

NÃO CIRCULA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900008617

**EVOLUÇÃO GEOQUÍMICA E MINERALÓGICA DOS
PRODUTOS DE ALTERAÇÃO INTEMPÉRICA
SOBRE AS ROCHAS DO COMPLEXO ALCALINO-
CARBONATÍTICO DE CATALÃO I, GOIÁS**

Rosely Aparecida Liguori Imbernon



Orientadora: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

	nome	ass.
Presidente:	Dra. S.M.B. de Oliveira	<u>Suzete</u>
Examinadores:	Dra. M.C. Toledo-Groke	<u>Juliana</u>
	Dr. M.L.L. Formoso	<u>Carola</u>

**SÃO PAULO
1993**

**Para JOÃO FRANCISCO, meu filho.
Para FRANCISCO CAPEL, meu pai.**

AGRADECIMENTOS

À Profa Dra Sônia Maria Barros de Oliveira que me orientou durante esse trabalho com seriedade, dedicação e objetividade. Pela amizade e compreensão, dosados sem paternalismos, que me proporcionaram a tranquilidade necessária à conclusão deste trabalho.

À GOIASFÉRIL S/A, em especial ao geólogo Carlos Cordeiro Ribeiro, ao gerente de produção engenheiro Vicente Humberto Lobo Cruz e aos técnicos Sandra, Kátia e João de Deus, que muito colaboraram nas etapas de campo.

À Mineração Catalão de Goiás Ltda., em especial aos geólogos Manfred Luis Baecker e Luis Carlos Assis, pela atenciosa recepção e colaboração nas etapas de campo..

À Profa Dra Maria Cristina Toledo-Broke pelas sugestões e discussões nas fases finais deste trabalho.

Aos professores doutores deste Instituto José Vicente Valareli, Excelso Ruberti, Mário Figueiredo, Koji Kawashita, Raphael Hypólito, Thomas Fairchild, Joel B. Sícolo, Adilson Carvalho, Wilson Teixeira, Daniel Atencio pela atenção dispensada quando solicitados para esclarecimentos de dúvidas.

Ao Prof. Dr. Ronaldo Rocha e ao técnico Helder, do NUPEGEL-IAG-USP, pelas orientações e discussões durante a utilização do microscópio eletrônico de varredura e analisador pontual.

À Dra Ana Maria Figueiredo, IPEN-CNEN, pelas determinações por ativação neutrônica para ETR apresentadas neste trabalho.

À bibliotecária Estela pela eficiente correção e uniformização das referências bibliográficas citadas neste trabalho, bem como aos demais funcionários da biblioteca deste Instituto.

Às secretárias do Departamento de Geologia Geral, Nícia e Sônia, pela paciência e colaboração.

À todos os funcionários deste Instituto pela

colaboração, sempre dispensada, quando solicitados.

Ao grande amigo Benedicto Luis de Oliveira Martins,
pelo apoio e cooperação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e
Tecnológico - CNPq pela contribuição à realização deste
trabalho através da concessão de auxílios financeiros.

Enfim, a todos os amigos que me apoiaram, com
carinho e confiança, sem os quais seria muito mais árdua a
realização e conclusão deste trabalho.

A todos muito obrigado.

RESUMO

O Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I situa-se no estado de Goiás, a aproximadamente 280 km ao sul de Brasília.

Constitui-se num corpo semi-circular com cerca de 6 km de diâmetro. Compõe, juntamente com os complexos de Araxá, Catalão II, Salitre I e II e Tapira, um grupo de complexos alcalinos pertencentes à província do Alto Paranaíba, que intrudiram em metassedimentos proterozóicos do Grupo Araxá.

As rochas frescas são principalmente glimmeritos cortados por veios carbonatíticos, podendo ocorrer restritos corpos de piroxenito e peridotito. Anatásio, vermiculita, minerais de terras raras, apatita e pirocloro são os principais minerais de interesse econômico relacionados à intrusão carbonatítica.

A ação do intemperismo foi bastante intensa sobre o complexo. O relevo do maciço foi mantido graças à resistência das rochas quartzíticas fenitizadas que o circundam, o que permitiu o aprofundamento dos perfis de alteração que podem chegar a mais de 100 metros de espessura no centro do complexo. É um processo tipicamente laterítico que gerou concentrações residuais de apatita e pirocloro nos níveis intermediários do perfil de alteração. Esses minérios são atualmente explorados.

Os ETR foram concentrados pelo hidrotermalismo, constituído por materiais silicificados ricos em monazita. Também o intemperismo concentrou esses elementos na forma de fosfatos aluminosos secundários do grupo da plumbogumita e florencita.

A intensa silicificação observada no complexo é em sua grande parte de origem hidrotermal. Ocorre, localizadamente, silicificação intempérica em certos horizontes do perfil de alteração.

ABSTRACT

The Alkaline-Carbonatic Complex of Catalão I is located in the state of Goiás, approximately 280 km south of Brasília. Together with the Araxá, Catalão II, Salitre I and II, and Tapira alkaline complexes within the Alto Paranaíba alkaline province. Catalão I is a semi-circular body 6 km in diameter which intruded Proterozoic metasediments of the Araxá Group in the Cretaceous.

Principal rock types are glimmerites cut by carbonatites veins. Restricted bodies of pyroxenite and peridotite may also occur. Anatase, vermiculite, REE-bearing minerals, apatite, and pyrochlore are the main minerals of economic interest related to this carbonatitic intrusion.

Although intensely weathered, the complex is dome-shaped, its relief sustained by the resistance of the surrounding, fenitized quartzite rocks, which also permitted weathering profiles to reach more than 100 meters in depth.

Typical lateritic processes generated residual concentrations of apatite and pyrochlore at intermediate levels of the weathering profile. These are presently being exploited. Rare earth elements are concentrated in monazite in hydrothermally silicified horizons and in secondary aluminous phosphates of the plumbogummite and florencite groups by weathering. Most of the silicification observed in the complex is of hydrothermal origin. Weathering silicification occurs locally in alteration levels.

It's a semi-circular body with 6 km of diameter. Put together with the Araxá, Catalão II, Salitre I and II and Tapira complexes, a group of alkaline complexes which belong to Alto Paranaíba province, which intruded in proterozoic metasediments of the Araxá Group.

The fresh rocks are essentially glimmerites crossed by carbonatites veins, pyroxenites and peridotites

restricted bodies may also occur. Anatase, vermiculite, REE bearing minerals, apatite and piroclore, are the main minerals of economic interest related to carbonatitic intrusion.

The weathering action was intensive over the complex and the massive relief was sustained by the resistance of the fenitized quartzites rocks which surround it, what permitted the deepening of the weathering profiles which can reach more than 100 meters of thickness in the complex centre.

It's a typical lateritic process which generate residual concentrations of apatite and piroclore in the intermediary levels of the weathering profile, which constitute natural deposits and are presently explorated.

Minerals bearing REE are concentrated with monazite, associated at silicified horizons, and secoundaries aluminous phosphates of the plumbogumite and florencite group.

The great silicification observed in the complex is mostly of hydrothermal origin. Weathering silicification occurs locally in alteration levels.

ÍNDICE

Agradecimentos	
Resumo	
Abstract	
Abreviações	i
índice de Figuras	ii
índice de Fotos	v
índice de Tabelas	vi

INTRODUÇÃO

.A importância econômica do estudo de carbonatitos	i
.Características gerais dos mantos de alteração sobre Complexos Alcalino-Carbonatíticos	2
.Objetivos deste trabalho	8

CAPÍTULO I

.O Maciço de Catalão I	9
1. Localização	10
2. Aspectos fisiográficos e clima	10
3. Geologia regional	13
4. Geologia do Complexo	14
- Rochas ultramáficas e metassomatizadas	15
- Rochas carbonatíticas	16
- Fenitos	17

CAPÍTULO II

Materiais e Métodos	18
1. Materiais	
a) Perfil "A"	18
b) Perfil "B"	19
c) Furos de sondagem	20
2. Métodos	
a) Amostragem	20
b) Preparação das amostras	21
c) Técnicas analíticas	22
d) Tratamento estatístico dos dados	23

CAPÍTULO III

Os furos de sondagem	24
1. Caracterização química do perfil de alteração	25
2. Balanço geoquímico	41
3. Relação entre as variáveis	43
4. Evolução mineralógica	49
CONCLUSÕES	51

CAPÍTULO IV

Os perfis de alteração	
1. O perfil "A".....	53
a) Caracterização macroscópica do perfil de alteração.....	55
b) Caracterização mineralógica dos hori- zontes presentes	
Rocha Fresca.....	59
Horizonte rocha alterada.....	61
Horizonte saprolito.....	62
Horizonte Laterítico.....	63
Cobertura Superficial.....	64
c) Composição química dos horizontes presen- tes	
Rocha Fresca.....	65
Horizonte rocha alterada.....	66
Horizonte saprolito.....	68
Horizonte Laterítico.....	70
Cobertura Superficial.....	70
2. O perfil "B".....	73
a) Caracterização macroscópica do perfil de alteração.....	73
b) Caracterização mineralógica dos horizontes presentes	
Horizonte de saprolito silicifi- cado.....	74
Horizonte de saprolito minerali- zado.....	74
Solo laterítico.....	78
CONCLUSÕES.....	78

CAPÍTULO V

O estudo das apatitas	
1. Introdução.....	84
2. Apatitas de Catalão I.....	86
Composição química das apatitas.....	91
CONCLUSÕES.....	96

CAPÍTULO VI

O comportamento dos ETR durante a alteração intempé- rica.....	97
1. O perfil "A".....	98
_ Horizonte rocha alterada.....	98
_ Horizonte de saprolito.....	101
_ Horizonte laterítico e cobertura superficial.....	102
_ Facies particulares	104

2. Materiais enriquecidos em ETR	
a) Amostras provenientes da área do per-	
fil "B".....	105
. Caracterização mineralógica.....	105
. Caracterização química	
- Elementos maiores e traços das	
amostras SC.....	107
- ETR das amostras SC.....	114
b) Amostras provenientes dos furos de son-	
dagem.....	114
CONCLUSÕES.....	117
CAPÍTULO VII	
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123

ABREVIACOES

A = apatita
B = barita
C = calcita
D = dolomita
F = fosfatos aluminosos secundários do grupo da plumbogumita
e florencita
Fl = flogopita
G = goethita
K = caulinita
M = monazita
Mg = magnetita
Ol = olivina
P = pirocloro
Q = quartzo
V = vermiculita

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - Mapa de formações superficiais e pontos de amostragem do complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I.....	ii
FIGURA 2 - Diagramas TEOR x PROFUNDIDADE para elementos maiores do Furo "A".....	29
FIGURA 3 - Diagramas TEOR x PROFUNDIDADE para elementos maiores do Furo "B".....	30
FIGURA 4 - Diagramas TEOR x PROFUNDIDADE para elementos maiores do Furo "C".....	31
FIGURA 5 - Diagramas TEOR x PROFUNDIDADE para elementos maiores do Furo "D".....	32
FIGURA 6 - Principais características do perfil ideal (médias e desvios padrões relativos em %).....	40
FIGURA 7 - Representação gráfica para dois fatores rotacionados.....	48
FIGURA 8a - Esquematização do Perfil A.....	54
FIGURA 8b - Esquematização do Perfil B.....	54
FIGURA 9 - Esquematização do nível A1 (Perfil A).....	56
FIGURA 10 - Esquematização do nível A1 (Perfil A).....	56
FIGURA 11 - Difratograma de raios-X da amostra A1MG.....	57
FIGURA 12 - Esquematização do nível A4 (Perfil A).....	57
FIGURA 13 - Difratogramas de raios-X de amostras do horizonte de rocha fresca (H4).....	60
FIGURA 14 - Difratograma de raios-X da amostra A2 no horizonte de rocha alterada (H3).....	60
FIGURA 15 - Difratogramas de raios-X das amostras A3, A4 e A5 do horizonte saprolítico (H2).....	62
FIGURA 16 - Difratogramas de raios-X das amostras A6 e A7 do horizonte laterítico (H1) e A8 da cobertura superficial.....	64
FIGURA 17 - Difratogramas de raios-X das facies particulares do perfil A.....	67
FIGURA 18 - "Aranhograma" para as amostras do horizonte de rocha fresca e de rocha alterada.....	71

FIGURA 19 - "Aranhograma" para as amostras do horizonte de rocha fresca e saprolítico.....	71
FIGURA 20 - "Aranhograma" para as amostras do horizonte de rocha fresca, laterítico e cobertura superficial.....	72
FIGURA 21 - Difratogramas de raios-X das amostras dos horizontes inferiores do perfil B.....	75
FIGURA 22 - Diagrams de ATD das amostras do perfil B.....	76
FIGURAS 23 e 24 - Espectros EDS para o centro e borda, respectivamente, do pirocloro da amostra B4.....	79
FIGURA 25 - Difratogramas de raios-X das amostras dos horizontes superiores do perfil B.....	81
FIGURA 26 - Difratogramas de raios-X da fluorapatita do concentrado de rocha fosfática (C1) de Catalão I	86
FIGURA 27 - Curvas dos teores de ETR normalizados para o condrito de apatitas de Catalão I	93
FIGURA 28 - Curvas dos teores de ETR normalizadas para o condrito do horizonte rocha fresca e horizonte rocha alterada.....	100
FIGURA 29 - Curvas dos teores de ETR normalizadas para o condrito do horizonte rocha fresca e horizonte saprolític.....	101
FIGURA 30 - Curvas dos teores de ETR normalizadas para o condrito do horizonte rocha fresca e horizonte laterítico e cobertura superficial.....	102
FIGURA 31 - Diagrama triangular SrO-CaO-TReO ₃	103
FIGURA 32 - Curvas dos teores de ETR normalizadas para o condrito do nível A4 e facies particulares A4S e A4M.....	104
FIGURA 33 - Curvas dos teores de ETR normalizadas para o condrito do nível A5 e facies particular A5G.....	105
FIGURA 34 - Difratogramas de raios-X das amostras SC (material silicificado enriquecido em ETR).....	106
FIGURA 35 - Difratogramas de raios-X de material esverdeado extremamente enriquecido em ETR.....	109
FIGURA 36 - Espectros EDS de óxidos de Mn e Ba.....	110

