

## A JAZIDA DE NÍQUEL DE BARRO ALTO

Jean Jacques Trescases (1)  
Sonia Maria Barros de Oliveira (2)

(1) — ORSTOM / IGUSP  
(2) — JG / USP.

### ABSTRACT

The weathering of ultramafic rocks from the Barro Alto massif (GO) has led to the formation of the greatest nickeliferous deposit in Brazil ( $77.10^6$  ton ore, 1,4-2,1% Ni). The massif emerges from the lowlands, correlated with the Velhas surface (Upper Tertiary), that are covered by detritical-lateritic formations. The areas of greatest relief correspond to mafic rocks; in the elongated ultramafic zone, there are plains at the extremities (Velhas cycle) and small plateaus capped by silcrete, convex slopes and steep foothills in the central portion.

The weathering profile is well developed in the plains and in the convex slopes. It is formed, from the bottom to the top, by slightly altered rock, argillaceous saprolite, ferruginous saprolite and red laterite. On the hill tops and steep foothills the profile is truncated at the level of the slightly altered rock.

The alteration process begins by the transformation of olivine to nontronite with leaching of Mg. The other minerals (serpentine, enstatite, chromite, chlorite, amphibole) remain unaltered. When serpentine alters to nontronite or is dissolved, cohesion of the material disappears, resulting in the formation of argillaceous saprolite. Finally nontronite alters to goethite with almost total leaching of Si and Mg, thus forming the ferruginous saprolite. The red laterite is the soil derived from saprolite by crumbling of the structure.

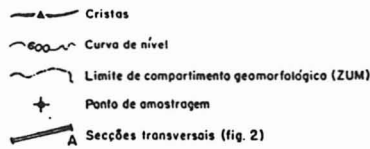
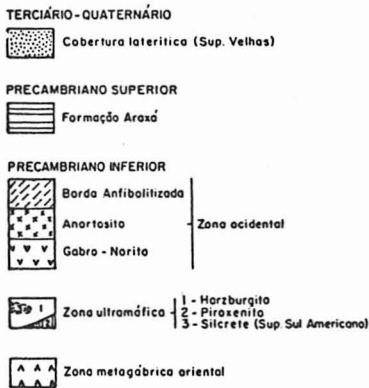
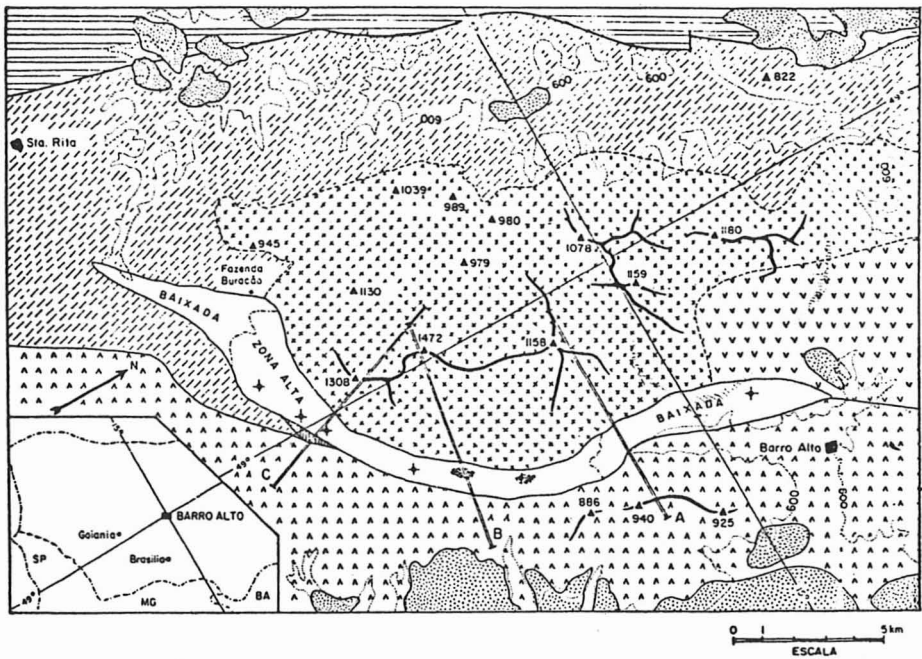
The weathering profiles of the lowlands and convex slopes show a lateritic tendency. The silcrete of the bottom of ancient profiles developed during the Tertiary, related to the Sul-Americano erosional cycle. The nickel that was pre-concentrated in these ancient profiles is the source for the absolute gains in the actual profiles, through lateral transfer.

The deposit of Barro Alto is comparable to the other Brazilian deposits of nickel. However, it is less eroded and, for this

reason, the transfer of nickel from the highlands to the lowlands is less complete.

### I- INTRODUÇÃO

O maciço máfico-ultramáfico de Barro Alto, situado a cerca de 150 km a N de Goiânia, comporta, em sua posição oriental, uma estreita faixa ultramáfica (fig. 1) de 37,6 km<sup>2</sup> de superfície (30 x 1km). A alteração meteórica dessas rochas resultou em lateritas níquelíferas, que constituem a maior jazida de Ni do Brasil, com 77 MT de minério a 1,4 2,1% Ni (MME, 1979).



**FONTES**  
 Topográfica: DSG 1/100000 - 1976  
 Geológica: C.P.R.M-1970 (projeto Barro Alto)  
 e observações dos autores

Fig. 1 : Mapa geológico e localização

Ao contrário do maciço de Niquelândia, onde o níquel é conhecido desde o início do século, o interesse por Barro Alto só foi despertado no final da década de 60, através dos projetos do DNPM: Brasília (Barbosa et al., 1969) e Goianésia-Barro Alto (Baeta Jr. et al., 1972). As pesquisas de Ni pela Companhia Baminco Mineração e Siderurgia S.A. desenvolveram-se entre 1970 e 1974.

Os trabalhos geológicos publicados constam principalmente de mapeamentos (Baeta Jr. et al, 1972; DNPM/Schobbenhaus Filho et al., 1975 e de dados geocronológicos (Souza, 1973; Cordani e Hasui, 1974). Os primeiros estudos petrológicos são os de Stache, 1974 e Figueiredo, 1978. Muitos autores comentaram a petrologia do maciço de Barro Alto, a título de comparação com os maciços vizinhos (Niquelândia e Canabrava) ou com os pequenos corpos serpentinosos intrusivos em metassedimentos (Almeida, 1967; Angeiras, 1968; Berbert, 1970; Da Costa e Angeiras 1971; Figueiredo et al., 1975; Fleischer e Routhier, 1970; Thayer, 1972). A alteração meteórica das rochas ultramáficas de Barro Alto e o perfil laterítico foram descritos por Melfi, 1974; Stache, 1974 e Figueiredo, 1978. A jazida de Barro Alto é descrita de maneira preliminar por Melfi et al., 1979/1980, num quadro de comparação com as outras jazidas brasileiras.

