minerais hipógenos, passa por diferentes armadilhas (amorfos sílico-ferruginosos, garnieritas, serpentina, esmectitas, asbolano, amorfos ferruginosos e goethita), nos diferentes níveis do perfil de alteração, só constituindo seus próprios minerais no caso das garnieritas, que não são, entretanto, quantitativamente importantes como minério. Os horizontes preferenciais de

acumulação do níquel são os saprolitos grosseiro e argiloso, enriquecidos por lixiviação vertical e, eventualmente, lateral, dos níveis a montante.

A zona de maior estabilidade para o manganês e o cobalto, menos solúveis que o níquel, é o saprolito ferruginoso, onde esses elementos encontram-se nas concreções de asbolano, juntamente com um pouco de ferro e níquel.

Essa evolução é similar à de outros depósitos de níquel laterítico do mundo (Golightly, 1981; Schellmann, 1983). No entanto, uma característica notável dos depósitos brasileiros é que a dessilicificação do perfil nunca é completa, e isto é devido ao fato de que existe sempre um nível de material silicificado (silcrete) no topo dos perfis, nas zonas altas da paisagem, que funciona como uma fonte provedora de sílica para os níveis inferiores do perfil.

Como as texturas da rocha original estão conservadas nos níveis saprolíticos, é possível efetuar um balanço isovolumétrico (Millot e Bonifas, 1955) para esses horizontes, em relação à rocha fresca. Para a laterita vermelha, usa-se o cálculo isocrômio, isoalumínio ou isotitânio (Krauskopf, 1979). O balanço mostra que, num perfil de baixada, por exemplo em Santa Fé (Oliveira e Trescases, 1980), a tendência é para a eliminação constante e gradual de silício e magnésio desde a rocha fresca até a laterita vermelha, e para a acumulação residual de ferro, alumínio e cromo nos horizontes de rocha alterada e saprolito grosseiro. Segue-se certo enriquecimento absoluto desses elementos nos níveis superiores do perfil, devido provavelmente à iluviação de partículas finas da laterita vermelha para o saprolito ferruginoso e à compactação da laterita vermelha. Essas tendências são típicas de uma evolução laterítica. Uma exceção a esse esquema é o maciço de São João do Piauí, que evoluiu sob clima mais árido. Nele, a conservação da maior parte da sílica é a regra (Trescases et al., 1986).

Nos topos, o cálculo isovolumétrico realizado para o

silcrete, por exemplo em Jacupiranga (Oliveira e Trescases, 1985), indicou um aporte absoluto de 70% de sílica, e, para o silcrete de Barro Alto, esse aporte chegou até 200% (Trescases e Oliveira, 1981). Isto significa que o silcrete não pode ter derivado de uma evolução laterítica do perfil, similar à que ocorre hoje nas baixadas. Ao contrário, ele foi formado por um processo de acumulação absoluta de sílica, a partir de horizontes do perfil de alteração, hoje erodidos, que lhe estariam sobrepostos.

Quanto ao níquel, os cálculos de balanço indicam enriquecimentos absolutos nos níveis de saprolito silicatado sobre dunito da ordem de 400% em Santa Fé (Oliveira e Trescases, 1980), Ipanema (Angeli et al., 1984), Jacupiranga (Oliveira e Trescases, 1985), Morro do Níquel (Trescases e Oliveira, 1978) e São João do Piauí (Trescases al., 1986). Esse enriquecimento chega a 700 a 800% em Liberdade (Esson e Santos, 1978a), no Vermelho (Bernardelli et al., 1983) e em Barro Alto (Trescases e Oliveira, 1981). Os níveis de saprolito silicatado encontram-se diretamente sob o silcrete, ou sob um horizonte de saprolito ferruginoso e laterita vermelha. Quando abaixo do silcrete, não há fonte na paisagem para o suprimento de níquel, e, quando abaixo do saprolito ferruginoso e da laterita vermelha, as perdas de níquel apresentadas por esses horizontes não são suficientes para prover todo o excesso encontrado nos níveis silicatados. Assim, também o comportamento do níquel só poderá ser explicado, considerando a existência pretérita de perfis situados acima do silcrete.

Golightly (1981) sugeriu a hipótese da existência de antigos perfis de alteração, hoje erodidos, como fonte para a sílica do silcrete e para os excessos de níquel encontrados nos perfis atuais, no caso de muitos perfis brasileiros, e com relação ao depósito australiano do distrito de Rockhampton, em Queensland.

Os produtos de alteração dos piroxenitos enriquecidos em níquel, como em Niquelândia, apresentam valores de até 6000 % de enriquecimento absoluto nesse elemento (Colin et al., 1989). As cristas duníticas

situadas a montante constituem a fonte provável do níquel, através de migração lateral.

3. Evolução geral dos depósitos de níquel laterítico, a partir do Terciário (Melfi et al., 1980)

A história das coberturas de alteração intempérica no Brasil começou a partir do Terciário Inferior, com o ciclo Sul-americano, durante um período de estabilidade tectônica, quando o relevo já estava bem aplainado. Nessa época, dois diferentes tipos de processos atuaram sobre os maciços ultramáficos :

- silicificação intensa na base dos perfis de alteração sobre dunito, durante episódios de clima mais árido;
- laterização dos perfis, com concentração de níquel, sob condições mais úmidas, semelhantes às atuais.

A intensa silicificação na base dos perfis sobre dunito deu-se ao longo das discontinuidades da rocha: sua textura original foi completamente pseudomorfisada por um *boxwork* de sílica. Fragmentos rochosos menos silicificados ocuparam os núcleos desse reticulado silicoso. Com o advento de um período de laterização, esses núcleos não resistiram, transformando-se em material saprolítico.

No caso da alteração dos piroxenitos, não houve concentração de sílica na base do perfil porque na presença de alumínio, a tendência da sílica foi de formar caulinita.

Com o levantamento generalizado do continente, no Terciário Superior, houve retomada da erosão (ciclo Velhas). Os perfis relacionados à Superfície Sul-americana foram sendo erodidos até as zonas silicificadas dos maciços ultramáficos. Assim, esses maciços foram protegidos do nivelamento geral, de modo

que até hoje emergem da Superfície Velhas os relevos duníticos sustentados por silcrete. Parte desses antigos perfis foram transferidos para níveis topográficos inferiores, e podem ser encontrados fazendo parte da laterita vermelha que cobre os perfis das baixadas. Isso poderia explicar o conteúdo maior em níquel que essa laterita pode apresentar (em torno de 1%), em comparação com materiais semelhantes de outros depósitos do mundo, onde esse teor fica bem abaixo de 1%, como em Nova Caledônia (Trescases, 1975) e em Cuba (Vletter, 1955). Esse material, derivado parcialmente de um ciclo prévio, foi também fonte para as acumulações absolutas de níquel encontradas nos níveis de saprolito silicatado.