FIGURA 37 - Espectros EDS de óxidos de Mn, Ba e ETR	111
FIGURA 38 - Espectros EDS de amostra de material esverdeado (monazita) no nível B6 do perfil B.....	112
FIGURA 39 - Espectros EDS de amostra de material esverdeado (monazita) no nível B5 do perfil B.....	113
FIGURA 40 - Esquematização dos furos de sondagem e mineralogia determinada por DRX.....	115
FIGURA 41 - Curvas dos teores de ETR normalizadas para o condrito para amostras do horizonte rocha fresca e amostras silicificadas extremamente enriquecidas em ETR (SCI, SCII e SCIV).....	116

ÍNDICE DE FOTOS

- FOTO 1 - Vista geral do complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I, a partir da cidade de Catalão, Goiás...12
FOTO 2 - Vista da frente de lavra 4 da área 1 da mina da Goiasfértil (Perfil A).....19
FOTO 3 - "Boxwork" de quartzo e goethita (Perfil B).....77
FOTO 4 - Pirocloro da amostra B4 com zoneamento.....77
FOTO 5 - Pseudomorfos de pirita, formados por goethita da amostras B4.....80
FOTO 6 - Plasma ferruginoso com cristais de quartzo arredondados no horizonte de solo laterítico.....80
FOTO 7 - Fotomicrografia de apatitas do concentrado de rocha fosfática (C1).....88
FOTO 8 - Fotomicrografia de apatita com cavidades superficiais de dissolução da apatita do concentrado de rocha fosfática (C1).....88
FOTO 9 - Fotomicrografia de figuras de corrosão como canais orientados sobre as faces de cristais de apatita do concentrado de rocha fosfática (C1).....89
FOTO 10 - Amostra de material silicificado extremamente enriquecido em ETR, da área do perfil B.....105
FOTO 11 - Detalhe da fotomicrografia 9.
FOTO 12 - Fotomicrografia de apatita no nível B5 associada à monazita109
FOTO 13 - Fotomicrografia de óxidos de Mn e Ba.....111
FOTO 14 - Fotomicrografia de óxidos de Mn, Ba e ETR.....110
FOTO 15 - Fotomicrografia de monazita fibrosa.....112
FOTO 16 - Fotomicrografia de monazita no fomatos de placas.....113

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - Dados químicos para elementos maiores do furo de sondagem "A".....	25
TABELA 2 - Dados químicos para elementos maiores do furo de sondagem "B".....	26
TABELA 3 - Dados químicos para elementos maiores do furo de sondagem "C".....	27
TABELA 4 - Dados químicos para elementos maiores do furo de sondagem "D".....	28
TABELA 5 - Dados geoquímicos (média e desvio padrão) para os horizontes definidos para o Furo "A".....	34
TABELA 6 - Dados geoquímicos (média e desvio padrão) para os horizontes definidos para o Furo "B".....	35
TABELA 7 - Dados geoquímicos (média e desvio padrão) para os horizontes definidos para o Furo "C".....	36
TABELA 8 - Dados geoquímicos (média e desvio padrão) para os horizontes definidos para o Furo "D".....	37
TABELA 9 - Estatísticas básicas calculadas para o horizonte H1.....	38
TABELA 10 - Estatísticas básicas calculadas para o horizonte H2.....	39
TABELA 11 - Estatísticas básicas calculadas para o horizonte H3.....	40
TABELA 12 - Estatísticas básicas calculadas para o horizonte H4.....	41
TABELA 13 - Balanço geoquímico esotí (perdas e ganhos porcentuais em relação a H4).....	42
TABELA 14 - Coeficientes de relação Pearson entre as variáveis.....	46
TABELA 15a - Comunalidades e valores próprios para os dez fatores calculados.....	47
TABELA 15b - "Loadings" para cada variável em cada um dos fatores rotacionados.....	47
TABELA 15c - Comunalidades estimadas para dois fatores rotacionados.....	47

TABELA 16 - Composição química para elementos maiores de amostras do horizonte rocha fresca (H4).....	66
TABELA 17 - Composição química para elementos maiores de amostras dos horizontes de alteração.....	67
TABELA 18 - Análises químicas pontuais semi-quantitativas (EDS e quantitativas de apatitas primárias.....	92
TABELA 19a - Dados analíticos para ETR para apatitas de complexos alaclinos-carbonatíticos do Brasil e apatitas concentradas de Ctalão I.....	93
TABELA 19b -Dados analíticos para ETR para apatitas de complexos alaclinos-carbonatíticos do Brasil e apatitas concentradas de Ctalão I.....	94
TABELA 20 - Dados analíticos para ETR (ppm) das amostras do horizonte de rocha fresca.....	99
TABELA 21 - Dados analíticos para ETR (ppm) das amostras dos horizontes de alteração.....	99
TABELA 22 - Composição química de amostra silicificada ricas em ETR da área do perfil B.....	108
TABELA 23 - Dados analíticos para ETR (ppm) das amostras silicificadas ricas em ETR da área do perfil B (SCI, SCII e SCIV) e da monazita (%).....	108
TABELA 24 - Dados analíticos de TR _e O ₈ e razões (La/Yb) _H para os furos de sondagem.....	117

INTRODUÇÃO

Ao final do século XIX já se supunha a existência de rochas ígneas caracteristicamente ricas em carbonatos (HEINRICH, 1966). Somente no início do século, com a descoberta do mineral pirocloro no Complexo de Fen, por Goldschmidt, foi despertado o interesse econômico por este litotípico. Iniciaram-se as primeiras pesquisas sobre carbonatitos e, desde então, os fenômenos relacionados ao magmatismo, diferenciação e segregação magmática destas rochas têm gerado controvérsias entre diversos pesquisadores (HEINRICH, 1966; BELL, 1989).

Na última década, os estudos sobre rochas carbonatíticas têm se intensificado, e atualmente cerca de 330 ocorrências de carbonatitos são conhecidas (BELL, 1989). Em geral rochas alcalinas estão associadas às manifestações carbonatíticas, porém a recíproca nem sempre se apresenta.

A anômala abundância de elementos químicos incompatíveis em magmas carbonatíticos leva a uma paragênese rica em espécies minerais raras e de grande importância econômica, principalmente quando associada aos intensos processos de intemperismo laterítico. Assim, podem concentrar-se certos elementos no manto de alteração, como P, Nb, ETR, Ti e Zr, formando depósitos de interesse econômico.

Atualmente a exploração de depósitos de fosfatos (apatita), nióbio (pirocloro), vermiculita, titânio, cobre e ETR, entre outros, se desenvolve em mais de uma dezena de complexos em todo o mundo.

CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MANTOS DE ALTERAÇÃO SOBRE COMPLEXOS ALCALINO-CARBONATÍTICOS

Em escala mundial, os complexos alcalino-carbonatíticos apresentam-se bastante suscetíveis aos processos intempéricos, em especial os complexos localizados em ambientes favoráveis à laterização, desenvolvendo mantos de alteração laterítica de dezenas a centenas de metros de espessura. Exemplos de mantos lateríticos desenvolvidos sobre carbonatitos são citados em trabalhos realizados no sudeste da África e sudeste, centro-oeste e norte do Brasil (REEDMAN 1984; COSTA 1987; QUASH 1987; BRAGA & BORN 1988; CORRÉA *et al.* 1988; FLICOTEAUX & WALTER 1988; LAVAL *et al.* 1988; ALCOVER NETO & TOLEDO-GROKE 1989; LEMOS & COSTA 1989; LOUREIRO *et al.* 1989; FLICOTEAUX *et al.* 1990; GOMES *et al.* 1990; LEMOS 1990; SOUBIÈS *et al.* 1990; ALCOVER NETO 1991; PEREIRA 1991; TOLEDO-GROKE & SOUZA, 1991; WALTER 1991) e também na antiga URSS e Austrália (PROGREBNDI *et al.* 1977; KAPUSTIN 1981; ELIANOV *et al.* 1981; SLUKIN *et al.* 1985; LOTTERMOSER 1990).

O clima é fator predominante na formação de mantos lateríticos, e qualquer litotipo quando exposto a climas quentes e úmidos de zona intertropical desenvolve espessos mantos de alteração intempérica. No entanto, sobre rochas carbonatíticas e associadas, mantos de alteração são citados em regiões geográficas não favoráveis a estes processos. No maciço de Sokli, na Finlândia, são descritas coberturas supérgeas de 25 a 75 metros de espessura (VARTIAINEN & PAARMA, 1979), e no complexo carbonatítico de Cargil em Ontário, Canadá, uma cobertura fosfática residual apresenta variação de zero a 170 metros de espessura (DEANS, 1978); sobre complexos carbonatíticos da antiga URSS, alteritas são descritas com espessuras variáveis entre 150 a 300 metros (SLUKIN *et al.*, 1985). Quando associamos as idades prováveis para esses mantos de alteração à reconstrução paleogeográfica elaborada por BARDOSSY (1981) para estudar

os paleoambientes de lateritas e bauxitas lateríticas no mundo, podemos perceber que, a exemplo do que ocorre com as bauxitas, os mantos de alteração sobre carbonatitos hoje sob clima temperado, formaram-se sob clima tropical.

Estudos realizados em crostas lateríticas no Escudo Africano demonstraram que a evolução dos mantos de alteração naquela região ocorreram durante o pré-Quaternário ou pré-Holoceno (KAPUSTIN, 1971; DOBROVOL'SKIY, 1971 *apud* KAPUSTIN, 1981), enquanto que os mantos de alteração sobre os corpos carbonatíticos e rochas associadas na antiga URSS são citados como de idade cretáceo-paleogênica (SLUKIN *et al.*, 1985). DOBROVOL'SKIY (1971 *apud* KAPUSTIN, 1981) cita como de provável idade pré-quaternária mantos de alteração sobre corpos carbonatíticos no Brasil e VALARELLI (1971), CRUZ & CHENEY (1976), FELICÍSSIMO Jr. (1978) e OLIVEIRA *et al.* (1988) sugerem que os mantos alteríticos que se desenvolveram sobre os complexos alcalino-carbonatíticos de Catalão I (GO), Tapira (MG), Juquiá (SP) e Jacupiranga (SP) teriam provável idade terciária. Observa-se que não há uma definição exata para as idades de formação de mantos lateríticos, porém, a partir da análise das condições paleoclimáticas em vários continentes, DOBROVOL'SKIY (1971) e KAPUSTIN (1973) (*apud* KAPUSTIN, 1981) sugeriram que durante o Fanerozóico ocorreram os melhores períodos de formação de mantos de alteração, sendo mais intensos no limite Devoniano/Carbonífero ou Carbonífero/Permiano e extremamente intensos no Cretáceo Superior/Eoceno.

As rochas carbonatíticas são basicamente formadas por carbonatos (HEINRICH, 1966) que, por definição, somam mais de 50% em volume da rocha. Os carbonatos são facilmente alteráveis em condições de intemperismo químico. Podemos citar como exemplo a recente erupção de Ol Doinyo Lengai, ocorrida em 1960 na África, onde após 1 a 2 anos já se observou a ação dos mecanismos da alteração intempérica sobre as rochas carbonatíticas (KAPUSTIN, 1981). Em lateritas de Mrina Hill, no Quênia, foi sugerido que 5 a 10

volumes de rocha carbonatítica devem ser alterados para produzir 1 volume de laterita (COTZEE & EDWARDS, 1959 apud LOTTERMOSEN, 1990), e, em estudo genérico dos processos intempéricos sobre carbonatitos, KAFUSTIN (1981) admite um decréscimo da ordem de 4 vezes na densidade da rocha fresca para sovitos intemperizados.

As rochas carbonatíticas podem formar um núcleo independente no complexo ou, mais comumente, apresentar-se como pequenos "plugs" ou "stocks", "cones-sheets", "ring dikes" e "stockworks" que cortam as rochas associadas no complexo. Nesse caso, nem sempre é perceptível a mistura dos vários tipos litológicos nos produtos de alteração intempérica, em virtude da homogeneização imposta a estes materiais pelos processos lateríticos.

Os perfis de alteração desenvolvidos sobre carbonatitos e rochas associadas variam não só segundo os diferentes tipos de carbonatito e os controles do intemperismo, mas, sobretudo, segundo o grau de individualização do carbonatito em relação às rochas associadas. No entanto, uma análise da literatura que descreve perfis de alteração desenvolvidos sobre carbonatitos e rochas associadas possibilitou a identificação de um perfil genérico composto de 3 horizontes de alteração superpostos à rocha sã.