## II- AS CONDIÇÕES DO MEIO NATURAL

### A. Geologia

O Complexo máfico-ultramáfico de Barro Alto comporta duas unidades distintas:

- a parte ocidental, de orientação EW, com 76 km de extensão, situada entre as cidades de Rubiataba e Goianésia, constituída principalmente por anfibolitos, gabros granulíticos e gnaissóides;

- a parte oriental, de orientação SW-NE, com 80 km de extensão, situada entre a cidade de Goianésia e as margens do rio Maranhão, diferenciada em "zonas", comparáveis às do maciço de Niquelândia (Araujo et al., 1972).

Será resumida, a seguir, a geologia da seqüência oriental, onde estão contidas as rochas ultramáficas. A definição das zonas de Baeta et al., 1972 e Figueiredo et al., 1975 foi modificada por Figueiredo, 1978, que dividiu a parte oriental do maciço em 3 zonas de tipo e origem totalmente diferentes (figura 1):

- Zona metagábrica oriental (zona basal dos primeiros autores).
- Zona ultramáfica.
- Zona metanortosítica e metagábrica ocidental (zona anortosítica e

central dos primeiros autores, sendo a zona do topo destes apenas uma fácies de borda anfibolitizada).

Segundo este autor, na zona metagábrica oriental, predominam metagabros e metanoritos, com metawebsteritos subordinados. Os piroxênios apresentam-se parcialmente alterados em hornblenda e actinolita.

A zona ultramáfica é composta quase unicamente por metaperidotitos serpentinizados, localmente intercalados com camadas centimétricas de piroxenitos. A serpentina (40-85% da rocha), a olivina (Fo 87-90) e a enstatita (En 90-92) são os minerais principais; ocorrem acessoriamente clinopiroxênio, anfibólitos, cromita, clorita e magnetita. Na porção sul da faixa ultramáfica, os harzburgitos gradam a dunitos em direção ao "topo" da zona. Ocorre aí também uma diminuição no grau de serpentinação.

A terceira zona do maciço é de natureza metanortosítica ao sul e metagábrica ao norte, com passagem lateral a anfibolito.

Figueiredo, 1978, interpreta a zona ocidental como parte da crosta primitiva que teria ascendido por diapirismo, no contexto de um plutonismo orogênico. As zonas de fraqueza criadas pela ascensão teriam facilitado a intrusão de um magma basáltico toleítico, cuja diferenciação resultou na zona metagábrica oriental. A zona ultramáfica representaria uma porção do manto superior submetida a fusão parcial, ar rastada pela intrusão deste magma. A ascensão do maciço foi acompanha da de um episódio de metamorfismo, responsável pela anfibolitização dos piroxênios. A etapa final de evolução, datada do Brasileiro, foi marcada localmente por retro-metamorfismo, evidenciado por actinolização, cloritização e saussuritização ao longo dos planos de falhas.

#### B. Clima e vegetação

O maciço de Barro Alto, localizado no Planalto Central Brasileiro, está submetido atualmente a clima tropical de estações contra tadas, com verão úmido de outubro a abril, e inverno seco de maio a setembro. A temperatura média anual varia de 25 a 27°C nos pontos mais baixos do maciço (550 a 650m). A pluviosidade média anual varia de 1400 a 1700mm.

A vegetação é do tipo savana arbórea nas planícies (cerrado) com matas-galerias ao longo dos rios. Nas serras, a densidade das árvo res é maior e elas são de maior porte (cerradão ou mata xenomórfica).

#### C. Geomorfologia

O maciço de Barro Alto destaca-se na paisagem como um relevo montanhoso que emerge de uma planície nivelada nos metassedimentos en caixantes do Grupo Araxá. Esta superfície aplainada, coberta por forma

ções detrítico-lateríticas, situa-se por volta de 600m (Fig. 1), com extremos de 650m no interior do maciço e 550m na região NW. Os rios principais (rio dos Bois e rio das Almas a oeste e rio dos Patos a leste), todos afluentes do Rio Maranhão, da bacia do Rio Tocantins, correm para norte e seus leitos são geralmente desprovidos de aluviões quaternárias. Esta planície pode ser correlacionada com a superfície Velhas, de idade terciária superior (Braun, 1970).

No interior do maciço, são os anortositos que correspondem às áreas de maior relevo, com topos culminando a 1500m (Serra Grande). As zonas metagábricas constituem serras menos elevadas, de altitude de cerca de 1000m. Na porção central das zonas metagábrica oriental, a topografia é deprimida ao nível da superfície Velhas. A drenagem é do tipo angular, controlada pela rede de falhas e fraturas.

O relevo da zona ultramáfica caracteriza-se por áreas de baixadas nas extremidades N e S e por uma área montanhosa na porção central. Essas baixadas de altitude entre 600 e 680m e, portanto, pertencentes ao sistema Velhas, perfazem mais de 60% da superfície total das rochas ultramáficas e apresentam-se como depressões alongadas entre os relevos de gabros e anortositos (fig. 2A). O contato com as encostas dá-se por formações de piedmont de geometria côncava.

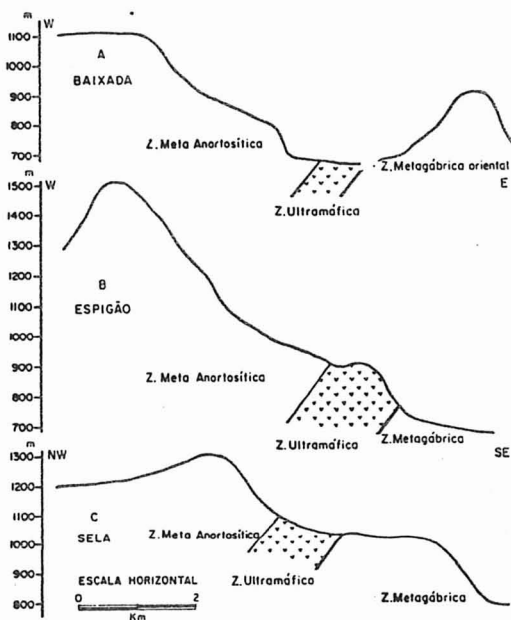


Fig. 2 : Cortes topográficos

A área montanhosa da porção central constitui-se num degrau de altitude intermediária entre os anortositos e os chapadões lateríticos de leste. Neste degrau, as altitudes mais freqüentes situam-se entre 800 a 1000m. Mais do que um verdadeiro platô, trata-se de vários espigões entre a vertente anortosítica íngreme e a planície oriental, no caso da zona gábrica ser erodida (fig. 2B); ou então trata-se de largas selas entre a serra anortosítica e a serra gábrica (fig. 2C). Na zona alta, ocorrem áreas de topografia aplainada, sustentadas por silcrete, que constituem cerca de 20% desta zona. O restante são encostas convexas ou íngremes.