A partir da fase de agradação da Superfície Velhas, até hoje, a laterização vem atuando nas baixadas, aprofundando cada vez mais os perfis, como em Santa Fé e Barro Alto, sendo, até certo ponto, contrariada pelo novo ciclo erosivo que vem entalhando as planícies. A laterização também atua, com mais dificuldade, sob a camada de silcrete, podendo levar a perfis espessos, como no Vermelho e em Morro do Níquel.

A laterização ocorre juntamente com uma migração lateral do níquel, das zonas altas para as baixadas. Essa migração é mais completa onde a Superfície Sul-americana está mais erodida, como acontece em Santa Fé, e quase ausente quando a Superfície Sul-americana é bem preservada (Morro do Níquel, por exemplo). Em São João do Piauí, uma certa quantidade de níquel foi concentrada nas lateritas que se sobrepunham ao silcrete, durante o ciclo Sul-americano. Essa quantidade foi redistribuída pelos perfis mais jovens, tanto por migração vertical através do silcrete, como por migração lateral, em direção aos sopés e às baixadas. Se não fosse essa concentração prévia do Terciário Inferior, a evolução atual, sob clima semi-árido não teria formado um depósito de níquel, pois a conservação da sílica que se observa hoje teria impedido que a concentração relativa do níquel atingisse níveis mais elevados.

V

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação dos depósitos de níquel laterítico do Brasil, desenvolvidos a partir de vários tipos de rochas ultramáficas, em diferentes condições climáticas, permitiu definir as principais características das lateritas níquelíferas brasileiras, bem como possibilitou a avaliação do papel dos fatores morfoclimáticos e petrográficos em sua gênese.

1. Papel do fator litológico

O processo de alteração das rochas ultramáficas e a consequente gênese do minério laterítico de níquel são controlados pela mineralogia da rocha parental e por seu grau de fraturamento.

A natureza das fases hipógenas é importante por duas razões principais: conteúdo original em níquel e resistência ao processo intempérico. O conteúdo em níquel dos minerais de rochas ultramáficas varia de 3000 a 4000ppm para

as olivinas, 500 a 1000ppm para os ortopiroxênios, 150 a 600ppm para os clinopiroxênios e 2500 a 3500ppm para as serpentinas. Assim, são os dunito e peridotitos, serpentinizados ou não, as rochas mais favoráveis para gerar depósitos de níquel; os piroxenitos são rochas desfavoráveis. Entretanto, em Niquelândia, o horizonte esmectítico desenvolvido sobre piroxenito apresenta altos valores de níquel. Este horizonte comporta-se como uma armadilha para o níquel que provém, por migração lateral, dos dunitos a montante. No Vermelho, a descrição feita por Correa et al. (1984) de níveis esmectíticos ricos em níquel no domínio dunítico corresponde certamente à alteração de níveis piroxeníticos que cortavam os dunitos e que receberam níquel dos níveis sobrejacentes.

A diferença de suscetibilidade à alteração intempérica por parte dos piroxênios comparados com a olivina, e por parte da serpentina comparada com a olivina e o piroxênio é responsável pela sucessão dos diferentes horizontes saprolíticos na base dos perfis. Esses horizontes constituem o minério silicatado, cujo conteúdo em níquel deriva da alteração *in situ* da olivina e das transformações silicatos-goethita e goethita-hematita que ocorrem nas partes mais altas dos perfis. Se a mineralogia original da ultramáfica for muito simples, como nos serpentinitos, as várias etapas da evolução supérgena podem se superpor, reduzindo a espessura do minério silicatado.

A alteração intempérica ocorre quando soluções percolam os minerais através de fraturas ou fissuras. Portanto, o intemperismo atua mais rapidamente nas zonas mais tectonizadas e, conseqüentemente, mais fraturadas. A circulação das soluções sendo mais fácil, o níquel migrará para baixo, e enriquecerá os minerais ainda não alterados, como as serpentinas, ou as fases secundárias neoformadas, como as garnieritas e as esmectitas. Nesse aspecto, também, a rocha totalmente serpentinizada é menos favorável à acumulação do níquel, pois é mais maciça e impermeável que a rocha parcialmente serpentinizada.

A atividade tectônica, além de causar fraturamento, é importante também na medida em que pode provocar o rejuvenescimento do relevo, permitindo o aprofundamento dos perfis de alteração e a migração lateral do níquel, a partir de relevos residuais, para as novas superfícies de erosão, como acontece, por exemplo, em Santa Fé.

O tamanho do maciço ultramáfico é outro fator que influi na extensão da zona mineralizada. Se for muito pequeno, o níquel, por migração lateral, acaba sendo removido para os ambientes estéreis que o circundam, onde será diluído. No caso de maciços de maior porte, o níquel permanece em ambiente ultramáfico, onde existem armadilhas adequadas para retê-lo (Barro Alto, por exemplo).

Acumulações absolutas de níquel na base dos perfis de alteração foram observadas em todos os depósitos brasileiros, e são maiores em maciços parcialmente serpentinizados, como Liberdade e Barro Alto.

2. Papel do fator climático

Como já foi observado, a elaboração dos perfis lateríticos enriquecidos em níquel no Brasil não se deu apenas sob as condições climáticas atuais. Mas essas condições marcaram sua fase final de evolução, imprimindo-lhes feições características.

Em regiões de clima tropical de estações contrastadas, o perfil da alteração apresenta um horizonte de saprolito silicatado e um horizonte de saprolito oxidado subordinado, como na Região Central do Brasil. Sob condições climáticas mais agressivas, a importância relativa dos horizontes silicatados se torna

menor, sendo os horizontes oxidados mais bem desenvolvidos (depósitos da Região Amazônica). O contrário ocorre sob clima mais seco, como em São João do Piauí, onde a alteração não evoluiu para além do estágio esmectítico. Se não fosse a herança do níquel acumulado em outras condições climáticas, não haveria depósito de níquel. É certamente por motivos climáticos que há tão poucas acumulações de níquel laterítico no Nordeste brasileiro.

No Sul do Brasil, condições climáticas sub-tropicais a temperadas não levaram à elaboração de nenhum depósito de níquel.