Na rocha sã, os carbonatos mais abundantes são calcita e dolomita; carbonatos ferromagnesianos, do tipo ankerita, magnesita e siderita, e carbonatos de elementos terras raras como parisita, bastnaesita e synchisita podem ocorrer acessoriamente (KAFUSTIN, 1971). São descritos, ainda, como minerais essenciais magnetita, apatita, barita, fluorita, hematita (HEINRICH, 1966; KAFUSTIN, 1971); thermonatrita e carbonatos de Ca, Na e K ocorrem no carbonatito de Ol Doinyo Lengai. Como minerais acessórios, são comuns pirocloro, quartzo, perovskita, pirita, ilmenita, rutilo, monazita, flogopita, titanita, zircão, egerina-augita, egerina, galena, esfalerita, calcopirita, pandaita,

pirrotita, baddeleyta, betafita, columbita, fermita, stroncianita, olivina, microclínio, ortoclásio, nefelina, clorita, vermiculita, antigorita, crisotilo, riebeckita, diopsídio, vesuvianita, wolastonita e albita (HEINRICH, 1966; KAPUSTIN, 1971).

No primeiro horizonte de alteração imediatamente sobreposto à rocha sã, aqui definido como horizonte inferior, ocorre a preservação das estruturas da rocha-mãe. A passagem do carbonatito para rocha alterada é progressiva, sendo a dissolução dos carbonatos responsável pelo aparecimento de porosidade no material (WALTER, 1991). Os minerais do grupo da apatita, mais resistentes à ação intempérica que os carbonatos, são preservados neste horizonte, assim como magnetita, barita e pirocloro. A presença de argilo-minerais como caulinitas e esmectitas é citada por alguns autores (KAPUSTIN, 1981; ELIANOV *et al.*, 1981; REEDMAN, 1984; COSTA, 1987; QUASH, 1987; LEMOS, 1990; LOTTERMOSE, 1990), e pode estar relacionada mais diretamente às rochas associadas (glimmeritos, piroxenitos, dunitos, sienitos) que aos carbonatitos (SLUKIN *et al.*, 1985; BRAGA & BORN, 1988; LEMOS, 1990; WALTER, 1991). A goethita e outros produtos secundários de Fe e Mn podem estar presentes neste horizonte (SLUKIN *et al.*, 1985; ALCOVER NETO & TOLEDO-GROKE, 1989; ALCOVER NETO, 1991), revestindo parcial ou totalmente fragmentos de rochas, apatitas e outros minerais (BRAGA & BORN, 1988; WALTER, 1991; REEDMAN, 1984).

O horizonte intermediário ainda mostra texturas e estruturas da rocha-mãe, porém menos perceptíveis. Neste horizonte, os minerais do grupo da apatita apresentam os maiores teores de todo o perfil, e pode ser considerado o horizonte do minério de fosfato (PROGREBNOI, 1977). Os carbonatos são totalmente lixiviados, a apatita primária pode apresentar dissolução parcial (COSTA, 1987; LAVAL *et al.*, 1988; ALCOVER NETO & TOLEDO-GROKE, 1989; ALCOVER NETO, 1991) e a perovskita transforma-se em anatásio (SOURIÈS *et*

al., 1992); este início de alteração das apatitas coincide com o aparecimento de fosfatos secundários (SLUKIN *et al.*, 1985; COSTA, 1987; BRAGA & BORN, 1988; FLICOTEAUX & WALTER, 1988; LAVAL *et al.*, 1988; ALCOVER NETO & TOLEDO-GROKE, 1989; FLICOTEAUX *et al.*, 1990; LEMOS, 1990; SOUBIÈS *et al.*, 1992; ALCOVER NETO, 1991); apatitas secundárias podem estar associadas a produtos ferruginosos (SLUKIN *et al.*, 1985; WALTER, 1991). As micas são em geral flogopitas, apresentando-se parcial ou totalmente vermiculitzadas (PEREIRA, 1991; SOUBIÈS *et al.*, 1992), e a transformação de Ti-magnetitas em maghemita e hematita pode ser observada (SOUBIÈS *et al.*, 1992). O quartzo é um mineral comum nesse horizonte.

O horizonte superior é constituído por um material laterítico caracterizado pela total falta de estruturas ou texturas reliquias, resultado da dissolução da apatita primária (WALTER, 1991; SOUBIÈS, 1992). O enriquecimento em produtos ferruginosos (ELIANOV *et al.*, 1981; BRAGA & BORN, 1988; LAVAL *et al.*, 1988; ALCOVER NETO & TOLEDO-GROKE, 1989; LEMOS, 1990; WALTER, 1991) e fosfatos aluminosos secundários (BRAGA & BORN, 1988; CORREA *et al.*, 1988; LAVAL *et al.*, 1988; ALCOVER NETO & TOLEDO-GROKE, 1989; LEMOS, 1990; WALTER, 1991) é característico deste horizonte; minerais residuais como pirocloro, magnetita, apatita, barita e zircão podem também aí ocorrer. O quartzo pode ser encontrado em quantidades variáveis.

Durante a evolução de mantos de alteração sobre complexos alcalino-carbonatíticos, há uma perda de massa generalizada, e elementos como Mg, K, Ca e Na são quase que totalmente lixiviados do perfil (SLUKIN *et al.*, 1985). A liberação da sílica pela alteração de vários minerais silicatados pode resultar em silicificações secundárias (REEDMAN, 1984; SLUKIN *et al.*, 1985; BRAGA & BORN, 1988; SOUBIÈS *et al.*, 1992). Os elementos Fe e Mn comportam-se como em perfis de alteração laterítica sobre outros litotipos: ambos são acumulados em direção ao topo do

perfil, e podem apresentar-se associados ao Al, Nb, Ti, P, ETR, Ba, Sr, Zn e Zr (REEDMAN, 1984; SLUKIN *et al.*, 1985). Os minerais formados são goethita, hematita e oxi-hidróxidos de Mn, principalmente.

O fósforo apresenta teores mais elevados no nível intermediário do perfil. Próximo à superfície, a dissolução da apatita primária promove a sua mobilização, podendo se fixar na forma de fosfatos secundários, migrar para níveis mais inferiores onde se acumula como apatita secundária, ou ser lixiviado do perfil (REEDMAN, 1984; SLUKIN *et al.*, 1985; BRAGA & BORN, 1988; ALCOVER NETO & TOLEDO-GROKE, 1989; ALCOVER NETO, 1991). Os fosfatos aluminosos formados na crosta de alteração apresentam-se, em geral, enriquecidos em Ca, Sr, Ba e ETR (PROGREBNOI *et al.*, 1977; FLICOTEAUX & LUCAS, 1984; COSTA, 1987; LEMOS & COSTA, 1987; LOTTERMOSER, 1990; SOUBIÈS *et al.*, 1992); os ETR podem também ocorrer concentrados em pirocloros alterados (VALARELLI, 1971; SLUKIN *et al.*, 1985).

Em geral os fosfatos têm papel fundamental como armadilha para os ETR, durante a alteração intempérica. No entanto, em Tapira há uma forte ligação entre o titânio e estes elementos: os ETR estão ligados primariamente à perovskita e, nos materiais alterados, associam-se ao anatásio neoformado (SOUBIÈS *et al.*, 1992).

Os argilo-minerais, quando presentes, apresentam um acúmulo em direção ao topo do perfil. Em ambientes onde há excesso de fósforo, o alumínio forma, preferencialmente, fosfatos aluminosos, porém onde a lixiviação é mais intensa, ocorre a diminuição da concentração de íons fosfatos em relação ao Al disponível no perfil e, em decorrência, a formação de gibbsita torna-se possível. A presença de gibbsita em lateritas sobre carbonatitos, porém, é rara (SLUKIN *et al.*, 1985).

OBJETIVOS DESTE TRABALHO

No Brasil, os estudos sobre a alteração intempérica dos maciços alcalino-carbonatíticos teve início recentemente. Com relação ao Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I, objeto do presente trabalho, alguns artigos e teses foram apresentados, enfatizando, principalmente, as mineralizações de nióbio (pirocloro), fosfato (apatita), vermiculita, titânio (anatásio) e minerais de ETR (VALARELLI, 1971; CARVALHO, 1974 a, b e c; CARVALHO & ARAÚJO, 1974; CARVALHO & VALENÇA, 1974; BAECKER, 1983; GIERTH *et al.*, 1985a e b; GIERTH & BAECKER, 1985; HIRANO *et al.*, 1987).

O presente trabalho tem por objetivo determinar as tendências gerais do processo de alteração intempérica atuante sobre as rochas do Complexo, possibilitando uma caracterização química e mineralógica preliminar dos materiais encontrados nos perfis de alteração.

Está estruturado em sete capítulos, os quais estão relacionados aos seguintes temas:

- _ resumo do conhecimento científico à respeito do maciço de Catalão I (CAPÍTULO I);
- _ caracterização dos materiais amostrados e metodologia de trabalho (CAPÍTULO II);
- _ análise e interpretação dos dados químicos e de alguns dados mineralógicos referentes a 4 furos de sondagens da mina de fosfato da Goiasfértil (CAPÍTULO III);
- _ análise das características mineralógicas e geoquímicas de amostras representativas dos vários horizontes referentes a dois perfis de alteração amostrados (CAPÍTULO IV);
- _ estudo das apatitas de Catalão I (CAPÍTULO V);
- _ investigação preliminar sobre o comportamento dos ETR nos materiais estudados (CAPÍTULO VI);
- _ resumo dos principais resultados obtidos (CAPÍTULO VII).

CAPÍTULO I

O MACIÇO DE CATALÃO I

Descrito pela primeira vez por HUSSAK em 1894 (*apud* VALARELLI, 1971), que comparou suas observações às ocorrências de Ipanema e Jacupiranga, o complexo Catalão I recebeu esta denominação quando da realização do Projeto Chaminés (PROSPEC, 1966 *apud* CARVALHO, 1974a).

Até meados da década de 60, alguns trabalhos sobre o Complexo de Catalão I tinham sido apresentados, enfocando a presença de fosfatos e pirocloros associados aos carbonatitos (LEONARDOS, 1956; ABREU, 1963). A partir de 1966, estudos geológicos no Triângulo Mineiro e sul de Goiás (BARBOSA *et al.*, 1970; HASUI & CORDANI, 1968; HASUI *et al.*, 1970), e um programa de prospecção detalhado dos complexos ultramáfico-alcalinos da região do Alto Paranaíba realizado pelo DNPM (*apud* CARVALHO, 1974a) possibilitaram sondagens em Catalão I, a partir das quais estudos mais detalhados no complexo foram elaborados.

Um conjunto de trabalhos sobre a cartografia de formações superficiais, os aspectos geológicos e petrográficos, recursos minerais, prospecção radiométrica e perspectivas de aproveitamento econômico dos depósitos minerais associados foi apresentado em meados da década de 70 (VALARELLI, 1971; CARVALHO, 1974a e b; CARVALHO & VALENÇA, 1974; CARVALHO & ARAÚJO, 1974). A partir de 1970, a atividade mineira começou a ser incorporada à economia da região, até então tradicionalmente agropecuária.

No início dos anos 80, foram retomadas as pesquisas em Catalão I, enfocando a petrografia e a petrogênese a partir do estudo de testemunhos de sondagem (BAECKER, 1983). A caracterização mineralógica dos materiais frescos e alterados e a mineralização de nióbio foram estudados por BAECKER (1983), GIERTH *et al.* (1985a e b), GIERTH & BAECKER

(1985), HIRANO *et al.* (1987), DANNI *et al.* (1991). Mais recentemente, foi publicado um trabalho acerca da caracterização química preliminar dos minerais componentes dos principais tipos litológicos que compõem o Complexo (ARAÚJO & GASPAR, 1992).

1. LOCALIZAÇÃO

O Complexo de Catalão I está situado no município de Ouvidor, no sudeste goiano, 20 km a nordeste da cidade de Catalão. Distante de Brasília cerca de 300 km e de São Paulo 720 km, está interligado a estes dois grandes centros através da rodovia BR-050. Apresenta coordenadas geográficas 18° 08' de latitude S e 47° 48' de longitude W (FIGURA 1).

2. ASPECTOS FISIOGRÁFICOS E CLIMA

O Complexo de Catalão I constitui-se morfológicamente em um platô de forma sub-circular com seus eixos N-S e E-W medindo respectivamente 6,0 e 5,5 km. Destaca-se na paisagem (FOTO 1) formando um "chapadão" de altitude média de 900 metros, com um desnível de 100 metros em relação às rochas encaixantes. Este relevo resulta da erosão diferencial da superfície Sul-Americana de idade paleogênica, retomada no Ciclo Velhas, já no Terciário Superior (KING, 1956 *apud* Braun, 1971). Foi mantido graças à resistência das rochas quartzíticas fenitizadas que circundam o maciço. Estas rochas sustentam os topos, permitindo o aprofundamento dos perfis de alteração intempérica no interior do complexo.