Distinguem-se, assim, na zona ultramáfica, 4 compartimentos de relevo, quais sejam, platôs, encostas convexas, encostas íngremes e baixadas.

## II- OS PERFIS DE ALTERAÇÃO

Aos quatro tipos de compartimentos topográficos, correspondem quatro tipos de perfis (fig.3). Os horizontes serão denominados conforme nomenclatura já estabelecida por Melfi et al. (1979/1980).

### A. Características principais de cada horizonte

#### Silcrete

O silcrete é composto de blocos mais ou menos angulosos e de uma pequena quantidade de matriz ferruginosa, fina, marrom avermelhada. Cada bloco é constituído, em geral, por uma malha silicosa de quartzo ou calcedônia, com núcleos parcialmente preenchidos, ora por fragmentos de rocha ultramáfica alterada, ora pelo material ferruginoso da matriz: é o tipo boxwork, de baixa densidade (< 1). Em alguns casos, a silicificação é quase total, resultando uma rocha amarela a vermelha, toda de calcedônia e quartzo: é o tipo silexito (densidade 2 a 2,6).

#### Laterita vermelha-LV

Na encostas e nas baixadas, o horizonte superior não é mais o silcrete, mas a laterita vermelha, formada de matriz ferruginosa e pulverulenta, e de numerosos fragmentos de rocha silicificada (boxwork e silexito). Algumas vezes encontram-se blocos ( $\varnothing$  1 - 20cm) de couraça ferruginosa, cimentados em canga nos degraus das encostas.

A laterita vermelha é um horizonte em parte remanejado ou coluvial e em parte residual. O resto dos perfis decorre de alteração in-situ, com preservação da estrutura inicial da rocha ultramáfica.

#### Saprolito ferruginoso - SF

Trata-se de um horizonte nem sempre presente, de cor marrom

amarelada muito ferruginoso, e de fina granulometria (tabela III). A densidade situa-se em torno de 0,7, podendo chegar a cerca de 1,0, em consequência de compactação.

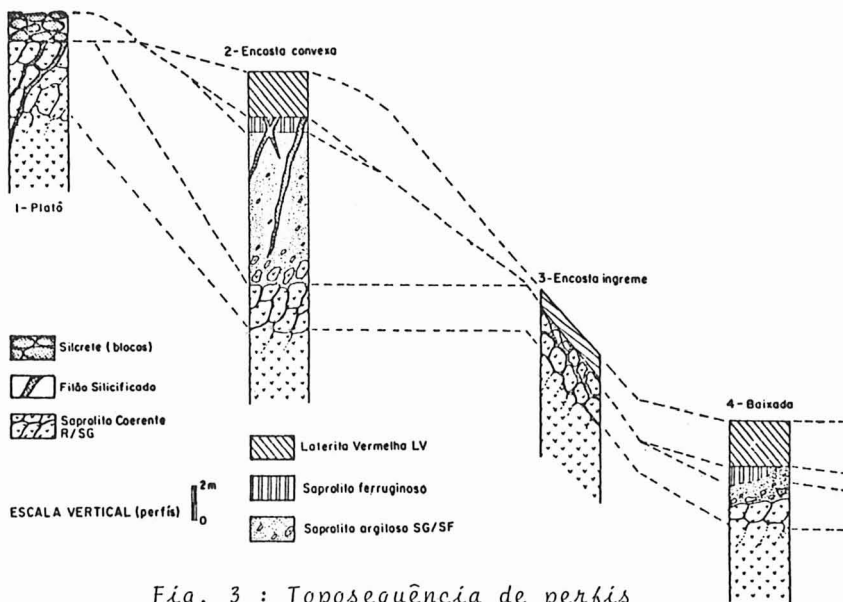


Fig. 3 : Toposequência de perfis

#### Saprólito argiloso-SG/SF

Neste horizonte, bem desenvolvido apenas nas encostas convexas, a estrutura da rocha permanece ainda perfeitamente conservada, embora o material seja todo de granulação muito fina (Tabela III). A densidade varia de 0,7 até 1,3 e a cor é marrom esverdeada. A passagem deste horizonte ao superior e ao inferior é transicional. Em direção ao saprólito grosso coerente, há aumento da proporção de fragmentos grosseiros de rocha menos alterada e consequente aumento de coesão.

#### Saprólito grosso coerente-R/SG

É material rochoso levemente friável, às vezes quase duro, de cor amarela a laranja. Podem ocorrer blocos de rocha menos alterada e veios de material mais argiloso (SG/SF) entre os blocos. A densidade média varia de 1,4 até 1,8. Alguns veios de quartzo e garnierita podem atravessar esse material.

#### Rocha dura-RD

É o último horizonte de alteração. A indicação de que se trata de material meteorizado é apenas a mudança da cor (de escura na rocha fresca passa a cinza, cinza-amarelada ou bege) e de densidade (1,8 a 2,5, enquanto que na rocha fresca varia de 2,6 a 3,0, dependendo do

grau de serpentinização). Como no horizonte R/SG, alguns veios de quartzocalcedônia, com ou sem garnierita, podem preencher as fissuras. A espessura deste horizonte é desconhecida.

#### B. Os perfis na topossequência

Os perfis característicos de cadastio topográficos são esquematizados na figura 3. Nos platôs o saprolito grosso coerente é diretamente recoberto de silcrete. Nas encostas convexas, os perfis são os mais profundos e os mais argilosos, e comportam todos os horizontes de alteração in-situ. A zona de alteração é, às vezes, atravessada por filões subverticais de rocha intensamente silicificada, cortados bruscamente no topo pelo horizonte de LV, e que desaparecem em direção à base do perfil. Estes filões podem ser interpretados como raízes da antiga superfície de silcrete, hoje erodida. Nas encostas íngremes, o material rochoso (RD a R/SG) é recoberto por, no mínimo, 1m de SG/SF e 0,5m de LV. Nas baixadas, o perfil volta a se desenvolver melhor, com todos os horizontes de alteração presentes, embora com espessura menor do que nas encostas convexas (vide tabela I).

#### IV- EVOLUÇÃO MINERALÓGICA NO DECORRER DA ALTERAÇÃO

A evolução mineralógica no decorrer da alteração foi acompanhada pelo estudo de lâminas delgadas e análises por difração de raios X.

Na rocha fresca, a olivina ocupa o núcleo de um reticulado formado por serpentina. As ortopiroxênios são frescos ou bastitizados, ou ainda alterados parcialmente em anfibólios fibrosos (cumingtonita?). Nas zonas mais serpentinizadas, podem ocorrer pequenos cristais filitosos de clorita (ou vermiculita). Os minerais acessórios são o espínélio cromífero e, em pequena quantidade, a magnetita.