3. Papel do fator topográfico

No Brasil, na grande maioria dos casos, a presença de rochas ultramáficas se traduz por uma modificação local no relevo. A maior parte dos maciços correspondem, segundo seu tamanho, a uma única colina de topo tabular (Morro do Níquel), a platôs pouco dissecados (Jacupiranga), ou a verdadeiras serras (Niquelândia). Quando o relevo é pouco dissecado, as zonas de maior concentração de níquel situam-se nos topos e nas encostas (Vermelho, Morro do Níquel). No caso de a dissecção do relevo ser mais intensa, formando baixadas no domínio ultramáfico, será aí que se encontrarão as melhores zonas mineralizadas (Santa Fé, Barro Alto).

4. Resumo das principais características das lateritas níquelíferas brasileiras

Os depósitos de níquel laterítico do Brasil podem ser correlacionados a dois ciclos de erosão terciários, e, por esse motivo, podem ser encontrados tanto em situação de topo, como em situação de baixada. O grau de desmantelamento da superfície mais alta e, portanto, mais velha, controla a situação preferencial das atuais acumulações de níquel.

Os perfis de alteração dos depósitos de níquel laterítico do Brasil são similares aos descritos em outras partes do mundo, no que concerne à sucessão dos horizontes. Mas há algumas diferenças importantes. Os horizontes silicatados são sempre mais espessos que os horizontes oxidados, como consequência de um grau de laterização menos intenso, se comparado com a Nova Caledônia, Cuba ou com as Filipinas. Assim, no Brasil, o minério silicatado prevalece sobre o oxidado. No minério silicatado, o níquel pode estar associado à sílica e ao magnésio na garnierita, às fases amorfas sílico-ferruginosas, às esmectitas, e pode ocupar os sítios octaédricos dos cristais de serpentina. Embora as garnieritas sejam os materiais mais ricos em níquel, sua quantidade é restrita, de modo que não são importantes como minério. O principal mineral de minério é a serpentina enriquecida em níquel, como na maioria dos depósitos do mundo. Em alguns depósitos brasileiros, as esmectitas também têm um papel importante como minerais de minério (Niquelândia).

O minério oxidado corresponde aos níveis de saprolito ferruginoso e, nas baixadas, à parte basal da laterita vermelha. Nele, o níquel está associado à goethita, de maneira não muito bem compreendida.

Finalmente, a espessa camada silicificada nas partes altas da paisagem, testemunha de uma evolução bifásica, parece ser uma feição

característica dos depósitos brasileiros. Feições semelhantes, embora atenuadas, foram descritas na África do Sul (Waal, 1971) e na Austrália (Zeissink, 1969 ; Elias et al., 1981), mais ou menos às mesmas latitudes que no Brasil.

VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, F.F.M. de - 1978 - Observações sobre o Pré-cambriano da região central de Goiás. Bol. Paran. Geoc., v.26, p.19-22.

Alves, C.A., Bernardelli, A.L. e Beisiegel, V. de R. - 1986 - A jazida de níquel laterítico do Vermelho, Serra do Carajás, PA. In "Principais Depósitos Minerais do Brasil", D.N.P.M.-C.V.R.D., v.II, p.325-334.

Ammou-Chokroum, M. - 1969 - Contribution à l'étude de la distribution du nickel et des ferralites de Nouvelle-Calédonie. C.R.Ac.Sc.Paris, D, v.268, p.1563-1566.

Ammou-Chokroum, M. - 1972 - Contribution à la valorisation des ferralites nickelifères de Nouvelle-Calédonie. Distribution minéralogique des éléments et étude de leur comportement au cours de la réduction solide-gaz des matériaux. Tese Dr. Un. Nancy I, 170p.

Angeiras, A. G. - 1968 - A faixa de serpentinitos da região central de Goiás. An. Ac. Bras. Cienc., Supl., v.40, p.129-136.

Angeli, N. - 1989 - Pesquisa dos jazimentos de níquel e geologia da Folha Ipanema-MG. Tese Dout., IGUSP, 290p.

Angeli, N. e Choudhuri, A. - 1985 - Ultramafic complexes and associated mineral deposits in the Precambrian of Eastern Minas Gerais, Brazil. *Min. Dep.*, v.20, p.309-313.

Angeli, N., Oliveira, S.M.B. de , Choudhuri, A. e Rueda, J.R.J. - 1984 - Avaliação preliminar dos produtos de alteração das rochas ultramáficas de Ipanema - MG. *In Congr. Bras. Geol.*, 33, Rio de Janeiro, Anais..., v.6, p.4229-4240.

Anuário Mineral Brasileiro - 1988 - M.M.E., D.N.P.M., Brasília, 351p.

Araújo, V.A. de, Mello, J.C.R. de e Oguino, K. - 1972 - Projeto Niquelândia. Relatório final, D.N.P.M./C.P.R.M., Goiânia, 224p.

Avias, J. - 1978 - L'évolution des idées et des connaissances sur la genèse et sur la nature de minerais de nickel, en particulier latéritiques, de leur découverte à nos jours. *Bull. B.R.G.M.*, II, vol.3, p.165-162.

Baeta Jr., J.D.A. - 1986 -As jazidas de níquel laterítico de Barro Alto, GO. *In "Principais Depósitos Minerais do Brasil"*, D.N.P.M.-C.V.R.D., v.II, p.315-323.

Baeta Jr., J.D.A., Figueiredo, A.N. de, Souza, E.P. de e Mello, J.C.R. de - 1972 - Projeto Goianésia - Barro Alto, Relatório final, D.N.P.M./C.P.R.M., Goiânia, 129p.

Barbour, A. - 1978 - Maciço ultramáfico Ni-laterítico de Santa Fé, Goiás, Brasil. *In* Congr. Geol. Argentino, 7, Neuquém, Actas..., v.I, p.119-131.

Barbour, A.P. e Hypólito, R. - 1983 - Geological aspects of lateritisation and superficial geology of a mafic-ultramafic alkaline complex in Central Brazil. *In* Int. Sem. Lat. Proc., 2, São Paulo, Proc..., p.137-146.

Berbert, C.O. - 1970 - Geologia dos complexos básico-ultrabásicos de Goiás. *In* Congr. Bras. Geol., 24, Brasília, Anais..., p.41-50.

Berbert, C.O. - 1973 - Rochas alcalinas no centro-oeste brasileiro. *In* Congr. Bras. Geol., 27, Aracaju, Anais..., v.1, p.469-473.