A topografia interna do maciço apresenta relevo suave. Na porção centro-oeste do complexo, na área

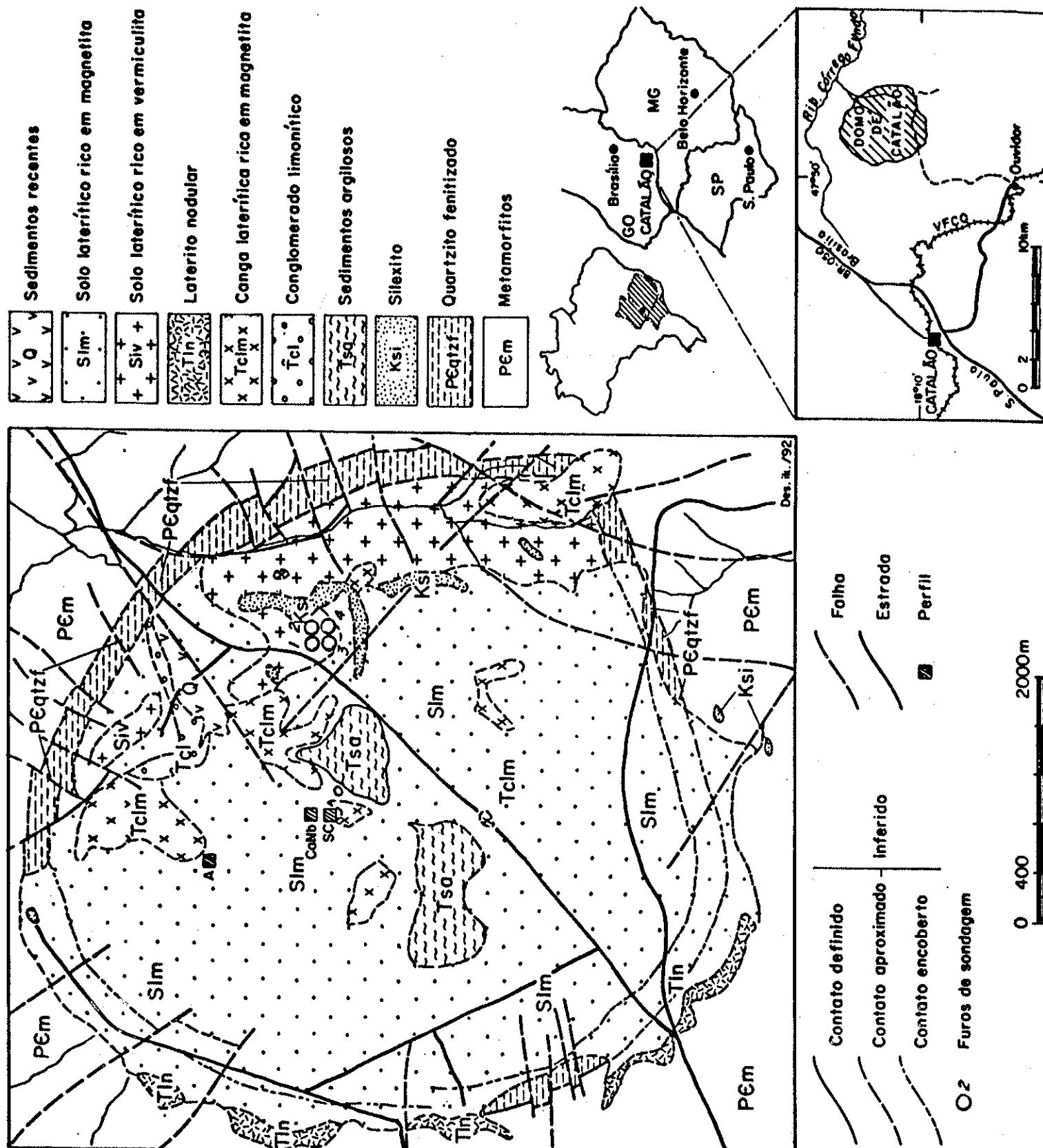


FIGURA 1 - Mapa de formações superficiais e pontos de amostragem do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão-I, Goiás (BAECKER, 1983, a partir de CARVALHO, 1974b).

denominada Lagoa Seca, podem-se observar restos de uma área deprimida resultante de antiga caverna formada na rocha carbonatítica. Essa feição é característica de alguns complexos carbonatíticos da região. A drenagem interna é controlada por falhamentos e a externa apresenta padrão radial anelar.

O clima tropical úmido é predominante na região, com temperatura média anual de 22°C (IBGE, 1988; NIMER, 1989) e precipitação média anual de 1750 mm (IBGE, 1988). Durante a primavera e o verão, predominam as temperaturas elevadas, com máxima térmica de 30°C em setembro. Estabelece-se uma estação de alta pluviosidade entre os meses de setembro-outubro a março-abril. No inverno, temperaturas mais amenas são predominantes e uma estação seca fica definida neste período.

A cobertura vegetal constitui-se, principalmente, de uma variedade de cerrado conhecida como cerradão, apresentando abundância de babaçus.



FOTO 1 - No horizonte, vista geral do Complexo de Alcalino-Carbonatítico de Catalão I, a partir da cidade de Catalão, GO

3. GEOLOGIA REGIONAL

O Complexo de Catalão I, juntamente com os complexos de Araxá, Catalão II, Salitre I e II e Tapira, pertence à província do Alto Paranaíba (ULBRICH & GOMES, 1981) que representa um grupo de complexos alcalinos intrusivos em metassedimentos proterozóicos, ao longo da margem sudeste do Cráton de São Francisco. Esses complexos localizam-se numa extensa faixa constituída pelas coberturas dobradas Uruacu e Brasília, compreendidas entre o Maciço Mediano de Goiás a noroeste, a borda da Bacia do Paraná a oeste e o Cráton de São Francisco a leste.

O embasamento mais antigo da região é constituído por rochas graníticas e gnáissicas, essencialmente de composição granodiorítica com intercalações de anfibolitos de idade provavelmente arqueana (DYER, 1969; BARBOSA, 1970). As rochas supracrustais proterozóicas que envolvem a estrutura e servem como encaixantes à intrusão de Catalão I são metamorfitos do Grupo Araxá, pertencentes à fácies epidoto-anfibolito e constituídos principalmente por micaxistas com intercalações de delgados leitos de quartzitos e raros anfibolitos (BARBOSA, 1955 *apud* CARVALHO, 1974a).

Diversos autores têm citado uma relação entre o tectonismo e o desenvolvimento dos complexos alcalinos da região. ALMEIDA (1967; 1971; 1972) apontou tal relação, associando-a à ativação mesozóica da Plataforma Sul Americana durante o Cretáceo.

O agrupamento dos complexos alcalinos cretácicos da faixa Minas Gerais-Goiás numa província foi proposto por ULBRICH & GOMES (1981), baseado em estudos petrográficos, geocronológicos e regionais. GOMES *et al.* (1990), numa revisão sobre os complexos carbonatíticos do Brasil, destacaram seus aspectos tectônicos e a presença de uma fase carbonatítica terminal nos grandes complexos alcalinos da Província do Alto Paranaíba.

Determinações isotópicas K/Ar para os principais complexos da Província do Alto Paranaíba posicionam no Cretáceo superior o auge do magmatismo gerador destes corpos (MACHADO JR., 1991).

A feição comum a todos os complexos alcalino-carbonatíticos da Província do Alto Paranaíba é a existência de auréolas de fenitização. Particularmente em Catalão I, próximo ao contato ígneo, os xistos e quatxitos encontram-se bastante fenitizados. A intensidade da fenitização diminui de maneira irregular e centrífuga, podendo a auréola atingir 2 km de espessura.

Cabe ainda destacar a associação regional destes complexos a kimberlitos (BARBOSA *et al.*, 1970; MEYER *et al.*, 1991; MACHADO JR., 1991), de grande interesse econômico.

4. GEOLOGIA DO COMPLEXO

O Complexo de Catalão I apresenta uma idade de $82,9 \pm 4,2$ Ma, obtida pelo método K/Ar em sienito da borda do complexo (HASUI & CORDANI, 1968). Esta idade foi recalculada com novas constantes de decaimento (SONOKI & GARDA, 1988) resultando em um valor de $85,0 \pm 6,9$ Ma. Utilizando-se o mesmo método em flogopitas da matriz de uma "brecha" magmática, obteve-se no presente trabalho uma idade de $91,8 \pm 3,3$ Ma. Determinações não isotópicas realizadas por traços de fissão em apatitas (EBY & MARIANO, 1986) estabeleceram idades de 114 ± 20 Ma para o complexo, incompatíveis com as datações radiométricas existentes.

As principais unidades litológicas reconhecidas no complexo podem ser assim agrupadas :

- rochas ultramáficas e metassomáticas;
- rochas carbonatíticas e
- fenitos.

Rochas Ultramáficas e Metassomatizadas

As rochas ultramáficas originais em Catalão I são dunitos, peridotitos e piroxenitos. Durante a evolução do magmatismo carbonatítico, essas rochas foram submetidas a importantes processos de transformação metassomática (CARVALHO, 1974 b; BAECKER, 1983; DANNI *et al.*, 1991). Os litotipos originados a partir desse intenso autometassomatismo potássico foram descritos como metafoscóritos por BAECKER (1983) e por DANNI *et al.* (1991), e foram denominados de glimmeritos por CARVALHO (1974b) e ARAÚJO & GASPAR (1992). A flogopitização, principal resultado desse metassomatismo, desenvolveu-se em todo o corpo ígneo com maior intensidade nas regiões periféricas (CARVALHO, 1974b; BAECKER, 1983; HIRANO *et al.*, 1987; DANNI *et al.* 1991). Essas rochas são observadas em larga escala no complexo, intensamente cortadas por veios carbonatíticos.

Os glimmeritos (ARAÚJO & GASPAR, 1992) são compostos por flogopitas, carbonatos e opacos (ilmenita, magnetita, pirita); ocorrem também apatita, serpentina, clinohumita e titanita. As flogopitas apresentam textura média a grossa com pleocroísmo inverso e pertencem à série flogopita-tetraferriflogopita. As magnetitas ocorrem frequentemente associadas à ilmenita e apresentam textura inequigranular; pertencem à série magnetita-ulvoespinélio-magnesioferrita. A ilmenita ocorre exsolvida em magnetita e isoladamente em grãos finos e grosseiros; pertence à série ilmenita-geikielita. Os carbonatos são principalmente calcita e dolomita. Restos de olivina parcialmente serpentinizados são comuns nessas rochas.

Rochas Carbonatíticas

As rochas carbonatíticas em Catalão I ocorrem como veios irregulares, semelhante a um "stockwork", cortando as rochas ultramáficas.

Cinco estágios magmáticos sucessivos de formação de rochas carbonatíticas foram definidos para o Complexo (BAECKER, 1983; DANNI *et al.*, 1991):

a) a partir da primeira manifestação carbonatítica, ocorreu a cristalização de uma rocha formada por calcita (< 50%) intercrescida com magnetita, apatita, flogopita e olivina, de granulação caracteristicamente fina e homogênea, denominada de foscorito.

b) rochas a magnetita, flogopita, apatita, pirocloro e calcita compõem os lítotipos gerados no segundo estágio magmático. Elevadas concentrações em fósforo (apatita) e nióbio (pirocloro), além de U, Th e ETR caracterizam geoquimicamente as rochas desse estágio.

c) o primeiro magma carbonatítico mais rico em carbonatos (calcita) gerou sovitos e silicosovitos na forma de diques e veios, que gradam de um para outro tipo petrográfico. As rochas desse terceiro estágio são compostas por carbonato, flogopita, apatita, magnetita, ilmenita, pirita, pirocloro e perovskita (ARAÚJO & GASPAR, 1992).

d) os alvikitos e beforsitos criptocristalinos gerados no quarto estágio apresentam estruturas bandadas de fluxo. Estão associados à atividade pneumatolítica-hidrotermal tardia, evidenciada pela formação de cocardes em bandas milimétricas alternadas com calcedônia, carbonatos e barita criptocristalinos.

e) o último estágio de evolução dos carbonatitos é

representado por veios tardios cristalizados a partir de provável líquido de fusão residual do magma carbonatítico. A granulometria da rocha é muito fina, e calcita é o carbonato predominante, ocorrendo, subordinadamente, dolomita, barita e sulfetos (pirita e pirrotita). Silicificação hidrotermal e cloritização são observadas. Os veios deste estágio interceptam todos os demais estágios, indicando que são as rochas mais jovens do complexo.

Fenitos

A intrusão das rochas ultramáficas e carbonatíticas que geraram o Complexo de Catalão I produziram em sua borda uma auréola de fenitização que circunda todo o complexo. Essa auréola é resultante da reação entre as soluções de origem ígnea, ricas em álcalis e alumina, e as encaixantes. Fenômenos de feldspatização, nefelinização e aegerinização originados desta intensa atividade metassomática produziram estruturas como brechação e pegmatização, comuns neste tipo de complexo.

Os litotipos presentes nesta faixa de alteração metassomática são quartzitos fenitizados enriquecidos em feldspatos e anfibólios alcalinos, e empobrecidos em quartzo, o que reflete a introdução de potássio, sódio e alumínio no sistema. Os xistos fenitizados apresentam mineralogia também bastante variável, com maior quantidade de minerais de potássio e/ou sódio em relação aos quartzitos, o que pode ser explicado pelo caráter menos reativo das rochas quartzíticas. Aegerina-nefelina sienitos com fenocristais de K-feldspato ocorrem nas bordas sul e oeste do complexo, e podem gradar para fenitos sieníticos (BAECKER, 1983).