Com o início da alteração, é a olivina que sofre em primeiro lugar, apresentando-se mais ou menos corroída nas bordas; em volta dela as fibras de serpentina assumem coloração amarelada devido à deposição do ferro liberado pela hidrólise da olivina, que migra por algumas dezenas de mícrons.

Com alteração um pouco maior, há formação de material argiloso de natureza esmectítica nas bordas dos núcleos de olivina; o retículo da serpentina permanece intacto, mas cada vez mais amarelado. O piroxênio, quer fresco, quer bastitizado, quer anfibolitizado, parece resistir bem à alteração, mantendo-se intacto, embora suas clivagens possam apresentar-se por vezes ferruginizadas. A cromita mostra os primeiros sinais de oxidação, revelados por auréolas amareladas ao redor dos cristais. Anfibólios e clorita permanecem inalterados. Nas fissuras, insta-

lam-se delgados filões de quartzo e calcedônia, às vezes associados a um filossilicato verde da família pimelita-kerolita, muito provavelmente neoformado.

A passagem do nível de rocha dura acima descrito, ao de saprolito grosso coerente é marcado pelo desaparecimento das últimas olivinas, transformadas totalmente em esmectita, ou deixando cavidades parcialmente preenchidas por grãos de quartzo ou por um material ferruginoso de natureza amorfa ou criptocristalina. Os outros cristais continuam a apresentar-se pouco alterados, mas com depósitos amarelos de óxidos de ferro nos planos de clivagens. A permanência do retículo em malha de serpentina explica a conservação razoável da coesão.

O horizonte de saprolito argiloso é caracterizado pela perda de coesão e pelo aparecimento de tons esverdeados que acompanham a extensa substituição da serpentina por esmectita ferrífera (nontronita). As amostras apresentam um reticulado de nontronita com núcleos ferruginosos (iddingsita e nontronita), réplica da estrutura da rocha mãe. O ortopíroxênio, a clorita e o anfibólio parecem também evoluir parcialmente em nontronita. A cromita permanece, mas bastante corroída. No eixo central dos veios de serpentina, a magnetita é totalmente oxidada em material marrom ferruginoso.

No estágio de evolução representado pelo saprolito ferruginoso, o material assume cores amarelo-avermelhadas, reflexo da transformação dos silicatos de ferro em hidróxidos deste elemento. Assim, a nontronita desaparece e dá lugar à goethita, conservando mais ou menos precariamente a estrutura original da rocha. O quartzo, neoformado no início do processo de alteração, comporta-se residualmente daí por diante. Alguns veios macroscópicos de clorita permanecem quase intactos no meio do material ferruginizado.

A laterita vermelha representa uma mudança radical na organização do material do saprolito fino: o arcabouço goethítico, precariamente estruturado nos moldes do retículo de serpentina, desaba e dá lugar a uma poeira fina, raramente concrecionada em torno de grãos de quartzo. A transformação goethita hematita, descrita em Santa Fé (Oliveira, 1980), parece incipiente em Barro Alto. Os raios X revelam, principalmente na superfície, a presença de pequena quantidade de caolinita. O fato de alguns grãos de ortopíroxênio e de clorita terem sido encontradas na laterita vermelha mostra que esses minerais podem, às vezes, resistir bastante à alteração.

As rochas silicificadas, tanto os blocos do silcrete que capeia os platôs, quanto as raízes in-situ das encostas convexas, apresen-



desses núcleos (deixando resíduo ferruginoso) e de seu esvaziamento parcial, o quartzo bem cristalizado precipitou nos buracos, e a sílica criptocristalina invadiu o resto da rocha. Remobilizações tardias dissolveram a sílica em alguns lugares e reprecipitaram-na nas fraturas (quartzo macrocristalino em veios).

Dentro do espesso horizonte de saprolito argiloso do perfil de encosta convexa, foram encontrados bolsões lenticulares com mineralogia original. Às vezes trata-se de clorita em proporção muito elevada, provavelmente relacionada à fase de serpentização. Na meteorização mantém-se praticamente inalterada, e aparece misturada com a nontronita, oriunda principalmente da serpentina. Outra lente revelou-se formada de serpentina níquelífera mal cristalizada (deslocamento dos picos aos RX, e à ATD). A análise química indica 38% de NiO (Tabela VI).

A figura 4 resume as considerações acima num diagrama que procura estabelecer os vínculos genéticos entre os minerais primários e secundários.

## V- EVOLUÇÃO QUÍMICA NO DECORRER DA ALTERAÇÃO

### A- Dados ponderais

A composição química média dos horizontes dos perfis de platô, encosta convexa e baixada é mostrada na tabela I. Podem ser examinadas as variações de composição seja vertical, seja lateralmente.

#### 1. Variações verticais

A evolução vertical, através dos horizontes de alteração in-situ, segue o esquema clássico dos perfis lateríticos sobre rochas ultramáficas do Brasil (Melfi, et al., 1979/1980).

Como sempre acontece no Brasil, o teor máximo de Ni ocorre na parte mediana dos perfis (SG/SF), embora a rocha dura e quase aflorante dos platôs e selas possa mostrar teores elevados em Ni, devido a veios verdes de garnierita nas fissuras. Os valores máximos para o Co situam-se na zona mais alterada (SF). Dos horizontes que podem ser considerados como minério de Ni, a maioria (RD, R/SG, SG, SG/SF) é do tipo silicatado. O saprolito ferruginoso e a laterita vermelha das baixadas aproximam-se mais do tipo oxidado, embora com teores significativos de SiO<sub>2</sub> (15%). O Cu é sempre baixíssimo, com máximo no saprolito ferruginoso (200 a 400 ppm).

#### 2. Variações laterais

O estudo da variação lateral de composição do mesmo horizonte ao longo da toposequência permite emitir algumas hipóteses sobre a com-

posição dos níveis de amostragem inacessíveis, como a base dos perfis profundos das encostas convexas, e contribui para a compreensão da evolução geral do maciço no decorrer do tempo, na escala da paisagem.