Berbert, C.O. - 1977 - Rochas básico-ultrabásicas no Brasil e suas potencialidades econômicas. II Sem. Est. Geol. Paraná, CEGEP-UF-Paraná, p.1-51.

Berbert, C.O. - 1986 - O depósito de níquel laterítico de Morro do Engenho, GO. *In* "Principais Depósitos Minerais do Brasil", D.N.P.M.-C.V.R.D., v.II, p.335-340.

Bernardelli, A.L., Melfi, A.J., Oliveira, S.M.B. de e Trescases, J.J. - 1983 - The Carajás nickel deposit. *In* Int. Sem Lat. Proc., 2, São Paulo, Proc..., p.107-118.

Besset, F. e Coudray, J. - 1978 - Le comportement du nickel dans le processus d'altération des peridotites de Nouvelle-Calédonie. Bull. B.R.G.M., II, v.3, p.207-223.

Bibent, B. - 1972 - Sur l'altération expérimentale par l'eau pure de deux roches ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Conséquences pour la formation des complexes latéritiques. C.R.Ac.Sc.Paris, D, v.274, p.1609-1612.

Bibent, B. e Bourgeois, A. - 1973 - Résultats préliminaires d'une série d'expériences d'extraction du fer, du magnésium et du nickel de roches et minéraux nickelifères; leurs relations avec les caractéristiques minéralogiques des échantillons. C.R.Ac.Sc.Paris, D, v.276, p.1929-1932.

Bish, O.L. e Brindley, G.W. - 1978 - Deweylites, mixtures of poorly crystalline hydrous serpentine and talc-like minerals. Min. Mag., v.42, p.75-79.

Blot, A., Carn, N., Leprun, J.C. e Pion, J.C. - 1976 - Premier bilan des études géologiques et pédologiques d'un corps ultrabasique et de son contexte : Koussane, Sénégal Oriental. Cah. ORSTOM, sér. Géol., v.8, p.113-145.

Bonifas, M. - 1959 - Contribution à l'étude géochimique de l'alteration latéritique. Mem. Serv.Géol. Als.-Lorr., v.17, 159p.

Bosio, N.J., Hurst, V.J. e Smith, R.L. - 1975 - Nickeliferous nontronite, a 15Å garnierite, at Niquelândia, Goiás, Brazil. Clays and Clay Min., v.23, p.400-403.

Braun, O.P.G. - 1971 - Contribuição à geomorfologia do Brasil Central. Rev. Bras. Geogr., no 3, p.3-39.

Brindley, G.W. e Hang, P.T. - 1973 - The nature of garnierites I. Clay Min., v.21, p.17-40.

Brindley, G.W. e Maksimovic, Z. - 1974 - The nature and nomenclature of hydrous nickel-containing silicates. *Clay Min.*, v.10, p.271-277.

Brindley, G.W. e Souza, J.V. de - 1975a - A golden-colored, ferri-nickel chloritic mineral from Morro do Níquel, Minas Gerais, Brazil. *Clays and Clay Min.*, v.23, p.11-15.

Brindley, G.W. e Souza, J.V. de - 1975b - Nickel-containing montmorillonites and chlorites from Brazil, with remarks on schuchardite. *Min. Mag.*, v.40, p.141-152.

Brindley, G.W. - 1978 - The structure and chemistry of hydrous nickel-containing silicate and aluminate minerals. *Bull. B.R.G.M., Sect. II*, nº 3, p.233-245.

Brindley, G.W., Bish, D.L. e Wan, H.M. - 1979 - Compositions, structures, and properties of nickel-containing minerals in the kerolite-pimelite series. *Am. Min.*, v.64, p.615-625.

Castro Filho, L.W. de e Mattos, S.C. - 1986 - Depósitos de níquel laterítico de Jacaré e Jacarezinho de São Félix do Xingu, PA. *In "Principais Depósitos Minerais do Brasil, D.N.P.M.-C.V.R.D., v.II*, p.369-384.

Cervelle, B.D. e Maquet, M. - 1982 - Cristallochimie des lizardites substituées Mg-Fe-Ni par spectrométrie visible et infrarouge proche. *Clay Min.*, v.17, p.377-392.

Chaban, N. e Santos, J.F. dos - 1973 - Intrusiva do Morro do Engenho (Goiás): considerações sobre geologia e pesquisa. *In Congr. Bras. Geol., 27, Aracaju, Bol. Resumos....*, p.57-58.

Chetelât, E. de - 1947 - Genèse et évolution des gîtes de nickel de Nouvelle-Calédonie. Bull. Soc. Géol. France, v.5, nº17, p.105-160.

Chukhrov, F.V., Gorshov, A.I., Sivtsov, A.V. e Baresovskaya, V.V. - 1982 - On the manganese mineralogy in the lateritic weathering crusts of ultrabasic rocks. *In* Int. Sem. Lat. Proc., 2, São Paulo, Proc..., p.147-158.

Colin, F. - 1985 - Etude pétrologique des altérations de pyroxénite du gisement nickelifère de Niquelândia (Brésil). TDM ORSTOM F17, ISBN 2-7099-0769-0, 137p.

Colin, F., Noack, Y., Trescases, J.J. e Nahon, D. - 1985 - L'altération latéritique débutante des pyroxénites de Jacuba, Niquelândia, Brésil. Clay Min., v.20, p.93-113.

Colin, F., Trescases, J.J., Nahon, D. e Melfi, A.J. - 1989 - Lateritic weathering of pyroxenites from Niquelândia, Goiás, Brazil : nickel cycle through supergene products. Min Dep. (*in press*).

Combes, P.J. - 1963 - À propos du nickel dans les latérites nickelifères de Nouvelle-Calédonie. C.R.Ac.Sc.Paris, D, v.256, p.211-212.

Cordeiro, A.A.C. e McCandless, G. - 1976 - Maciço ultramáfico de Quatipuru. *In* Congr. Bras. Geol., 29, Ouro Preto, Anais..., v.3, p.3-15.

Correa, S.L.A., Oliveira, N.P. de e Schwab, R.G. - 1984 - Alguns aspectos mineralógicos e geoquímicos da laterita niquelífera do Vermelho, Serra dos Carajás, e suas implicações genéticas. *In* Congr. Bras. Geol., 33, Rio de Janeiro, Anais..., v.10, p.4838-4849.

Costa, J.L.G. - 1970 - Nickel deposits of the São João do Tocantins massif. Notes on economic geology and on exploration by C.N.T.. *In* Congr. Bras. Geol., 24, Brasília, Bol. Resumos..., p.142-143.