CAPÍTULO II

MATERIAIS E MÉTODOS

I. MATERIAIS

Tratando-se de um corpo complexo e heterogêneo como o maciço de Catalão I, o estudo da alteração intempérica fica dificultado pela extrema variabilidade de tipos de perfis existentes.

Para a realização deste trabalho, selecionaram-se dois perfis em frentes de lavra exploradas para fosfato e nióbio e quatro furos de sondagens em área mineralizada em fosfato. Foram também coletadas amostras isoladas especialmente ricas em ETR e foi obtido da Goiasfértil um concentrado de rocha fosfática para a separação das apatitas.

Essa amostragem não abrange a enorme variedade de tipos de perfil de alteração existentes, mas permite que se componha um quadro preliminar da evolução supérigena das rochas do maciço.

a. Perfil "A"

O perfil A está localizado na frente de lavra 4 da área I da mina da Goiasfértil S/A, no centro-norte do complexo, onde é explorado o fosfato (FIGURA 1). Constitui-se num corte de aproximadamente 60 metros de altura (FOTO 2) desde a bancada a 790 metros, onde a rocha fresca aflora, até a laterita, na bancada a 850 metros. Foram coletadas 11 amostras, referentes aos diferentes horizontes de alteração presentes, além de 4 amostras representativas de facies particulares encontradas no perfil.

Essas amostras foram analisadas para elementos

maiores, traços e ETR e caracterizadas mineralogicamente por difração de raios-X e microscopia óptica.



FOTO 2 - Vista da frente de lavra 4 da área 1 da mina da Goiasfértil S/A (Perfil A).

b. Perfil "B"

Situado na mina 2 da Mineração Catalão, na região central do complexo (FIGURA 1), o perfil B constitui-se num corte de 46 metros de altura, de onde é explorado o pirocloro.

Foram amostrados da base ao topo 5 horizontes para a caracterização do perfil, totalizando 7 amostras. Neste perfil a rocha fresca não aflora como no perfil A, e as amostras coletadas vão do nível de saprolito até a laterita.

Estudos mineralógicos por DRX, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e estudos térmicos por ATD foram realizados em todas as amostras.

c. Furos de sondagem

Quatro furos de sondagem com profundidades variáveis de 96 a 116 metros, abrangendo desde a rocha fresca até a laterita, foram estudados. Estão localizados no centro-leste do complexo, próximo à frente de lavra 1 da área 2 da mina da Goiasfértil S/A, explorada para fosfato (FIGURA 1).

A Goiasfértil S/A forneceu dados de análise química para elementos maiores de amostras retiradas a cada dois metros para toda a extensão dos furos.

A partir de avaliação visual, foram selecionadas nove amostras de três dos quatro furos de sondagem que pareciam conter uma quantidade significativa de minerais de ETR. Essas amostras foram analisadas por difratometria de raios-X, e seu conteúdo em ETR foi dosado por ativação neutrônica.

2. MÉTODOS

a. Amostragem

O critério de amostragem foi o de selecionar materiais representativos dos diferentes horizontes de alteração, a partir de uma cuidadosa descrição macroscópica do perfil.

Os perfis de alteração A e B foram amostrados recorrendo-se ao auxílio de saboneteiras, obtendo-se assim volumes de materiais indeformados com preservação das texturas e estruturas originais, que foram usados para a obtenção de lâminas delgadas. Para análises químicas globais e análises mineralógicas, coletou-se aproximadamente um quilo do agregado natural.

b. Preparação das amostras

A secagem das amostras ao ar foi efetuada por um período de 10 dias, após os quais procedeu-se às seguintes etapas, diferenciadamente para cada material:

Endurecimento - Na confecção de lâminas delgadas para o estudo ao microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura, os volumes de materiais indeformados, amostrados em saboneteiras, foram impregnados com resina de alta viscosidade, pequena variação volumétrica quando do endurecimento, resistente e dura a temperatura ambiente, incolor e isótropa. A impregnação foi efetuada a vácuo e, de acordo com a porosidade do material a ser impregnado, utilizou-se uma mistura de resina com proporções variáveis de solvente; algumas gotas de catalizador como agente acelerador da reação de polimerização foram acrescentadas. Após a impregnação, o endurecimento deu-se inicialmente ao ar até endurecimento parcial e, para a polimerização completa, as amostras foram levadas à estufa, a cerca de 50°C, por 48 horas.

Moagem - O agregado natural coletado foi pulverizado até granulometrias inferiores a 100 mesh. Os materiais de alteração, normalmente friáveis, não necessitaram de britagem prévia, excetuando-se as amostras dos horizontes silicificados, couraças ferruginosas e carbonatito são.

Separações mineralógicas - Foram efetuadas separações mineralógicas das apatitas do saprolito do perfil A e de um concentrado de rocha fosfática, para análise química de elementos maiores, traços, ETR, e estudo de detalhes ao microscópio eletrônico. Separaram-se, também, flogopitas de uma amostra de brecha magmática do perfil A para datação radiométrica pelo método K/Ar. As técnicas de separação descritas a seguir foram testadas por difratometria de raios-X.

Para a separação das apatitas das amostras, adotou-se a seguinte metodologia:

- _ lavagem do material em água corrente, em peneira 60 mesh, para eliminação da fração mais fina; secagem a 100°C;
- _ separação dos minerais ferro-magnéticos com imã de mão;
- _ pulverização até granulometrias inferiores a 100 mesh;
- _ concentração de minerais por diferenciação de densidades em bromofórmio;
- _ separação de minerais em separador isodinâmico Frantz usando-se intensidade de corrente elétrica igual a 1,5 A, inclinação vertical de 10° e inclinação lateral variável de 10°, 6°, 4°, 3°, 2°, 1° e -1°.

Para a separação das flogopitas, foi adotada a seguinte metodologia:

- _ britagem de porções da amostra que não apresentassem xenólitos ou fenocristais;
- _ pulverização da amostra até granulometrias inferiores a 200 mesh;
- _ lavagem com HCl 1:1 e água corrente para eliminação de carbonatos;
- _ separação em separador isodinâmico Frantz, usando-se intensidade de corrente igual a 0,5 A, inclinação vertical de 20° e inclinação lateral variável de 15° e 10°.

c. Técnicas Analíticas

SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , NiO , BaO , SrO , ZrO_2 e Nb_2O_5 foram analisados por fluorescência de raios-X em amostras fundidas com tetraborato de lítio e óxido de lantâncio; FeO por via úmida com titulação com KMnO_4 ; Na_2O , K_2O , MnO por absorção atômica após dissolução total das amostras com HF-HNO_3 ; F por fusão alcalina e determinação por eletrodo de íon específico; S , Cl , Th , Ba , Hf , Ta , Sr , Nb , Y , Cs , Zr por fluorescência de raios-X, usando a técnica de pó prensado; ETR por

espectrometria de Plasma-ICP e ativação neutrônica. As análises foram efetuadas pelo Laboratório GEOLAB da GEOSOL-Geologia de Sondagens Ltda. e pelos laboratórios do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN-CNEN/SF.

As amostras foram também submetidas a análises por difração de raios-X em equipamento Rigaku, com monocromador, efetuadas nos laboratórios do Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IFT, e em equipamento VEB Carl Zeiss JENA, sem monocromador, do Instituto de Geociências-USP.

Análises termo-diferenciais (ATD) foram efetuadas em equipamento Rigaku pelos laboratórios do Instituto de Geociências-USP.

As imagens e espectros EDS, obtidas por microscopia eletrônica em equipamento JEOL, foram realizadas nos laboratórios do NUPEGEL, no Instituto Astronômico e Geofísico-USP.

Datação radiométrica pelo método K/Ar foi efetuada nos laboratórios do CPGeo-IG-USP.

d. Tratamento estatístico dos dados químicos

O tratamento estatístico para dados de teores em SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (Fe total calculado como Fe_2O_3), FeO (FeO contido na magnetita), MgO , BaO , K_2O , CaO , TiO_2 , P_2O_5 (contido na apatita), P_2O_5 -fosf (contido em fosfatos secundários que não a apatita) e P.F. (calculado como a diferença entre a soma dos óxidos e 100%) do conjunto de 205 amostras dos quatro furos de sondagem foi efetuado através do programa Statgraphic. Foram calculadas as estatísticas básicas, os coeficientes de correlação Pearson e a análise fatorial varimax. O programa LOTUS foi utilizado para os cálculos de balanço geoquímico.

CAPÍTULO III

OS FUROS DE SONDAZENS

Foram fornecidos pela Goiasfértil dados de análise química (FeO_{t} total, CaO , MgO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 apatita, TiO_2 , BaO , K_2O , Somatória, $\text{CaO}/\text{FeO}_{\text{t}}$ total e % de magnetita) para 205 amostras assim distribuídas:

- Furo de sondagem "A" : 51 amostras
- Furo de sondagem "B" : 48 amostras
- Furo de sondagem "C" : 58 amostras
- Furo de sondagem "D" : 48 amostras

As TABELAS 1, 2, 3 e 4 apresentam esses dados para os furos de sondagens A, B, C e D, respectivamente, acrescidos de 3 variáveis calculadas:

- $\text{FeO} = \% \text{ FeO}$ contido na magnetita. Calculado por $\% \text{magnetita}/3,23$;
- $T-\text{Ap} = \text{FeO}_{\text{t}}$ fosfII. Representa o FeO_{t} contido nos fosfatos secundários. Calculado por $\text{FeO}_{\text{t}} \text{ total} - \text{FeO}_{\text{t}}$ apatita;
- P.F. = 100-Somatória. Representa a perda ao fogo.

1. CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DO PERFIL DE ALTERAÇÃO

Os diagramas das FIGURAS 2, 3, 4 e 5 mostram a variação dos teores com a profundidade para os 4 furos estudados.

O comportamento do CaO e do MgO permite distinguir, em cada um dos furos, 4 horizontes muito bem caracterizados:

H_1 = valores de CaO e de MgO próximos de zero (laterita);

H_2 = valores de CaO irregulares e situados, em sua maior parte, entre 15 e 20%, e valores de MgO próximos de zero (saprolito);