A	e	P.F.	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	NiO	Co <sub>ppm</sub>	Cu <sub>ppm</sub>	n
SI	2	3,10	80,8	0,07	0,4	12,9	0,10	1,18	0,37	0,47	450	65	1
R/SG	4,5	13,4	39,9	31,3	0,11	10,0	0,10	0,60	0,09	3,31	205	24	1
RD	?	13,0	39,8	32,5	0,4	8,67	2,45	0,52	0,15	1,88	180	33	2
RF	-	10,6	41,0	36,9	0,7	8,05	0,91	0,44	0,14	0,27	85	16	1
		2,74	42,3	44,3	0,5	8,42	0,81	0,44	0,15	0,25	-	-	3

B	e	P.F.	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	NiO	Co <sub>ppm</sub>	Cu <sub>ppm</sub>	n
LV	3	8,8	23,2	0,69	0,05	50,1	12,8	1,55	0,39	0,51	285	88	2
Si r. até	10	1,65	89,6	0,22	0,26	6,40	0,15	0,18	0,08	0,18	102	68	2
SF	1	8,5	14,8	1,62	0,06	60,4	9,7	1,66	1,29	0,83	1535	128	1
SG/SF	10	10,1	34,3	3,55	0,27	36,6	9,5	1,92	1,93	2,16	1195	152	3
R/SG e RD	?	11,0	43,8	7,23	0,29	22,4	7,8	1,29	0,68	3,97	980	140	2
RF	-	2,74	42,3	44,3	0,5	8,42	0,81	0,44	0,15	0,25	-	-	3

C	e	P.F.	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	NiO	Co <sub>ppm</sub>	Cu <sub>ppm</sub>	n
LV	2,5	8,6	15,7	1,52	-	53,0	13,9	3,21	0,86	1,29	765	280	11
SF	0-1,5	9,9	17,5	6,7	-	49,0	9,1	3,06	0,76	2,42	620	385	2
SG/SF	1,5-0	12,9	29,5	23,7	-	24,0	4,80	1,42	0,35	2,45	340	150	4
SG	3	14,7	34,0	25,9	-	16,4	4,05	1,04	0,40	2,51	242	208	4
R/SG	3	14,7	34,0	30,5	-	14,3	2,21	0,95	0,19	1,91	210	146	7
RD	?	16,5	35,7	31,5	-	12,2	2,90	0,77	0,29	1,18	212	152	3
RF	-	2,74	42,3	44,3	0,5	8,42	0,81	0,44	0,15	0,25	-	-	3

e espessura média (metros)  
\* Fe total como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
n número de amostras

SI silcrete  
Si r. raízes do silcrete  
LV Laterita vermelha  
SF Saproilito ferruginoso

SG/SF Saproilito argiloso  
SG Saproilito grosso  
R/SG Saproilito coerente  
RD Rocha dura  
RF Rocha fresca

Tabela 1 : Composição química média (%) dos horizontes de perfil:

A - de platô

B - de encosta convexa

C - de baixada (apud Stache 1974)

(RF apud Figueiredo 1978)

Nos fácies menos evoluídos (RD e R/SG), as diferenças são mínimas entre as diferentes posições topográficas. Os valores de SiO<sub>2</sub> são levemente maiores nos platôs, provavelmente em consequência da presença do silcrete, fonte de SiO<sub>2</sub> na superfície. O Ni também apresenta-se elevado por causa dos veios de garnierita. A base dos perfis de encosta não deve ser muito diferente da base dos de baixada.

O horizonte de saprolito argiloso (SG/SF) é muito menos empobrecido em Mg na baixada do que nas encostas, onde ele se apresenta mais ferruginoso. Na baixada, a transformação serpentina nontronita é muito menos completa que nas encostas convexas.

Embora semelhante nos dois sítios, os horizontes superiores de saprolito ferruginoso e, principalmente, de laterita vermelha são mais ricos em SiO<sub>2</sub> nas encostas convexas e mais níquelíferos na baixada.

## B- Dados volumétricos - Balanço da alteração

O balanço químico absoluto (perdas e ganhos) da alteração é avaliado pelo raciocínio iso-volumétrico, completado por cálculos iso Fe e/ou iso-Cr, para as análises dos perfis de baixada, publicados por Stache (1974), e para as amostras cujo volume inicial não foi conservado. Os resultados em g de óxidos para 100 cm<sup>3</sup> de amostra são plotados em abscissa nas figuras 5A e 5B; em ordenadas são distribuídas as densidades, medidas ou calculadas.

### 1. Elementos estritamente residuais na alteração: Fe, Cr

Para esses dois elementos, as variações refletem apenas a heterogeneidade da rocha-mãe. Na parte somital, contudo, podem ocorrer algumas acumulações absolutas, por iluviação de material fino a partir da laterita vermelha, dentro das fissuras do saprolito. O silcrete, por sua vez, mostra uma perda (33%) desses dois elementos, resultando do esvaziamento mecânico de suas cavidades, depois da lateritização dos seus núcleos rochosos.

### 2. Elementos pouco móveis: Al, Mn, Co.

Embora o comportamento desses elementos seja próximo daquele do Fe e Cr, alguns matizes devem ser destacados. O Al é sempre acumulado nos perfis, com ganho maior nos perfis localizados perto dos gabros e anortositos, fontes poluidoras. O Mn e o Co permanecem, em média, conservados, mas mostram, às vezes, fortes acumulações absolutas, sob forma de veios pretos de asbolana.