Couty, R. e Perruchot, A. - 1980 - Étude par spectroscopie infrarouge de quelques gels silico-magnésiens. *C.R.Ac.Sc.Paris., D*, v.290, p.551-553.

Coy-Yll, R. e Guilloux, L. - 1972 - Géochimie des éléments de transition lors de processus d'altération de l'olivine. *In* Int.Geol.Congr., 24, Montréal, Proc..., v.10, p.112-120.

Cruz, F.F. da, Brenner, T.L., Moreira, A.F. de S., Cunha, C.A.B.R. da, Gallo, C.B.M., Franke, N.D. e Pimentel, R.C. - 1986 - Jazida de Ni-Cu-Co de Fortaleza de Minas, MG. *In* "Principais Depósitos Minerais do Brasil", D.N.P.M.-C.V.R.D., v.II, p.275-306.

Danni, J.C.M. e Teixeira, N.A. - 1981 - Características e sistematização das associações de rochas máficas e ultramáficas pré-cambrianas de Estado de Goiás. *In* Simp. Geol. Centro-Oeste, 1, Goiânia, Ata..., p.376-401.

Danni, J.C.M., Fuck, R.A. e Leonardos, O.H. - 1982 - Archean and Lower Proterozoic units in Central Brazil. *Geol. Rund.*, v.71, n°1, p.1-23.

Decarreau, A., Colin, F., Herbillon, A., Manceau, A., Nahon, D., Paquet, H., Trauth-Badaud, D. e Trescases, J.J. - 1987 - Domain segregation in Ni-Fe-Mg smectites. *Clays and Clay Min.*, v.35, n°1, p.1-10.

Delmas, A.B. - 1972 - Sur les rôles respectifs de la température et du débit au cours de l'altération expérimentale de l'olivine par lessivage à l'eau. C.R.Ac.Sc.Paris, D, v.274, p.2413-2415.

DeYoung Jr., J.H., Sutphin, D.M., Werner, A.B.T. e Foose, M.P. - 1985 - International Strategic Minerals Inventory. Summary Report-Nickel. U.S.G.S. Circ. 930-D, 62p.

Dino, R. - 1984 - Gênese do minério de níquel de São João do Piauí por alteração intempérica. Diss. Mestrado, IGUSP, 142p.

Elias, M., Ronaldson, M.J. e Giorgetta, N. - 1981 - Geology, mineralogy and chemistry of lateritic Ni-Co deposits near Kalgoorlie, Western Australia. Ec. Geol., v.76, p.1675-1683.

Esson, J. e Santos, L.C.S. dos - 1978a - Chemistry and mineralogy of a section through lateritic nickel deposit at Liberdade, Brazil. Inst. Min. Met., Sect. B, p.53-60.

Esson, J. e Santos, L.C.S. dos - 1978b - The occurrence, mineralogy, and chemistry of some garnierites from Brazil. Bull. B.R.G.M., Sect. II, nº 3, p.263-274.

Farina, M. - 1969 - Ultrabásitos níquelíferos de Catingueira, Paraíba. Considerações sobre a geoquímica e a geologia econômica. SUDENE, Depto. Rec. Nat., Secr. Geol. Ec., nº 7, 53p.

Felícissimo Jr., J. - 1968 - Distritos ultrabásicos-alcálicos da bacia tectônica do Baixo Ribeira e seus aspectos econômicos, SP. Bol. SICEG, Ouro Preto, v.6, p.90-134.

Ferran, A. de - 1974 - Panorama do níquel no Brasil. Geol. e Met., IV Simp. Min., nº 35, p.103-124.

Figueiredo, A.N. de - 1978 - Geologia e mineralização do extremo norte do complexo de Barro alto, GO. Diss. Mestrado, Depto Geociências, UnB, 104p.

Figueiredo, A.N. de, Motta, J. e Marques, V.J. - 1975 - Estudo comparativo entre os complexos de Barro Alto e do Tocantins, Goiás. Rev. Bras. Geoc., v.5, nº 1, p.15-29.

Fonseca, M.J.G., Silva, Z.C.G. da, Campos, D.de A. e Tosatto, P. - 1979 - Folhas Rio de Janeiro, Vitória e Iguape. In "Carta Geológica do Brasil ao Millionésimo", coord. Schobbenhaus Filho, C., D.N.P.M., 174p.

Fuck, R.A., Danni,J.C.M., Winge, M., Andrade, G,F., Barreira, C.F., Leonardos, O.H. e Kuyumjian,R.M. - 1981 - Geologia da região de Goianésia. In Simp. Geol. Centro-Oeste, 1, Goiânia, Ata..., p.447-467.

Fugl, M.Y. - 1989 - REE geochemistry and Sm-Nd geochronology of the Cana Brava complex, Brazil. Diss, Mestrado Un. Koke, Japão.

Gérard, P. e Herbillon, A.J. -1983 -Infrared studies of Ni-bearing clay minerals of the kerolite-pimelite series. Clays and Clay Min., v.31, nº2, p.143-151.

Girardi, V.A.V., Rivalenti, G. e Sinigoi, S. - 1986 - The petrogenesis of the Niquelândia layered basic-ultrabasic complex, Central Goiás, Brazil. J. Petrol., v.27, nº3, p.715-744.

Girardi, V.A.V., Rivalenti, G., Siena, F, e Sinigoi, S. - 1981 - Precambrian Barro Alto Complex of Goiás, Brazil : bulk geochemistry and phase equilibria. N. Jb. Miner. Abh., v.142, nº3, p.270-291.

Golightly, J. P. - 1981 - Nickeliferous laterite deposits. Ec Geol., 75th An. vol., p.710-735.

Goni, J. e Guillemín, C. - 1964 - Sur la localisation des éléments en trace dans les minéraux et les roches. Bull. Soc.Franç. Min. Crist. Paris, v.87, nº2, p.149-156.

Gouvea, C.A.T. e Gouvea, J.G.B. - 1980 - Prospecção geoquímica do corpo serpentínico do morro "Sem Boné", Vila Bela, Mato-Grosso. In Congr. Bras. Geol., 31, Camboriú, Anais..., v.3, p.1525-1539.

Griffon, J.C. e Richter, H. - 1976 - Geologia, mineração e tratamento de minério de níquel do Morro do Níquel, MG.IV Simp. Bras. Miner., p.386-398.

Hang, P.T. e Brindley, G.W. - 1973 - The nature of garnierites III. Clays and Clay Min., v.21, p.51-57.