H_3 = valores de CaO irregulares e situados, em sua

FURO DE SONDAÇÃO "A"																	P.F.	T-AP
Prof	P205-T	CaO	MgO	Fe2O3	Al2O3	SiO2	P205-AP	TiO2	BaO	K2O	SOMAT	CaO/P205	XMAGN	FeO				
1	5	0.6	0.9	59.68	5.75	11.88	0.6	13.99	1.45	0.05	99.3	0.12	36.22	11.2282	0.7	4.4		
3	5.8	0.5	0.75	53.84	5.25	12.24	0.8	16.13	1.95	0.05	96.51	0.086206	35.46	10.9926	3.49	5		
5	5.8	0.6	0.65	50.8	4.65	16.32	1	15.32	1.7	0.05	95.89	0.103448	26.66	8.2644	4.11	4.8		
7	5.85	0.6	0.55	46.8	4.05	23.36	0.6	11.39	1.5	0.05	94.15	0.102564	23.07	7.1517	5.85	5.25		
9	3.2	0.6	0.5	41.68	2.3	24.1	1	15.14	1.5	0.06	89.08	0.1875	19.32	5.9892	10.92	2.2		
11	5.4	0.5	0.45	44.08	2.6	29.14	0.9	9.59	1.55	0.06	93.37	0.092592	13.33	4.1323	6.63	4.5		
13	6	0.6	0.45	34.56	2.7	39.22	1	9.83	1.55	0.05	94.96	0.1	5.3	1.643	5.04	5		
15	5.4	0.5	0.4	40.08	2.32	32.94	0.8	7.17	1.36	0.05	90.22	0.092592	8.46	2.6226	9.78	4.6		
17	6.6	0.6	0.35	43.76	2.95	27.86	1.1	8.55	2.05	0.05	92.77	0.090909	5.04	1.5624	7.23	5.5		
19	6	0.7	0.5	40.64	2.95	31.4	1.1	8.61	1.85	0.05	92.7	0.116666	11.56	3.5836	7.3	4.9		
21	13	11.88	0.5	34.8	1.52	30.16	9.8	4.85	0.52	0.05	96.62	0.063076	15.51	4.8081	3.38	3.2		
23	22	23.56	0.45	22.08	1.24	24.38	19	3.01	0.48	0.05	97.25	1.070909	9.57	2.9667	2.75	3		
25	24.2	28.05	0.5	20	1.52	16.54	22.7	4.33	0.68	0.05	95.87	1.159090	11.59	3.5929	4.13	1.5		
27	21.8	24.91	0.5	23.76	1.6	16.66	20.4	4.33	0.88	0.05	94.49	1.142660	14.73	4.5663	5.51	1.4		
29	18	19.07	0.35	25.52	2.04	22.16	15.5	5.55	1.4	0.05	94.14	1.059444	8.9	2.759	5.86	2.5		
31	8.2	8.42	0.45	31.44	1.28	37.04	7.3	8.09	0.76	0.05	95.73	1.02629	17.47	5.4157	4.27	0.9		
33	22.6	26.05	0.45	25.68	1.56	15.74	21.2	3.76	0.76	0.05	96.63	1.151769	17.86	5.5366	3.37	1.4		
35	13.6	13.8	0.45	30.24	2.2	28.68	11	8.67	1.56	0.06	99.25	1.014705	13.75	4.2625	0.74	2.6		
37	9	9.65	0.7	38.08	3.16	27.4	5.5	10.63	2.82	0.08	100.72	1.072222	18.02	5.5862	-0.72	3.5		
39	9.2	10.43	0.45	32.08	2.16	36.54	8	6.99	1.24	0.05	99.14	1.133695	15.87	4.9197	0.86	1.2		
41	11	11.33	0.5	28.8	1.52	47.54	6.8	4.62	0.76	0.06	106.13	1.03	14.87	4.6097	-6.13	4.2		
43	10	10.66	0.5	32.48	2.04	32.96	7.4	8.96	0.96	0.06	93.62	1.066	12.74	3.9494	1.38	2.6		
45	11.8	14.81	0.55	38.98	2.6	19.2	8.6	10.11	1.32	0.05	99.6	1.255084	15.22	4.7182	0.4	3.2		
47	11.2	12.34	0.5	44.64	3.68	13.26	7.9	12.96	1.8	0.06	100.44	1.101785	18.66	5.7846	-0.44	3.3		
49	8.4	9.09	0.8	42.4	1.6	23.84	7.1	11.16	0.8	0.06	98.15	1.082142	27.86	8.6366	1.85	1.3		
51	12.4	13.69	0.6	38.48	2.56	18.4	10.7	11.39	1.8	0.05	99.37	1.104032	28.85	8.9435	0.63	1.7		
53	13.8	14.36	0.55	35.84	2.88	17.82	12.5	8.21	1.4	0.06	94.62	1.040579	22.14	6.8434	5.08	1.3		
55	21.8	23.56	0.5	28.48	1.6	18.82	18.5	4.74	0.56	0.05	100.11	1.080733	12.81	3.9711	-0.11	3.3		
57	12.4	12.9	0.8	33.28	1.84	27.06	11.5	13.18	0.6	0.08	102.14	1.040322	17.45	5.4095	-2.14	0.9		
59	9.4	10.09	1.5	35.84	1.92	28.88	8.9	10.06	0.36	0.09	98.14	1.073404	27.76	8.6056	1.86	0.5		
61	9.6	11.66	2.1	28.64	2.32	28.84	9.5	9.65	0.4	0.11	93.32	1.214583	17.46	5.4126	6.68	0.1		
63	10.8	11.76	6.75	21.04	3.52	27.16	10.6	11.91	0.44	1.34	94.74	1.088888	5.18	1.6058	5.26	0.2		
65	15	17.95	2.4	23.66	2	22.58	14.8	6.01	2.8	0.15	92.57	1.196666	9.71	3.0101	7.43	0.2		
67	7.8	7.85	2	34.4	2.16	25.34	7.05	9.19	2.36	0.19	91.29	1.006410	20.25	6.2775	8.71	0.75		
69	19	20.3	1.75	24.46	1.6	22.56	17.6	4.1	1.52	0.09	95.36	1.084842	17.07	5.2917	4.62	1.4		
71	14.4	16.15	3.3	25.12	3.04	25.1	14	5.26	0.76	0.07	93.4	1.121527	15.59	4.8329	6.6	0.4		
73	15.4	16.83	4	24.4	2.68	19.58	14	6.88	1.56	0.08	91.41	1.092857	12.44	3.8564	6.59	1.4		
75	11.8	12.9	6	23.44	3.64	22.92	11.4	7.92	1.08	0.35	90.05	1.093220	10.57	3.2767	9.95	0.4		
77	12.4	13.23	8	27.36	4.8	22.08	12.2	6.71	1	0.18	95.76	1.064935	8.03	2.4893	4.24	0.2		
79	14.65	17.05	6	20.08	2.76	25.16	12.8	5.37	0.72	0.11	92.6	1.225255	10.94	3.3914	7.2	1.85		
81	13	14.13	7	25.76	2.95	21.42	11.8	7.05	0.7	0.06	92.07	1.086923	17.41	5.3971	7.93	1.2		
83	11.2	25.35	8	24.12	3.15	18.58	10.8	6.24	2.25	0.09	98.98	2.263392	10.88	3.3728	1.02	0.4		
85	12.2	13.46	9	21.28	3.1	26.26	10.5	6.59	1.5	0.11	87.5	1.103278	9.57	2.9667	12.5	1.7		
87	13	16.13	8	19.2	1.85	23.76	12.7	4.33	1.35	0.12	87.95	1.242307	10.14	3.1434	12.04	0.3		
89	8.6	6.75																

FURO DE SONDAGEM "B"

Prof	P205-T	CaO	MgO	Fe2O3	Al2O3	SiO2	P205-AP	TiO2	BaO	K2O	SOMAT	CaO/P205	XNaCN	FeO	100-SOMA	T-AP
1	6.6	5.1	0.6	53.44	6.42	11.48		15.03	1.66	0.05	100.38	0.772727	29.21	0.239545	-0.38	6.6
3	6.6	8.98	0.6	47.92	7.1	11.86	0.6	16.76	2.14	0.05	102.01	1.360606	18.48	0.421787	-2.01	7.2
5	4.8	6.17	0.4	46.8	7.04	11.9	0.8	17.11	2.32	0.06	96.6	1.285416	11.42	0.398479	3.4	5.6
7	6	0.45	0.4	46.56	4.6	16.52	0.6	17.98	2.56	0.05	95.12	0.075	17.72	0.02325	4.88	6.6
9	5.3	0.67	0.5	43.44	4.8	19.16	0.6	11.33	3.1	0.05	88.35	0.126415	17.11	0.039188	11.65	5.9
11	7	0.7	0.5	45.36	4.74	16.42	0.9	16.82	2.6	0.06	94.2	0.1	19.29	0.031	5.8	7.9
13	6.8	0.8	0.5	43.2	5.22	16.88	0.9	16.13	2.5	0.05	92.06	0.117647	8.28	0.036470	7.92	7.7
15	5.2	0.6	0.5	50.96	3.68	16.06	0.9	16.99	1.54	0.05	95.58	0.115384	26.39	0.035769	4.42	6.1
17	6.3	0.7	0.5	37.52	3.96	29.2	1.4	14.91	2.6	0.12	95.81	0.111111	10.35	0.034444	4.19	7.7
19	4	0.8	0.5	38.72	3.18	34.26	1.5	9.77	1.36	0.06	92.65	0.2	16.05	0.062	7.35	5.5
21	5.5	0.7	0.5	32.16	3.8	41.88	0.5	9.19	1.9	0.06	95.69	0.127272	14.16	0.039454	4.31	6
23	9.8	5.05	0.4	30.56	2.6	36.86	5.3	7.8	1.52	0.05	94.64	0.515306	11.54	0.159744	5.36	15.1
25	6.3	0.8	0.4	36.8	3.74	32.7	1.5	8.55	1.94	0.05	91.28	0.126984	13.51	0.039365	8.72	7.8
27	9	7.06	0.4	30	4.52	27.36	6.1	11.73	2.86	0.14	93.07	0.734444	8.79	0.243177	6.93	15.1
29	13.2	6.73	1.8	28.56	8.8	18.72	6	13.68	4.92	0.09	96.5	0.509843	10.07	0.158053	3.5	19.2
31	13.6	12	1.2	27.16	3.64	27.76	9.9	8.33	1.72	0.09	95.5	0.882352	14.97	0.273529	4.5	23.5
33	13.9	15.03	0.6	26.08	3.72	24.56	12.3	8.96	1.2	0.07	94.12	1.081294	13.69	0.395201	5.88	26.2
35	11.4	9.65	0.6	31.52	3.08	28.04	10.7	9.65	1.44	0.06	95.44	0.846491	18.58	0.262412	4.56	22.1
37	14.4	16.61	0.6	23.44	2.64	27.5	13.3	9.54	1.12	0.07	95.92	1.153472	14.76	0.357576	4.06	27.7
39	10	9.54	0.8	24.24	3.2	28.9	7.9	9.71	1.24	0.14	87.77	0.954	11.32	0.29574	12.23	17.9
41	12.4	13.13	1.6	23.52	3.28	15.62	10.5	9.08	0.84	0.26	79.73	1.058870	9.33	0.32825	20.27	22.9
43	19.2	23.22	1.8	23.44	2.96	15.62	17.7	5.8	0.76	0.24	93.04	1.209375	12.03	0.374906	6.96	36.9
45	16	20.19	2	23.84	3.28	17.16	13.8	8.27	0.76	0.75	92.25	1.261875	11.05	0.391181	7.75	29.8
47	12	14.02	2	27.12	4.28	28.74	10.7	12.64	0.84	0.75	102.39	1.168333	12.05	0.362183	-2.39	22.7
49	18	17.5	1.5	27.44	3.48	17.1	15.2	8.5	0.52	0.45	94.49	0.972222	9.48	0.301388	5.51	33.2
51	16.8	14.58	1.5	32.64	3.08	17.62	13.1	9.37	0.52	0.65	94.76	0.887857	15.4	0.269035	3.24	29.9
53	16.8	19.41	4	18.32	4.16	16.54	13.5	6.72	0.6	2.5	89.05	1.155357	1.03	0.358160	10.95	30.3
55	10.8	12.12	4	23.04	4.48	22.7	8.2	10	0.56	2.8	90.5	1.122222	1.59	0.347888	9.5	19
57	17	20.42	2.5	23.28	3.36	15.56	15	8.91	0.32	0.55	91.9	1.201176	12.76	0.372364	8.1	32
59	12.6	14.25	6.25	22.64	3.68	22.56	11.1	7.91	0.24	1.37	91.5	1.130952	6.18	0.350595	8.5	23.7
61	16.4	18.4	3.75	23.68	2.96	20.4	13.9	5.87	0.36	0.92	92.14	1.121951	8.34	0.347804	7.86	30.3
63	18	22.44	4.25	23.68	2.8	14.4	16.7	5.17	0.32	0.8	91.86	1.246666	9.54	0.386466	8.14	34.7
65	13.2	14.81	8.5	24.16	4.28	18.24	11.2	7.67	0.64	1.16	92.66	1.121969	12.33	0.347810	7.34	24.4
67	14	16.26	9.5	17.84	5.16	19.72	12.8	3.88	1.64	2.48	90.48	1.161428	4.71	0.360042	9.58	26.8
69	13.2	14.81	10	20.56	3.96	18.4	11	7.03	2.2	1.6	91.76	1.121969	7.16	0.347810	8.24	24.2
71	9.4	11.78	11.5	18.4	4.6	23.44	8.3	6.39	2.24	1.44	89.19	1.253191	7.82	0.388489	10.81	17.7
73	8	10.65	16.5	12.96	7.08	25.84	6.7	2.7	0.76	3.44	87.93	1.33125	2.74	0.412687	12.07	14.7
75	3.4	24.68	17	5.2	1.12	3.58	1.1	1.21	3.44	0.26	59.89	7.238823	0.63	2.250235	40.11	4.5
77	8.6	15.25	15.5	10.4	7.04	22.06	7.3	2.13	1.88	3.2	86.06	1.773255	1	0.549709	13.94	15.9
79	10.2	17.5	14.5	15.6	2.48	19.08	8.8	3.31	0.84	1	84.51	1.715686	6.17	0.531862	15.49	19
81	5.6	15.03	18	13.28	2.85	16.49	4.5	4.71	0.7	0.57	77.23	2.683928	3.9	0.832017	22.77	10.1
83	8.4	20.19	16.6	11.36	2.25	13.54	7.3	2.91	1	0.65	76.9	2.403571	3.97	0.745107	23.1	15.7
85	11.4	22.44	15.2	11.68	2.5	21.93	10.4	2.21	0.65	0.55	88.56	1.968421	6.89	0.610210	11.44	21.8
87	10.2	15.71	16.8	12.48	4.75	18.81	9.8	2.85	0.35	1.5	83.45	1.540196	3.73	0.477460	16.55	20
89	10.6	18.17	16	10.16	4.5	14.36	8.8	1.74	0.55	1.33						