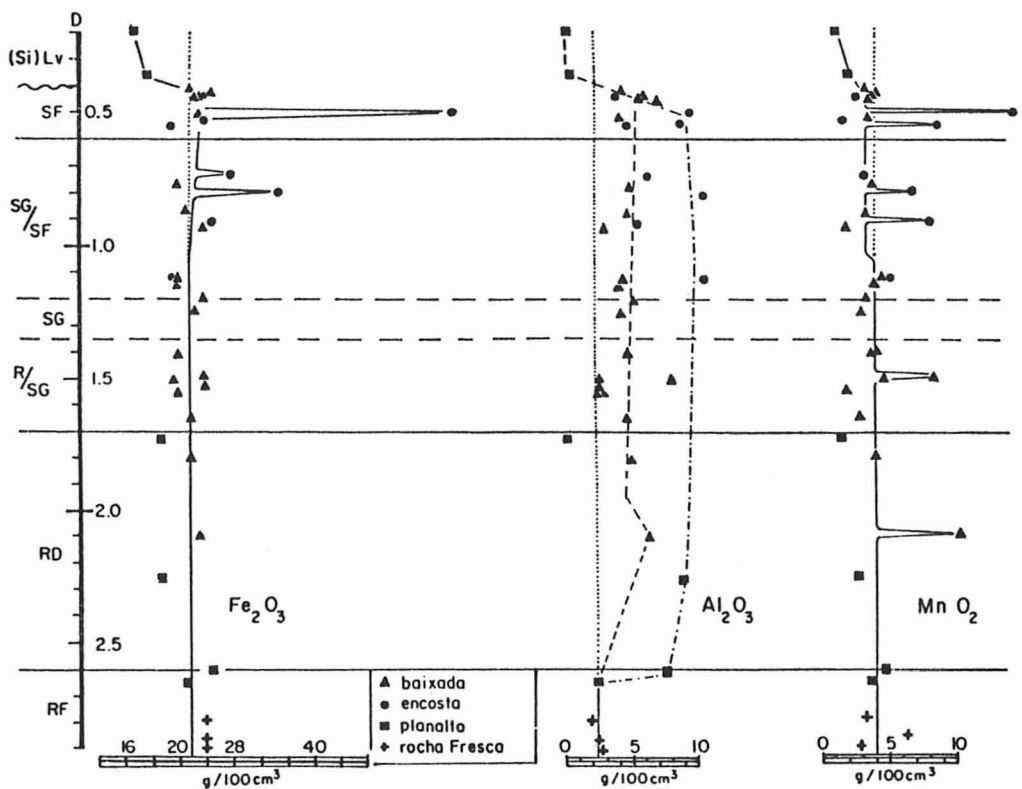
### 3. Elemento mediamente móvel: Ni

O Ni mostra uma nítida tendência à perda na parte somital dos perfis, e fortes, mas irregulares, acumulações absolutas (até + 800%) nos outros horizontes. Considerando os volumes onde ocorrem perdas e ganhos, é óbvio que, quase sempre na escala do perfil, e, com certeza, na escala da paisagem ultramáfica, há hoje um excesso de Ni.

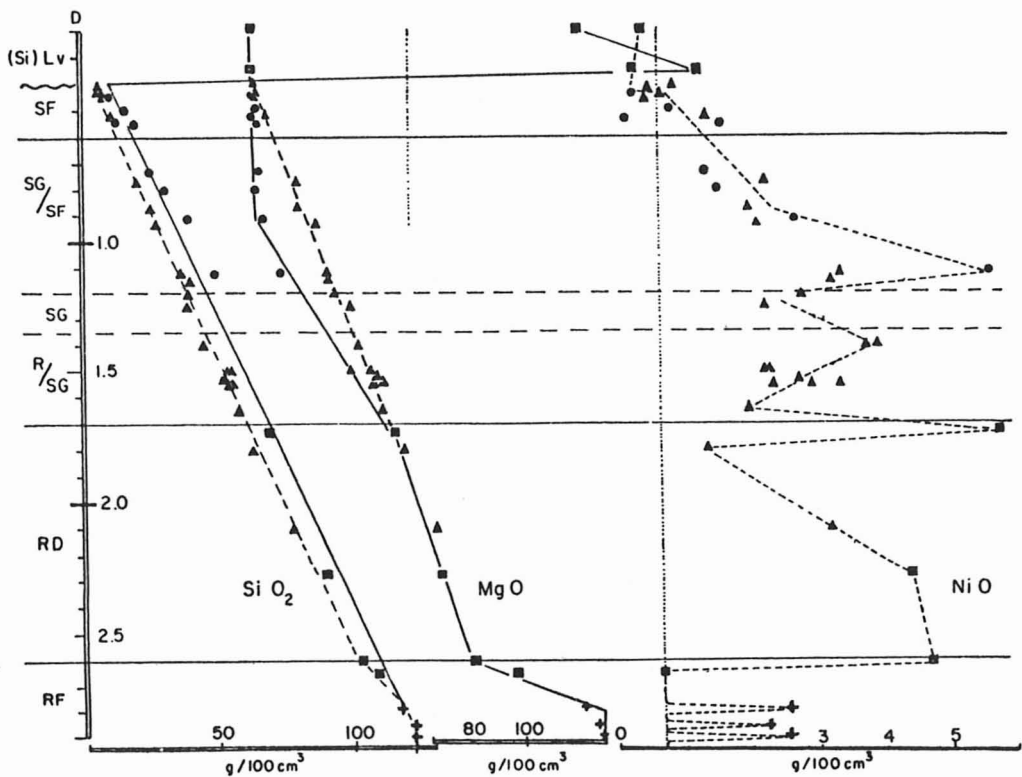
### 4. Elementos solúveis, bastante móveis: Si, Mg, Ca

	SiO <sub>2</sub>			MgO					
	Zonas altas e baixadas			Z.altas		baixadas			
Silcrete (platôs)	+ 200%			-92%		-			
SF, LV	-85	até	-95%	-95	até	-98%	-90	até	-98%
SG/SF	-65	até	-85%	-80	até	-95%	-70	até	-90%
R/SG	-40	até	-65%	-55	até	-80%	-55	até	-70%
RD	-10	até	-40%	-20	até	-55%	-20	até	-55%

Tabela II : Taxas de perdas e ganhos de SiO<sub>2</sub> e MgO na alteração.



(A)



(B)

Fig. 5: Balanço isovolume da alteração

Como mostra a tabela II, as perdas graduais de SiO<sub>2</sub> com a alteração são reflexo das transformações da olivina e da serpentina em nontronita e depois em goethita. Porém, no silcrete há um ganho absoluto importante. Conclui-se, daí, que o silcrete não pode ser formado por evolução do saprolito ferruginoso. Pelo contrário, há numerosos indícios micromorfológicos e geoquímicos que evidenciam a filiação da laterita vermelha a partir do saprolito ferruginoso, com contribuição do desmantelamento do silcrete.

As perdas de MgO são sempre maiores do que as de SiO<sub>2</sub>, e maiores nos perfis de zona alta do que nas baixadas, o que sugere a ausência do estágio nontronítico na alteração da serpentina nas baixadas.

### C- Interpretação da evolução geoquímica no decorrer da alteração

#### 1. Análise de frações granulométricas

A composição química das frações granulométricas de laterita vermelha, saprolito ferruginoso e saprolito argiloso aparece na tabela III. Os intervalos de granulometria são os seguintes: > 2mm; 2mm/210µ; 210µ/74µ; < 74µ.

	%f.	P.F.	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	NiO	Co <sub>ppm</sub>	Cu <sub>ppm</sub>	Σ
LV - A	1,33	12,6	20,0	0,19	39,9	17,5	3,8	4,27	1,21	7065	287	99,5
LV - B	5,3	5,2	51,6	0,65	29,0	6,42	1,59	3,36	0,90	5750	287	98,7
LV - C	10,0	10,9	33,3	1,55	41,1	8,08	5,3	0,78	0,55	1250	135	101,5
LV - D	83,4	8,0	17,4	0,63	62,6	8,03	1,42	0,37	0,67	160	127	99,1
SF - A	7,6	11,4	36,9	0,23	25,9	16,5	1,57	3,56	1,10	5500	200	97,2
SF - B	7,1	9,1	22,1	1,91	45,6	10,1	1,39	6,29	1,53	7875	400	98,0
SF - C	9,4	7,8	16,0	3,19	53,4	12,2	4,8	1,34	0,77	1635	303	99,5
SF - D	75,9	8,7	12,0	1,12	65,2	7,84	1,31	0,71	0,78	495	135	97,7
SG/SF-B	16,5	9,4	36,4	3,17	36,8	7,08	1,30	1,42	2,42	2125	247	98,0
SG/SF-C	13,2	9,5	32,0	3,67	39,0	8,83	2,99	0,79	2,00	930	400	98,8
SG/SF-D	68,3	9,5	41,3	3,30	31,8	7,46	1,02	0,62	2,42	670	263	97,4

LV Laterita vermelha A > 2mm %f. peso % da fração  
 SF Saprolito ferruginoso B 2mm/210µ \* Fe total como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 SG/SF Saprolito argiloso C 210µ/74µ  
 D < 74µ

Tabela III: Composição química (%) de frações granulométricas

No saprolito argiloso, todas as frações têm composições químicas semelhantes, exceto em relação ao Cr, que se concentra entre 74 e 210 µ (tamanho dos grãos de cromita).