Heim, S.L. e Castro Filho, L.W. de - 1986 - Jazida de níquel laterítico de Puma-Onça, município de São Félix do Xingu, PA. In "Principais Depósitos Minerais do Brasil", D.N.P.M.-C.V.R.D., v.II, p.347-368.

Jurkovic, I. - 1963 - Some geochemical aspects about the genesis of the nickel deposit Loma de Hierro (Venezuela). Geolos. Vjenisk. Zagreb, v.17, p.103-112.

Justo, L.J.E.C. - 1973 - Maciço ultramáfico de Água Branca, Goiás : um corpo tabular. *In Congr. Bras. Geol.*, 27, Aracaju, Bol. Resumos..., p.56-57.

King, L.C. - 1956 - A geomorfologia do Brasil Oriental. *Rev. Bras. Geogr.*, nº2, p.147-265.

Krauskopf, K.B. - 1979 - Introduction to Geochemistry. McGraw Hill Kogabusha, Ltda., Tokyo, 2ª edição, 617p.

Kuhnel, R.A., Roorda, H.J. e Steensma, J.J. - 1978 - Distribution and partitioning of elements in nickeliferous laterites. *Bull. B.R.G.M.*, II, v.3, p.191-206.

Lacroix, A. - 1942 - Les péridotites de la Nouvelle-Calédonie, leurs serpentines et leurs gites de nickel et de cobalt. Les gabbros qui les accompagnent. *Mém.Ac.Sc.Paris*, v.66, p.1-143.

Lages, S.M., Andrade, M.R. de e Oliva, L.A. - 1976 - Economia mineral do níquel. Rel. D.N.P.M. para o XXIX Congr. Bras. Geol., Belo Horizonte, 32p.

Langer, E. - 1969 - Die Nickelelagertatten des Morro do Níquel in Minas Gerais , Brasilien. Ihr Aufschluss, ihre Bemusterung und Bewertung. Clausthaler Hefte zur Lagerstättenkunde und Geochemie des Mines : Rohstoffe Heft 8, Gebruder Barntraeger-Berlin-Stuttgart, 64p.

Lelong, F., Tardy, Y., Grandin, G., Trescases, J.J. e Boulangé, B. - 1976 - Pedogenesis, chemical weathering, and processes of formation of some supergene ore deposits. *In* Handbook of stratabound and stratiform ore deposits. Ed. K.H.Wolf, Elsevier-Amsterdam, v.3, p.93-173.

Lindenmayer, D.H. e Lindenmayer, Z.G. - 1971 - Intrusões ultrabásicas alcalinas e suas mineralizações a níquel. *In* Congr. Bras. Geol., 25, São Paulo, Bol. Resumos..., p.35.

Maksimovic, Z. - 1966 - B-kerolite-pimelite series from Goles Mountain, Yougoslavia. *In* Int Clay Conf, Jerusalem, Proc..., p.97-105.

Maksimovic, Z. - 1972 - Nimesite. A new septochlorite from a bauxite deposit near Megara (Greece). Bull. Sc. Yougosl. A., p.224-226.

Maksimovic, Z. - 1975 - The isomorfous series lizardite-nepouite. Int. Geol. Review, v.17, nº9, p.1035-1040.

Manceau, A. - 1984 - Localisation du nickel dans les phylossilicates. Applications aux minerais de nickel de Nouvelle-Calédonie. Tese Dout., Un. Paris VII, 99p.

Manceau, A. e Calas, G. - 1983 - Cristallography of secondary nickeliferous minerals resulting from the alteration of new-caledonian peridotites. Sci. Geol. Mém., v.73, p.153-159.

Manceau, A., Llorca, S. e Calas, G. - 1987 - Cristal chemistry of Co and Ni in lithiophorite and asbolane from New Caledonia. *Geoch. Cosmoch. Acta*, v.51, p.105-113.

Maquet, M., Cerville, B.D. e Gouet, G. - 1981 - Signatures of Ni^{2+} and Fe^{3+} in the optical spectra of limonitic ore from New Caledonia : application to the determination of the nickel content. *Min. Dep.*, v.16, p.357-373.

Marini, O.J., Fuck, R.A., Dardenne, M.A. e Danni, J.C.M. - 1984 - Província Tocantins - Setores Central e Sudeste. *In O Pré-cambriano do Brasil*, Coord. Almeida, F.F.M. de e Hasui, Y. Edgard Blucher, São Paulo, p.205-264.

Melfi, A.J. - 1974 - Características geoquímicas e mineralógicas dos estádios iniciais de alteração superficial das rochas ultrabásicas de Barro Alto (GO). *Bol. IGUSP*, v.5, p.117-128.

Melfi, A.J., Trescases, J.J. e Oliveira, S.M.B. de - 1980 - Les latérites nickelifères du Brésil. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, v.XI, n°1, p.15-42.

Melfi, A.J., Trescases, J.J., Carvalho, A., Oliveira, S.M.B. de, Ribeiro Filho, E. e Formoso, M.L. - 1988 - The lateritic ore deposits of Brazil. *Sci. Géol. Bull.*, v.41, p.5-36.

Menegotto, E. - 1983 - Intemperização de rochas ultrabásicas no Rio Grande do Sul. *Rev. Bras. Geoc.*, v.13, n°3, p.178-189.

Mercado, J.M. - 1981 - Geochemistry of the laterites in Nonoc Islands, Surigao Province, Phillipines. *In Int Sem. Lat. Proc.*, 1, Trivandrum, Proc..., p.45-57.

Millot, G. e Bonifas, M. - 1955 - Transformation isovolumétrique dans les phénomènes de latérisation et de bauxitisation. *Bull. Serv. Géol. Als.-Lorr.*, v.8, nº1, p.3-20.

Nahon, D., Paquet, H. e Delvigne, J. - 1982 - Lateritic weathering of ultramafic rocks and the concentration of nickel in the western Ivory Coast. *Ec. Geol.*, v.77, p.1159-1175.

Nilson, A.A. - 1984 - O atual estágio de conhecimento dos complexos máfico-ultramáficos pré-cambrianos do Brasil. Uma avaliação preliminar. *In Congr. Bras. Geol.*, 33, Rio de Janeiro, Anais..., vol.9, p.4166-4203.

Nilson, A.A., Santos, M.M dos, Cuba, E.A. e Sá, C.M.G. de - 1986 - Jazida de níquel, cobre e cobalto de Americano do Brasil, GO. *In "Principais Depósitos Minerais de Brasil"*, D.N.P.M.-C/V.R.D., v.II, p.257-273.