Furo de sondagem "C"													XMAGN	FeO	100-SOMA	T-AP
Prof	P205-T	CaO	MgO	Fe2O3	Al2O3	SiO2	P205-AP	T102	BaO	K2O	SOMAT CaO\P205	XMAGN	FeO	100-SOMA	T-AP	
1	9.6	0.1	0.75	50.64	10.16	12.8	0.4	13	1.28	0.05	98.38 0.010416	33.69	10.4439	1.62	9.2	
3	6.4	0.1	0.75	50.4	11.36	13.18	0.2	13.16	1.56	0.1	97.01 0.015425	28.1	8.711	2.99	6.2	
5	8	0.1	0.5	38.88	14.6	16.18	0.2	12.9	2.2	0.15	93.51 0.0125	15.6	4.636	6.49	7.8	
7	9.2	0.1	0.5	27.52	15.76	16.78	0.2	15.39	2.92	0.1	88.27 0.010869	10.43	3.2333	11.73	9	
9	11.8	0.1	0.5	20.56	11.86	20.74	1	21.35	3.92	0.15	91.94 0.008474	3.72	1.1563	9.05	10.8	
11	11.6	1.12	0.5	16.88	10.36	23.94	0.7	23.47	3.92	0.15	88.86 0.054545	0.67	0.2077	11.14	9.4	
13	11	0.6	0.5	18.32	6.68	31.4	1.6	17.3	2.96	0.1	91.38 0.012820	1.03	0.3193	8.62	6.9	
15	7.8	0.1	0.25	44.56	3.92	20.82	0.9	12.07	1.76	0.1	91.54 0.096551	1.54	0.4774	8.06	10.9	
17	10.8	5.4	0.5	29.76	4.12	30.56	5.4	9.95	2.4	0.05	93.54 0.5	6.4	1.984	6.46	5.4	
19	9	5.16	0.5	36.88	2.4	27.92	5.2	11.92	1.36	0.02	95.16 0.573333	7.66	2.3746	4.84	3.8	
21	10	5.95	0.5	35.6	2.72	30.22	6	8.65	1.4	0.1	95.14 0.595	12.73	3.9463	4.86	4	
23	17	19.74	0.5	25.92	1.6	22.86	15.4	6.27	0.64	0.05	94.58 1.161176	7.74	2.3994	5.42	1.6	
25	12.2	11.11	0.5	28.56	1.6	31.76	10.2	8.03	0.76	0.05	94.57 0.910655	4.38	1.3578	5.43	2	
27	15.8	15.71	0.5	23.24	1.84	29.9	13.2	8.23	0.88	0.1	95.0 0.994363	3.67	1.7577	5	2.6	
29	15.2	15.93	0.5	20.88	1.44	31.62	13.7	6.27	0.68	0.05	92.57 1.048026	6.6	2.108	7.43	1.5	
31	14	13.24	0.5	20.24	0.96	39.2	12.5	4.09	0.6	0.05	92.88 0.945714	7.95	2.4645	7.12	1.5	
33	14.6	10.54	0.25	23.04	2.08	35.1	10.3	3.47	1.6	0.1	90.78 0.721917	1.86	0.5828	9.22	4.3	
35	20.2	24.91	0.25	18.8	1.36	20.96	19.7	4.09	0.72	0.05	91.34 1.233168	4.16	1.2896	8.66	0.5	
37	18	20.42	0.25	20.96	1.68	26.76	16.5	5.54	0.92	0.1	94.63 1.134444	6.67	2.0677	5.37	1.5	
39	16	17.39	0.25	15.68	1.16	42.8	14.1	3.16	0.68	0.05	97.17 1.086875	6.7	2.077	2.83	1.9	
41	13.8	14.92	0.25	16.96	0.84	22.65	12.6	3.1	0.52	0.1	73.14 1.081159	8.83	2.7373	26.86	1.2	
43	11.6	11.44	0.25	16.4	0.56	33.2	9.8	2.79	0.64	0.05	96.93 0.986206	6.97	2.1607	3.07	1.8	
45	11.4	9.42	0.25	20.4	0.84	45.78	8.5	3.57	0.56	0.1	92.32 0.826315	10.45	3.2395	7.68	2.9	
47	13.6	14.59	0.5	24	1.4	31.36	9.8	5.64	0.96	0.1	92.15 1.072774	8.7	2.759	7.85	3.8	
49	13.8	14.76	0.5	26.24	1.68	31.34	10.6	5.18	1.2	0.05	94.75 1.069565	10.74	3.3294	5.25	3.2	
51	14.2	12.57	0.5	24.24	1.8	31.36	10.3	3.63	1.12	0.1	89.52 0.885211	11.5	3.565	10.48	3.9	
53	10	7.29	0.5	25.28	1.48	40.4	6.7	4.14	1.08	0.05	90.22 0.7229	11.92	3.6952	9.78	3.3	
55	10	6.84	2.5	29.76	3.24	25.91	5.8	5.91	1.2	0.1	85.46 0.684	11.68	3.6208	14.54	3.2	
57	12.6	14.59	2	28.56	2.2	23.85	10.8	6.53	0.48	0.15	90.96 1.157936	15.45	4.7895	9.04	1.8	
59	11.2	12.01	2	32.4	1.64	25.48	7.5	6.94	0.36	0.05	91.08 1.072321	20.25	6.2775	8.92	1.7	
61	8.2	8.53	3.25	36.16	2.52	21.57	6.3	7.2	0.36	0.05	87.84 1.040243	26.04	8.0724	12.16	1.9	
63	11.6	13.46	2.25	28.4	2.28	25.03	7.8	6.79	0.4	0.05	90.26 1.140344	15.87	4.9197	9.74	1.8	
65	12.2	14.36	0.75	24.56	1.2	26.03	10.4	5.28	0.48	0.1	86.96 1.177049	12.03	3.7293	13.04	1.8	
67	11.4	11.78	2.75	23.44	2.08	29.03	9	5.95	0.56	0.1	87.07 1.033333	14.32	4.4392	12.91	2.4	
69	22.4	26.48	2	20.72	1.78	19.96	18.8	3.57	0.68	0.05	86.64 1.182142	11.24	3.4844	11.36	3.6	
71	14.8	17.05	4.75	22.56	2.24	20.14	11.6	5.59	0.84	0.2	88.17 1.152027	6.03	1.8693	11.83	3.2	
73	15	20.31	9.5	18.06	1.74	18.04	13.5	4.14	0.4	0.3	87.51 1.354	8.06	2.4986	12.49	1.5	
75	3.6	9.76	11.5	17.6	0.9	33.79	2.7	3.88	0.28	0.25	81.56 2.711111	9.46	2.9326	18.44	0.9	
77	7.4	10.77	9	26.88	1.24	24.48	5.8	5.33	0.36	0.2	85.66 1.455405	18.62	5.7722	14.34	1.6	
79	10	21.65	16	14.16	1.36	14.76	9.8	2.53	0.32	0.15	80.93 2.165	6.96	2.1576	19.07	0.2	
81	4.4	13.01	19	15.2	1.86	18.8	3.5	3.88	0.4	0.15	76.7 2.956818	5.69	1.7639	23.3	0.9	
83	3.8	16.27	20	12.64	1.2	15.7	3.6	3.99	0.32	0.3	74.22 4.281578	4.42	1.3702	25.78	0.2	
85	7	12.12	22	16.24	1.65	16.38	4.6	5.23	0.4	0.35	81.37 1.731428	6.48	2.0088	18.63	2.4	
87	10.4	15.71	21.5	14	1.25	12.94	9.4	1.67	1.25	0.2	78.92 1.510576	9.24	2.8644	21.08	1	
89	5.8	11.78	23	15.92	1.95	17.82	5.2	3.16	0.45	0.6	80.48 2.031034	7.98	2.4738	19.52	0.6	
91	4.8	10.99	23	13.52	2.9	18.96										

Furo	DE SONDAGEM "D"																		
Prof.	P205-T	Cao	%gO	Fg203	A1203	B1203	T.02	P205-Ap	T.02	Sa20	K20	SiO ₂	CaO/P205	MgO	FeO	100-SGMA	T-AP		
1	3.6	1.2	0.6	52.72	9.16	6.46	0.7			1.6	0.95	81.39	0.333333	31.56	9.7636	18.61	2.2		
2	3.6	1	3.6	59.04	2.4	5.76	0.5			1.4	0.87	81.07	0.263157	32.77	9.2297	18.93	2.3		
3	4.2	1	8.6	54.4	8.82	9.54	0.4			1.48	0.89	79.59	0.238095	30.79	6.4449	29.41	3.8		
4	1	1.2	2.6	52.8	5.44	12.22	0.5			1.5	0.97	79.73	0.2	31.57	5.6929	29.27	2.5		
5	5	1	0.5	49.76	5.76	8.58	0.3	14.07	2.8	0.18	87.6	0.2	17	3.27	12.4	4.7			
6	4.6	1	0.4	57.92	3.4	3.4	0.9	17.81	1.28	0.18	94.41	0.217391	19.79	5.1818	5.59	1.7			
7	5	1.2	0.6	58.82	4.36	13.88	1.4	12.02	1.92	0.09	92.35	0.24	12.86	3.9866	7.68	3.5			
8	7	1	9.6	53.8	4.32	3.44	1	15.35	1.68	0.13	87.24	0.142857	14.23	4.4113	9.66	3			
9	6	1	0.6	59.84	3.68	13.28	1.1	10.58	1.48	0.07	95.67	0.166666	13.76	4.2636	4.33	4.3			
10	6.6	0.8	0.6	54.16	2.52	24.36	1.9	7.21	0.95	0.05	97.26	0.122121	19.79	6.1349	6.74	4.7			
11	7	1	0.5	58.8	3.96	15.82	2.6	11.86	0.84	0.12	83.2	0.142857	13.95	4.3845	6.82	4.5			
12	4	1	0.5	37.95	2.2	32.58	1.9	1.9	0.94	0.1	93.37	0.25	19.95	4.9445	6.63	2.1			
13	7	3.4	0.5	37.44	3.4	25.64	4	14.07	0.28	0.24	96.59	0.495714	16.88	5.2388	3.31	3			
14	11.8	12.34	0.4	33.6	1.8	29.76	19.4	0.21	0.68	0.07	97.35	0.445762	16.16	5.0096	2.14	1.4			
15	16	16.73	0.5	32.24	2.12	21.52	14.7	0.23	1.2	0.06	87.7	0.179625	16.36	5.0716	2.3	1			
16	16.5	17.61	0.5	39	2.2	21.38	11.8	4.77	1.5	0.06	95.22	0.166727	12.6	3.986	4.78	1.7			
17	29.5	33.05	0.4	30.4	2.72	3.8	25.7	2.44	2	0.51	93.82	0.159649	11.14	3.4534	6.18	3.6			
18	32	33.04	0.6	31.92	2.16	9.48	19.4	4.77	1.38	0.05	96.39	0.193181	18.77	5.8187	3.62	3.6			
19	11	11.05	0.4	22.4	1.98	48.22	9.4	0.84	0.04	0.05	92.28	0.004545	10.4	3.224	7.72	1.6			
20	15.15	18.62	0.6	33.36	1.76	21.4	14.5	7.67	1.58	0.06	87.7	0.1289042	17.01	5.2731	9.3	2.65			
21	12.65	23	1	35.12	3.72	26.84	2.7	8.6	0.52	0.12	107.56	0.818181	19.21	5.9551	-7.58	2.75			
22	32	33.45	1	35.76	3.82	19.3	2.9	7.56	0.39	0.15	104.53	0.1954166	13.55	5.7525	-4.53	3.1			
23	8.35	15.82	0.755	39.6	2.48	21.78	6.8	9.3	1.68	0.09	100.055	0.894610	24.3	7.533	-0.055	1.55			
24	10	19.32	0.5	49.16	2.56	19.96	3.7	9.55	1.4	0.05	102.71	0.1752	23.57	7.9267	-2.71	1.3			
25	12	25.34	0.5	34.4	0.38	22.16	10.8	6.39	0.38	0.09	104.54	0.111333	17.93	5.5583	-4.54	1.3			
26	9.85	18.85	0.5	34.4	2.4	24.56	7.8	7.56	1.58	0.18	99.84	0.1913705	19.69	3.3139	9.16	2.85			
27	7.75	11.5	0.75	38.72	3.36	23.48	6.8	10.7	1.54	0.22	98.12	0.483870	16.51	5.1181	1.88	1.55			
28	13.3	30.85	1.25	27.76	2.15	22.22	12.5	4.88	0.8	0.22	103.44	0.319548	4.21	1.3031	-2.44	0.8			
29	17.25	41.23	0.25	19.84	1.96	19.44	16.4	3.14	0.64	0.1	106.85	0.3390144	7.77	2.4087	-6.85	0.85			
30	13.1	32.26	0.85	22.6	2.24	20.38	12.9	5.81	2.44	0.19	103.27	0.2462595	11.25	3.4875	-3.27	0.2			
31	14.7	17.17	4	27.73	1.76	24.29	14.2	3.46	0.36	0.17	95.67	0.168027	14.5	4.495	4.33	0.5			
32	7.2	10.77	6.75	22.56	1.72	24.38	3.9	3	0.36	1	91.74	0.179658	6.63	2.6733	3.26	0.3			
33	8.3	8.75	7.75	24.88	1.8	31.74	7.5	6.8	0.4	0.35	90.77	0.054216	11.32	3.5092	7.23	0.8			
34	6.8	14.13	12.5	21.72	1.44	20.78	6.5	6.05	0.24	0.08	34.66	0.077941	14.81	4.5911	13.34	0.3			
35	6.79	16.34	16.25	14.16	1.44	17.94	5.6	2.98	0.24	0.25	75.49	0.2406480	6.83	2.1173	24.51	0.19			
36	3.2	13.25	18.75	17.68	1.32	19.84	3.1	3.83	0.24	1	78.91	0.140625	9.93	3.0783	21.09	0.1			
37	4.9	14.25	18.75	13.76	1.68	18.88	4.3	3.89	0.32	0.35	76.78	0.200163	4.55	1.4105	23.22	0.6			
38	4	15.26	20	12.24	1.2	17.3	3.8	3.48	0.32	0.25	74.59	3.815	2.67	0.8277	25.41	0.2			
39	3.5	15.82	16.75	13.28	1.36	10.74	3	3.49	1.52	0.1	56.56	4.52	5.37	1.8507	31.44	0.5			
40	3.1	13.3	24	13.04	1	11.46	2.5	2.96	0.52	0.15	68.03	0.4451612	3.27	2.5637	31.97	0.6			
41	4.2	12	26	17.6	2.96	17.94	3.6	3.12	0.48	0.25	30.55	0.2057142	10.86	3.3666	19.45	0.6			
42	8.5	18.94	16.25	18.16	1.6	13	8	3.78	0.88	0.8	81.93	0.239588	12.77	3.9587	18.07	0.5			
43	7.9	18.51	16.75	13.76	1.08	15.64	7.5	2.62	0.44	1.1	79.8	0.2343037	6.19	1.9189	20.2	0.4			
44	3.8	15.93	20	14.48	1.26	15.42	3.4	2.96	0.44	0.8	75.19	0.4192105	8.33	2.5823	24.81	0.4			
45	4	13.58	20	12.64	1.44	17.08	2.7	2.5	1.6	0.17	73.01	3.395	5.8	1.798	26.99	1.3			
46	3.8	14.47	20	14.08	1.44	13.8	2.7	3.25	1.56	2.1	72.5	0.3007894	6.81	2.1111	27.5	1.1			
47	3.6	13.12	21.25	16.16	1.72	14.8	3	4.53	0.64	2.5	76.32	0.3444444	7.64	2.3684	21.66	0.6			
48	5.8	10.32	23.75	16.64	1.6	16.68	5.2	2.9	0.32	4.3	81.91	0.1779316	8.93	2.7683	18.09	0.6			

TABELA 4 - Dados de análise química para elementos maiores para o Furo "D".