Nos horizontes superiores, ambos muito parecidos, cada elemento mostra uma localização preferencial numa fração:

- Si e Mg são concentrados juntos, nas frações intermediárias, refletindo os últimos silicatos primários pouco alterados (serpentina e clorita), que passam progressivamente para as frações mais finas.

- A concentração de Si e Al nas frações grosseiras corresponde aos grãos de quartzo e provavelmente a um aporte mecânico proveniente dos gabros.
- O Fe é levemente concentrado na fração mais fina, mais laterítica, produto da alteração da nontronita.
- Embora concentrado na faixa 74 - 210  $\mu$ , tamanho dos grãos de cromita, o Cr aparece na fração fina, o que corresponde a alteração da cromita.
- Mn e Co são fortemente concentrados nas duas frações mais grosseiras, em concreções de asbolano.
- O Ni é distribuído por todas as frações, estando a maior parte na fração fina, que predomina amplamente, mas pode ser encontrado concentrado junto com Co e Mn no asbolano.

## 2. Análise de minerais particulares

	PF	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	NiO	Co <sub>ppm</sub>	Cu <sub>ppm</sub>	$\Sigma$
Clorita	13,8	44,3	4,04	0,38	5,18	27,9	0,17	0,01	1,71	71	56	97,5
Serpentina-Ni	8,8	34,9	1,88	0,37	11,0	2,55	0,42	0,15	38,2	810	48	98,3

\* Fe total como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Tabela IV - Composição química(%) de alguns minerais

A tabela IV fornece a composição química de minerais níquelíferos encontrados em lentes nos perfis de alteração: clorita e serpentina.

A clorita hipóxigena passa a fixar uma parte do Ni liberado da olivina e serpentina, provavelmente por absorção interfoliar. Esta clorita não acolhe tanto Ni como a nontronita (tabela III- SG/SF fração D).

## VI- INTERPRETAÇÃO DOS DADOS E CONCLUSÃO

O conjunto de dados decorrente do estudo geomorfológico, mineralógico e geoquímico levou a distinguir vários sítios topográficos, com evolução característica. Com exceção dos platôs, testemunhos de uma forma de relevo antigo, nos outros sítios, a alteração ocorreu essencialmente no Quaternário.

### a) Evolução das zonas de baixada

A progressiva eliminação de Si, Mg, Ca e a conservação dos outros elementos (Fe, Al, Cr, Ni, Mn, Co) caracteriza a evolução das zonas de baixada como sendo laterítica. A pouca espessura do horizonte de saprolito ferruginoso, onde a lateritização é realmente atingida, mostra, todavia, que esse tipo de evolução ainda não chegou ao verdadeiro amadurecimento.

#### b. Evolução das encostas

Nas encostas convexas, a evolução dos perfis de alteração apresenta uma grande semelhança com os das zonas de baixada. Os horizontes são os mesmos, embora mais espessos e mais nontroníticos nas encostas convexas, acabando por evoluir em material laterítico.

Nas encostas íngremes, o início de alteração ainda é comparável, embora, aí, a etapa nontronítica esteja ausente e os perfis estejam interrompidos pela erosão.

Em resumo, a evolução recente, em equilíbrio com as condições morfoclimáticas sub-atuais, é laterítica. Em alguns sítios, como na encostas íngremes é contrariada pela erosão.

#### c) Etapas da alteração laterítica recente

No início da alteração (rocha dura e saprolito coerente), a alteração da olivina e da magnetita ligada à serpentina libera os constituintes: Si, Mg, Fe, Ni. Oxidados, Fe e Ni que são pouco solúveis ficam no lugar, associados a uma parte da  $\text{SiO}_2$  (nontronita ou produtos amorfos), ou migram a curtíssimas distâncias, em direção ao retículo de serpentina vizinho ainda inalterado, onde vêm preencher as descontinuidades físicas. Dissolvido, o Mg é lixiviado, junto com outra parte da  $\text{SiO}_2$ . Uma certa proporção desta  $\text{SiO}_2$  precipita um pouco mais longe, nas fissuras, como quartzo-calcedônia, ou junto com Mg e Ni como kerolita-pimelita.

Na etapa seguinte (saprolito argiloso e saprolito ferruginoso) é a vez da serpentina se alterar, seja dissolvendo-se diretamente e deixando um residuo de goethita níquelífera (baixada), seja por intermédio da nontronita, no saprolito argiloso das encostas convexas. A lixiviação do Mg acaba por ser quase total, como a da  $\text{SiO}_2$ , com exceção da pequena parcela previamente imobilizada nos veios de quartzo. O Ni acompanha o Fe na goethita, passando ou não por uma etapa nontronítica; uma parte do Ni se associa com os hidróxidos de Co e Mn em concreções de asbolana. Há evidências de movimentos do Ni a partir do saprolito ferruginoso, em direção aos horizontes inferiores (principalmente o saprolito argiloso), onde ocorrem impregnação de clorita, neoformação de lentes de serpentina níquelífera ou de veios de pimelita.

A passagem do saprolito ferruginoso à laterita vermelha corresponde ao desabamento do que restava da estrutura da rocha, com fracionamento das partículas grosseiras (quartzo, asbolana, silicatos hipógenos herdados), enquanto ocorre um concrecionamento do Fe (goethita), em volta de grãos de cromita e quartzo. Há nestes processos uma certa perda de Ni, a favor dos níveis subjacentes.

d) Problemas dos platôs e do níquel

Alguns fatos vão de encontro à coerência do esquema evolutivo lateritizante que acaba de ser descrito.

Apesar de planos e protegidos da erosão por uma capa de silcrete, os platôs não conhecem a evolução completa, interrompida, a exemplo das encostas íngremes, no estágio de saprolito coerente. Neste saprolito, os numerosos veios de pimelita comprovam uma forte acumulação de Ni, sem fonte atual. No silcrete somital, a importação de  $\text{SiO}_2$ , também sem fonte, está em contradição absoluta com a evolução laterítica.

Por outro lado, o balanço da alteração mostra um excesso de Ni na paisagem, sem fonte atual.