Ogura, Y. - 1977 - Mineralogical studies on the occurrence of nickeliferous laterite deposits in the Southwestern Pacific Area. *Min. Geol.*, v.27, p.379-399.

Oliveira, S.M.B. de e Melfi, A.J. - 1979 - Considerações sobre a origem das esmectitas nos níveis de alteração dos piroxenitos de Santa Fé, Goiás. *Bol. IGUSP*, v.10, p.91-96.

Oliveira, S.M.B. de - 1980a - Transformações mineralógicas relacionadas à meteorização de dunitos serpentinizados. *In Congr. Bras. Geol.*, 31, Camboriú, Anais..., v.4, p.2182-2192.

Oliveira, S.M.B. de - 1980b - Alteração intempérica das rochas ultrabásicas de Santa Fé (GO) e gênese do depósito niquelífero. Tese Dout., IGUSP, 216p.

Oliveira, S.M.B. de e Trescases, J.J. - 1980 - Geoquímica da alteração supérgena das rochas ultramáficas de Santa Fé (Goiás-Brasil). *Rev. Bras. Geoc.*, v.10, nº4, p.243-257.

Oliveira, S.M.B. de e Trescases, J.J. - 1982 - Estudo mineralógico e geoquímico da laterita niquelífera de Niquelândia-GO. *In Congr. Bras. Geol.*, 32, Salvador, Anais..., v.3, p.1183-1190.

Oliveira, S.M.B. de e Trescases, J.J. - 1985 - O depósito de níquel de Jacupiranga (SP) : evolução mineralógica e geoquímica. *Rev. Bras. Geoc.*, v.15, nº3, p.249-254.

Oliveira, S.M.B. de e Delvigne, J. - 1988 - Evolução mineralógica dos jacupirangitos de Jacupiranga (SP) durante a alteração intempérica. *Rev. Bras. Geoc.*, v.18, nº1, p.79-85.

Oliveira, S.M.B. de, Melfi, A.J., Carvalho, A., Friedrich, G., Marker, A. e Kanig, M. - 1988 - Lateritic evolution of the Jacupiranga alkaline complex, SP. *Geoch. Bras.*, v.2, nº2, p.119-126.

Paquet, H., Duplay, J. Nahon, D., Tardy, Y. e Millot, G. - 1983 - Analyses chimiques de particules isolées dans les populations de minéraux argileux. *C.R.Ac.Sc. Paris*, v.296, sér.III, p.699-704.

Pecora, W.T. - 1944 - Nickel silicate and associated nickel-cobalt-manganese oxide deposits near São José dos Tocantins, Goiás, Brazil. *U.S.G.S. Bull.*, 935 E, p.247-305.

Pedro, G. e Bittar, K.E. - 1966 - Contribution à l'étude de la genèse des sols hypermagnésiens : recherches expérimentales sur l'altération chimique des roches ultrabasiques (serpentinites). Ann. Agr. v.17, n°6, p.611-651.

Pedro, G. e Delmas, A.B. - 1971 - Sur l'altération expérimentale de l'olivine par lessivage à l'eau et la mise en évidence de trois grands domaines d'évolution géochimique. C.R.Ac.Sc.Paris, D, v.273, p.1543-1546.

Pedro, G. e Volkoff, B. - 1984 - Grandes provinces pédologiques du Brésil. Cah. ORSTOM, sér. Géol., v.XIV, n°2, p.171-172.

Pedroso, A.C. e Schmalz, W.H. - 1986 - Jazimentos de níquel laterítico de Niquelândia, Goiás. In " Os Principais Depósitos Minerais do Brasil", D.N.P.M. - C.V.R.D., v.II, p.307-323.

Pelletier, B. - 1983 - Localisation du nickel dans les minerais "garnieritiques" de Nouvelle-Calédonie. Sci. Géol. Mém., v.73, p.173-183.

Percival, F.G. - 1965 - The lateritic iron deposits of Conakry. Trans.Inst.Min.Metall., v.74, n°8, p.429-462.

Perruchot, A. - 1976a - Contribution à l'étude de la formation de gites silicatés de nickel. Bull. Soc. Franç. Min. Crist., v.99, p.225-233.

Perruchot, A. - 1976b - Contribution à l'étude d'échange d'ions dans les gels silicatés. Bull. Soc. Franç. Min. Crist., v.99, p.234-242.

Poncelet, G., Jacobs, P., Delannay, F., Genet, M., Gérard, P. e Herbillon, A. - 1979 - Etude préliminaire sur la localisation du nickel dans une garnierite naturelle. Bull. Min., v.102, p.379-385.

Rivalenti, G., Girardi, V.A.V., Sinigoi, S., Rossi, A. e Slena, F. - 1982 - The Niquelândia mafic-ultramafic complex of Central Goiás : petrological considerations. *In* Int Symp. Arch. Early Prot. Geol. Evol. Metal., ISAP, Salvador, Anais..., Rev.Bras. Geoc., v.123, nº1-3, p.380-391.

Romaris, D.A. - 1974 - Aspectos da vegetação do Brasil. I.B.G.E., Rio de Janeiro, 60p.

Sá, O.B. - 1980 - A geoquímica da camada laterítica da Serra de Quatipuru. Diss. Mestrado, Un. Fed. Pará, 64p.

Sad, J.H.G. - 1968 - Os cinturões serpentínicos do Brasil Oriental. Bol. SICEG VI, Ouro Preto, v.7, p.140-153.

Sahoo, R.K., Kaaden, G.V.D. e Muller, G. - 1981 - The mineralogy and geochemistry of the nickeliferous laterite of Sukinda, Orissa, India. *In* Int Sem. Lat. Proc, 1, Trivandrum, Proc..., p.77-85.

Santivanez, A.O. - 1965 - As serpentinitas níquelíferas do Morro do Níquel em Pratápolis. Eng. Min. Met., v.XLII, nº248, p.61-64.

Santivanez, A.O. - 1972 - Níquel no Brasil. Região do Oco, Goiás. Eng. Min. Met., nº323, p.64-73.

Santos, J.F. dos - 1986 - Depósito de níquel de São João do Piauí, PI. *In* "Principais Depósitos Minerais do Brasil", D.N.P.M.-C.V.R.D., v.II, p.341-345.

Santos, J.F. dos - 1974 - Fatores de controle na concentração de níquel laterítico condicionado pela evolução geológica e geomorfológica do complexo básico-ultrabásico da São João do Piauí (PI). *In* Congr. Bras. Geol., 28, Porto Alegre, Anais..., v.6, p.25-32.

Santos-Ynigo, L. - 1964 - Distribution of iron, alumina and silica in the Pujada Laterite of Mati, Davao province, Mindanao Island (Phillipines). *In* Int.Geol. Congr., 22, New Dehli, Proc..., sect.14, p.126-141.

Schellmann, W. - 1978 - Behavior of nickel, cobalt and chromium in ferruginous lateritic nickel ores. Bull. B.R.G.M., Sect. II, nº3, p.275-282.

Schellmann, W. - 1983 - Geochemical principles of lateritic ore formation. *In* Int. Sem. Lat. Proc., 2, São Paulo, Proc..., p.119-135.

Schellmann, W. - 1889a - Composition and origin of lateritic nickel ore at Tagaung Taung, Burma. Min. Dep., v.24, p.161-168.

Schellmann, W. - 1989b - Allochthonous surface alteration of Ni-laterites. Chem. Geol., v.74, p.351-364.

Schobbenhaus, C. (coord.) - 1976 - Carta geológica do Brasil ao milionésimo. Folha Aracaju, SC.24. D.N.P.M., Brasília, 226p.

Schobbenhaus, C., Campos, D.de A., Derze, G.R. e Asmus, H.E. (coord.) - 1984 - Geologia do Brasil. D.N.P.M., M.M.E., Brasília, 501p.

Schwertmann, U. e Latham, M. - 1986 - Properties of iron oxides in some New Caledonian oxisols. *Geoderma*, v.39, p.105-123.

Schwertmann, U., Gasser, U. e Sticher, H. - 1989 - Chromium-for-iron substitution in synthetic goethites. *Geoch. Cosmoch. Acta*, v.53, p.1293-1297.

Scorza, E.P. - 1968 - Distribuição das rochas ultrabásicas do Brasil. *An. Ac. Bras. Cienc., Supl.*, v.40, p.119-126.

Silva, A.C.G. de A. - 1980 - Mineralogia, material amorfo, evolução genética e estudo do Ni e Cr no perfil de alteração do maciço ultramáfico de Santa Fé-GO. Diss. Mestrado, IGUSP, 136p.

Souza, J.V. de, Santos, P. de e Santos, H. de - 1978 - Caracterização mineralógica de algumas argilas níquelíferas brasileiras. *Cerâmica*, v.24, nº108, p.434-446.

Springer, G. - 1974 - Compositional and structural variation in garnierites. *Can. Min.* v.12, p.381-388.

Stache, G.A. - 1974 - Untersuchen zur Geologie, Petrographie, Metamorphose und Genese de basich-ultrabasichen Massivs von Barro Alto, Goiás (Brasilien). Tese Dout.. Tech. Un. Clausthal, 198p.

Stiers, W. e Schwertmann, U. - 1985 - Evidence for manganese substitution in synthetic goethite. *Geoch. Cosmoch. Acta*, v.49, p.1909-1911.

Stroessel, R.R. - 1988 - 25°C e 1 atm dissolution experiments of sepiolite and kerolite. *Geoch. Cosmoch. Acta*, v.52, p.365-374.

Trescases, J.J. - 1975 - L'évolution supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. *Mem. ORSTOM*, n°78, 259p.

Trescases, J.J. e Oliveira, S.M.B. de - 1978 - Alteração dos serpentinitos de Morro do Níquel (MG). *In Congr. Bras. Geol.*, 30, Recife, Anais..., v.4, p.1655-1669.

Trescases, J.J. - 1979 - Remplacement progressif des silicates par les hydroxydes de fer et de nickel dans les profils d'altération tropicale des roches ultrabasiques. Accumulation résiduelle et épigenie. *Sc. Géol.*, v.32, n°4, p.181-188.

Trescases, J.J. e Schevciw, F.G.P. - 1980 - Mineralogia e geoquímica da alteração meteórica das rochas ultramáficas de Pien (Paraná-Brasil). *In Congr. Bras. Geol.*, 31, Camboriú, Anais..., v.4, p.2353-2369.

Trescases, J.J. e Oliveira, S.M.B. de - 1981 - A jazida de níquel de Barro Alto. *In Simp. Geol. Centro-Oeste*, 1, Goiânia, Ata..., p.519-538.

Trescases, J.J. - 1986 - Nickeliferous laterites: a review on the contribution of the last ten years. *Geol. Surv. India Mem.*, v.120, p.51-62.

Treescases, J.J., Dino, R. e Oliveira, S.M.B. de - 1986 - Un gisement de nickel supergène en zone semi-aride : São João do Piauí (Brésil). *In* "Geochemistry and mineral formation in the earth surface" Ed. Clemente, R.R. e Tardy, Y., Madrid, p.273-288.

Troly, G. Esterle, M. Pelletier, B. e Reibell, W. - 1979 - Nickel deposits in New Caledonia. Some factors influencing their formation. *In* Int. Lat. Symp., New Orleans, Proc..., p.81-119.

Ulbrich, H.H.G.J. e Gomes, C.de B. - 1981 - Alkaline rocks from continental Brazil. *Earth Sc. Rev.*, v.17, p.135-154.

Uyeda, N., Hang, P.T. e Brindley, G.W. - 1973 - The nature of garnierites II. Clays and Clay Min., v.21, p.41-50.

Velde, B. - 1988 - Experimental pseudomorphism of diopside by talc and serpentine in (Ni,Mg)Cl₂ aqueous solutions. *Geoch. Cosmoch. Acta*, v.52, p.415-424.

Vletter, D.R. de - 1955 - How cuban ore was formed : a lesson in laterite genesis. *Eng. and Min. J.*, v.156, nº10, p.84-87.

Vletter, D.D. de - 1978 - Criteria and problems in estimating global nickel laterite resources. *Math. Geol.*, v.10, nº5, p.533-542.

Waal, S.A. de - 1971 - South African nickeliferous serpentinites. *Min. Sc. Eng.*, v.3, nº2, p.32-45.

Wiewiora, A. e Szpilak, K. - 1975 - Nickel containing regularly interstratified chlorite-saponite from Szklary, Lower Silesia, Poland. Clay Min., v.23, p.91-96.

Zeissink, H.E. - 1969 - The mineralogy and geochemistry of a nickeliferous laterite profile (Greenvale, Queensland, Australia). Min. Dep., v.4, p.132-152.