O caráter precoce da silicificação em relação à alteração (laterítica) no silcrete, e a contribuição do dismantelamento deste silcrete na formação da laterita vermelha, evidenciam que as silicificações maciças dos platôs se deram num outro ciclo evolutivo. Os testemunhos de platôs representam, assim, a base de antigos perfis, o que confirma as deduções tiradas do estudo geomorfológico.

e) Esquema genético para a jazida de níquel de Barro Alto

Os platôs silicificados podem ser considerados como fragmentos um pouco rebaixados de um amplo nível de aplainamento, cujos testemunhos permanecem nos topos da zona gábrica oriental, e em vastas áreas aplainadas da zona anortosítica. A posição destes testemunhos, acima do nível Velhas, e o silcrete que os caracteriza na zona ultramáfica sugerem que eles pertençam à Planície Sul-Americana de idade Terciária inferior (King, 1956), por analogia com os outros maciços ultramáficos do Brasil (Melfi et al., 1979/1980). Vale salientar que, no Terciário, a Planície Sul-Americana já devia ser deprimida na zona ultramáfica.

A primeira fase de evolução da jazida de Barro Alto no Terciário inferior corresponde, portanto, à agradação da Superfície Sul-Americana. Depois das silicificações intensas nas bases dos antigos perfis, sob clima mais seco, houve lateritização das alteritas e acumulação residual de um primeiro estoque de Ni.

Com o ciclo Velhas, a partir do Terciário superior, esses antigos perfis foram erodidos e, em parte, depositados nas baixadas (laterita vermelha pro-parte), enquanto que do silcrete só restavam blocos e algumas raízes in-situ.

Com a fase de estabilidade Velhas, a alteração atua, conforme o esquema laterítico descrito acima, nas baixadas e, em menor grau, nas encostas convexas. Ele é contrariado pela erosão nas encostas íngremes e nos platôs.

Há uma contínua transferência de Ni, mecânica e química, das alturas em direção às baixadas. Isso explica o aparente excesso de Ni, cuja fonte deve ser localizada nos antigos perfis sul-americanos.

A jazida de Barro Alto enquadra-se no esquema geral de formação das jazidas brasileiras (Melfi et al, 1979/1980). Como em Barro Alto a erosão ainda não rebaixou toda a paisagem ao nível Velhas, o essencial do Ni ainda não atingiu as baixadas, enriquecendo os perfis notrónticos de encostas convexas. Isso constitui o traço mais original desta jazida.

#### BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, F.F.M. de - 1967 - Observações sobre o Précambriano da região Central de Goiás. Bol. Par. Geoc. 26 : 19-22.
- ANGEIRAS, A.G. - 1968 - A faixa de serpentinitos da Região Central de Goiás. Anais Acad. Bras. Ciênc. 40 : 129-136.
- ARAÚJO, V.A. de; MELLO, J.C.R. de; OGUINO, K. - 1972 - Projeto Niquelândia - Relatório final - Convênio DNPM/CPRM.
- BAETA, Jr., J.D.A.; FIQUEIREDO, A.N.de; SOUZA, E.P. de; MELLO, J.C. R. de - Projeto Goianésia - Barro Alto - Relatório final - Convênio DNPM/CPRM.
- BARBOSA, O.; BAPTISTA, M.B.; BRAUN, O.P.G.; CARTNER-DYER, R. et al. 1969 Projeto Brasília - DNPM/PROSPEC S/A.
- BERBERT, C.O. - 1970 - Geologia Geral dos complexos básicos e ultrabásicos de Goiás. XXIV Congr. Bras. Geol. (Brasília), resumo.
- BRAUN, O.P.G. - 1970 - Contribuição à Geomorfologia do Brasil Central. Rev. Bras. Geograf. 32 (3): 3-39.
- CORDANI, U.G.; HASUI, Y. - 1975 - Comentários sobre os dados geocronológicos disponíveis para a folha Goiás. In Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo - Folha Goiás.
- DA COSTA, L.A.M. e ANGEIRAS, A.G. - 1971 - Geosynclinal evolution in the epi-Baykalian Platform of Central Brazil - Geol. Rundschau Bd. Stuttgart. 60 (2).
- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL - 1975 - Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo - Folha Goiás (SD22) - Coordenador: Carlos Schobbenhaus Filho - Brasília.
- FIGUEIREDO, A.N.de; MOTTA, J.; MARQUES, V.J. - 1975 - Estudo comparativo entre os complexos de Barro Alto e do Tocantins, Goiás - Rev. Bras. de Geoc. 5 : 15-29.

- FIGUEIREDO, A.N. de - 1978 - Geologia e mineralização do extremo norte do Complexo de Barro Alto - GO - Tese de Mestrado nº 4- Universidade de Brasília - Depto de Geociências - 104p.
- FLEISCHER, R.; ROUTHIER, P. - 1970 - Quelques grands thèmes de la géologie du Brésil - Miscellanées géologiques et métallogéniques sur le Planalto - Sc. de la Terre 15 (1) : 45-102.
- KING, L.C. - 1956 - A Geomorfologia do Brasil Oriental - Rev. Bras. Geograf. Ano 18. 2 : 147-265.
- MELFI, A. - 1974 - Características geoquímicas e mineralógicas dos estádios iniciais da alteração superficial das rochas ultrabásicas de Barro Alto (GO) - Bol. IGUSP - 5 : 117-128.
- MELFI, A.J.; TRESCASES; J.J.; OLIVEIRA, S.M.B. de - 1979/1980 - Les "l<sub>a</sub>térites" nickélicifères du Brésil - Cah. ORSTOM. Ser. Geol. XI : 15-42.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (M.M.E.) da República Federativa do Brasil - 1979 - Anuário Mineral Brasileiro - Brasília.
- OLIVEIRA, S.M.B. de - 1980 - Alteração intempérica das rochas ultrabásicas de Santa Fé (GO) e gênese do depósito niquelífero - Tese de Doutorado - IGUSP. 216p.
- OLIVEIRA, S.M.B. de; TRESCASES, J.J. - 1980 - Geoquímica da alteração supérgena das rochas ultramáficas de Santa Fé (Goiás Brasil) - Rev. Bras. Geoc. 10 (4): 243-257.
- SOUZA, A. de - 1973 - Geologia e Geocronologia do Complexo Barro Alto, Goiás - Tese de Doutorado. FFCL Rio Claro, SP.
- STACHE, G.A. - 1974 - Untersuchungen zur Geologie, Petrographie, Metamorphose und Genese des basisch-ultrabasischen Massivs von Barro Alto/Goiás (Brasilien). These Techn. Univ. Clausthal.
- THAYER; T.P. - 1972 - Some observations and problems concerning the peridotites and peridotite-gabro complexes of the Goiás belt. XXVI Congresso Bras. Geol. Belém, resumo, I : 37.