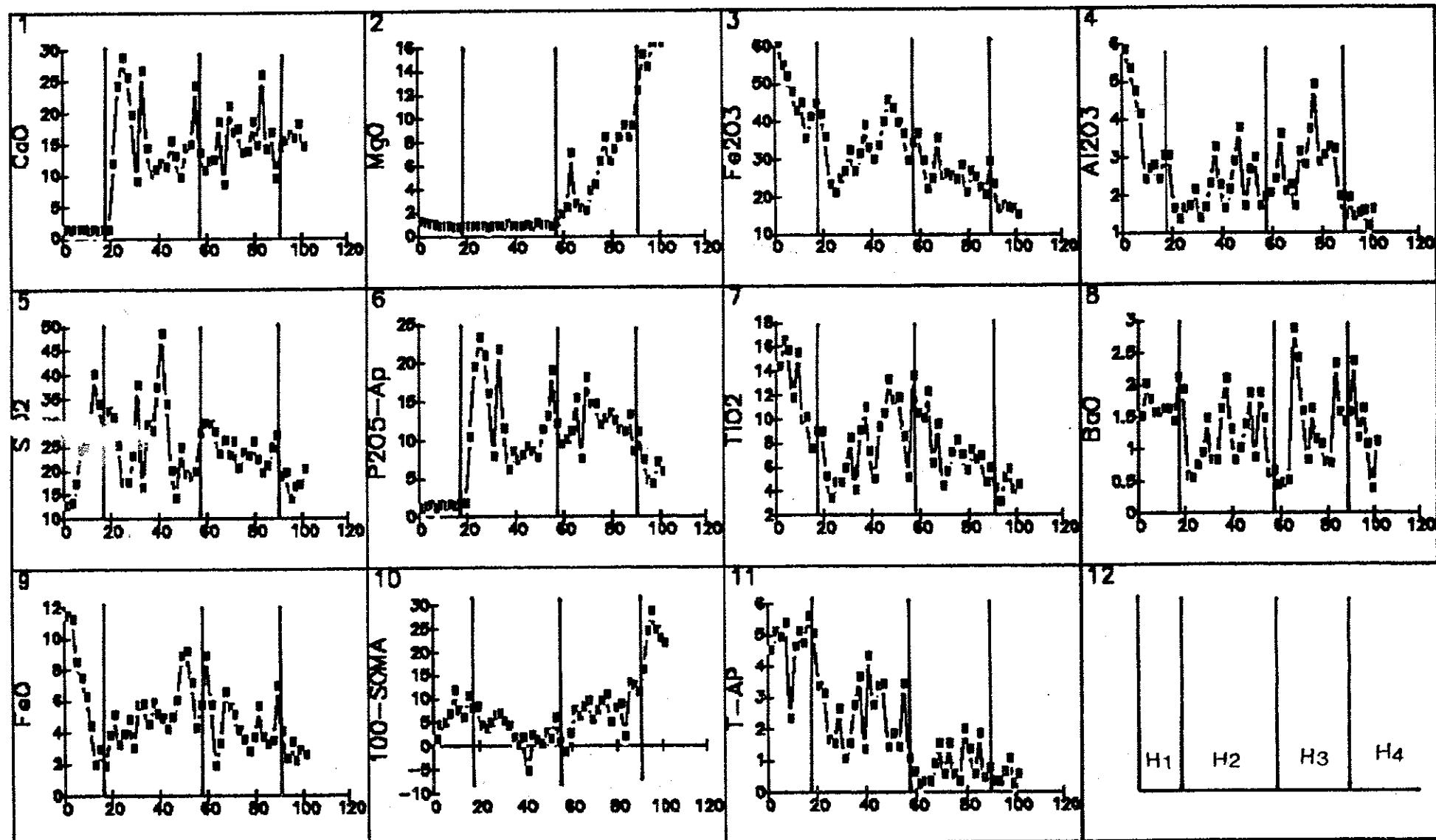


FIGURA 2 - Diagramas TEOR x PROFUNDIDADE para elementos maiores do Furo "A".

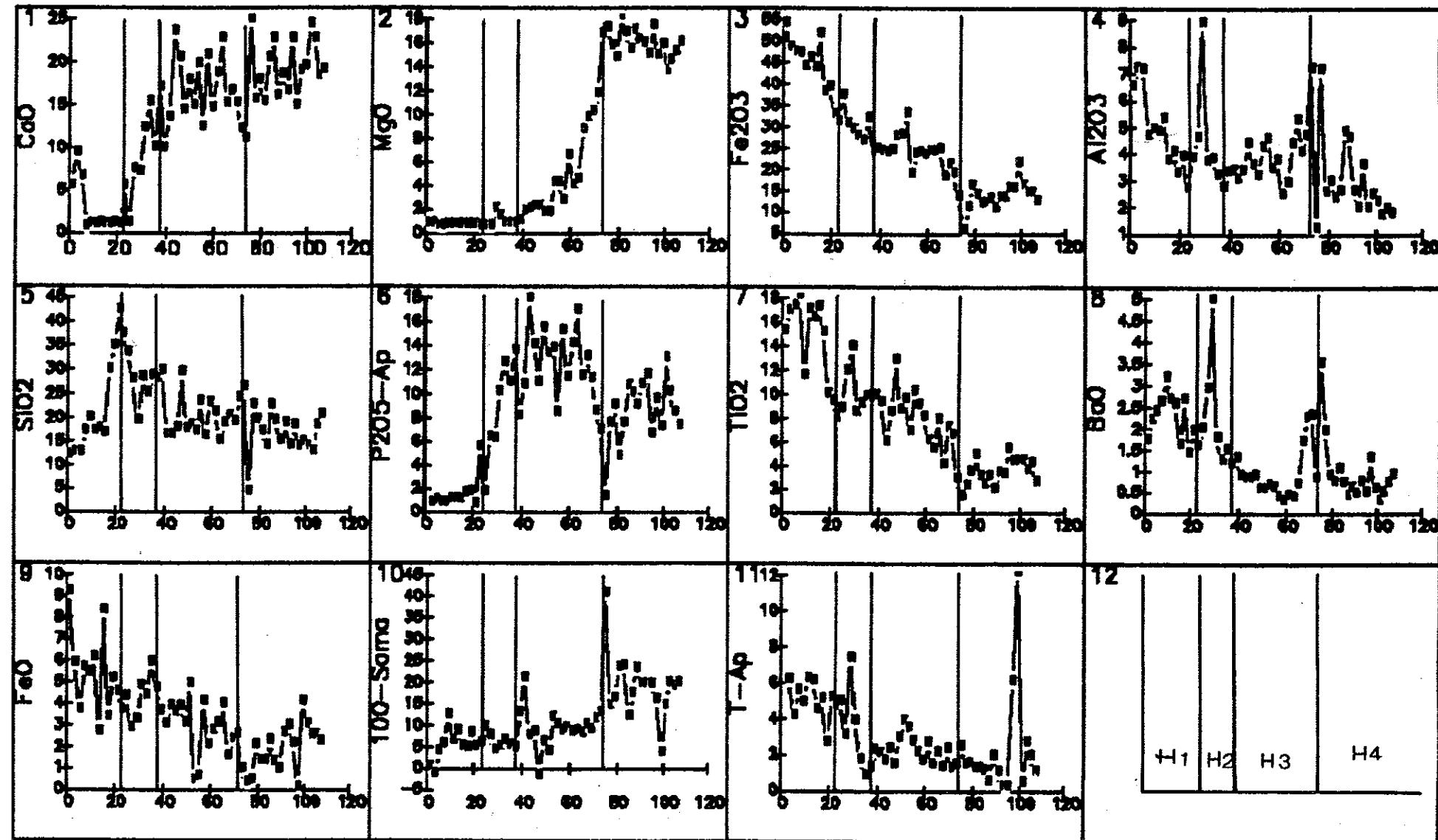


FIGURA 3 - Diagramas TEOR x PROFUNDIDADE para elementos maiores do Furo "B".

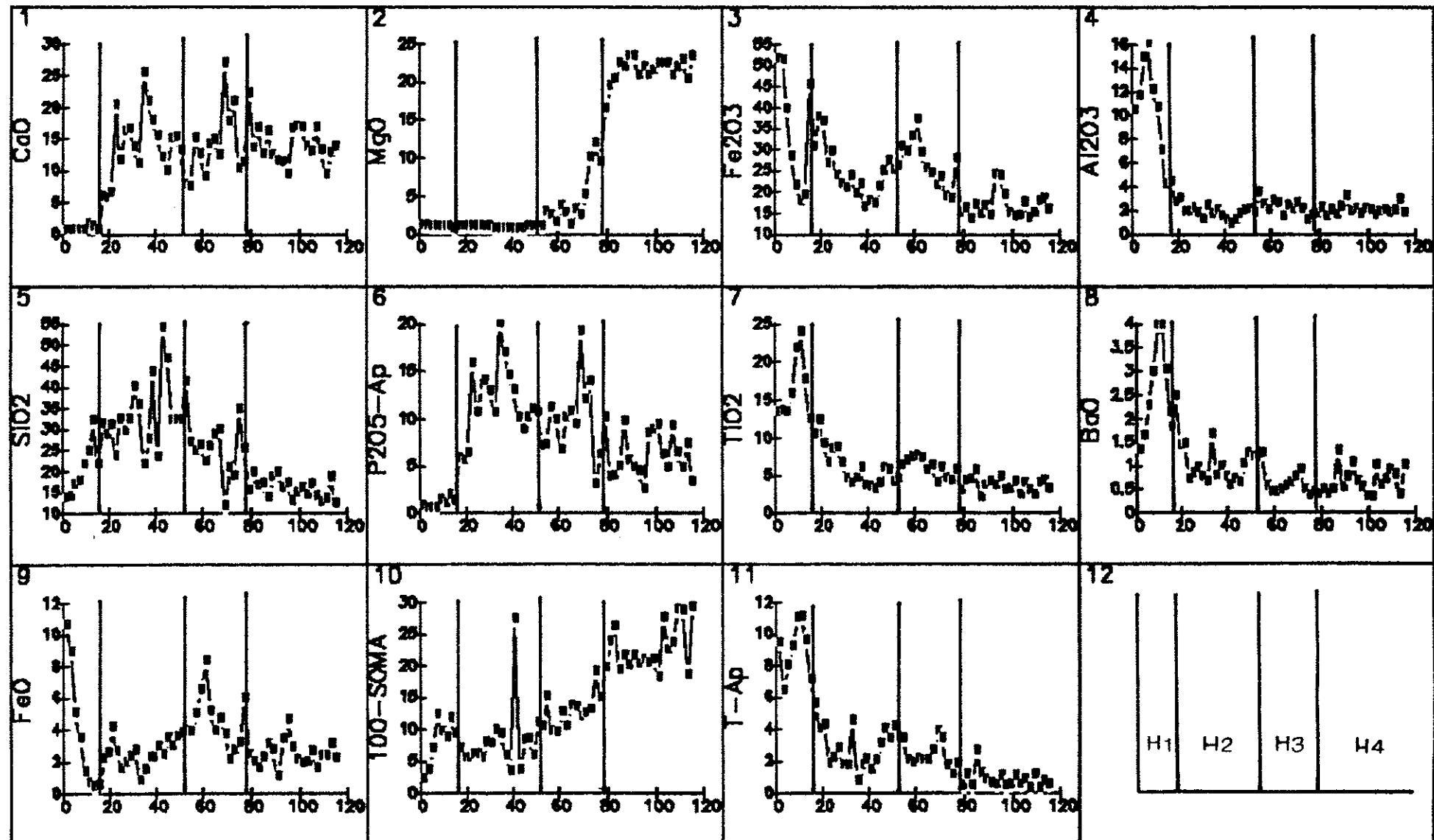


FIGURA 4 - Diagramas TEOR x PROFUNDIDADE para elementos maiores do Furo "C".

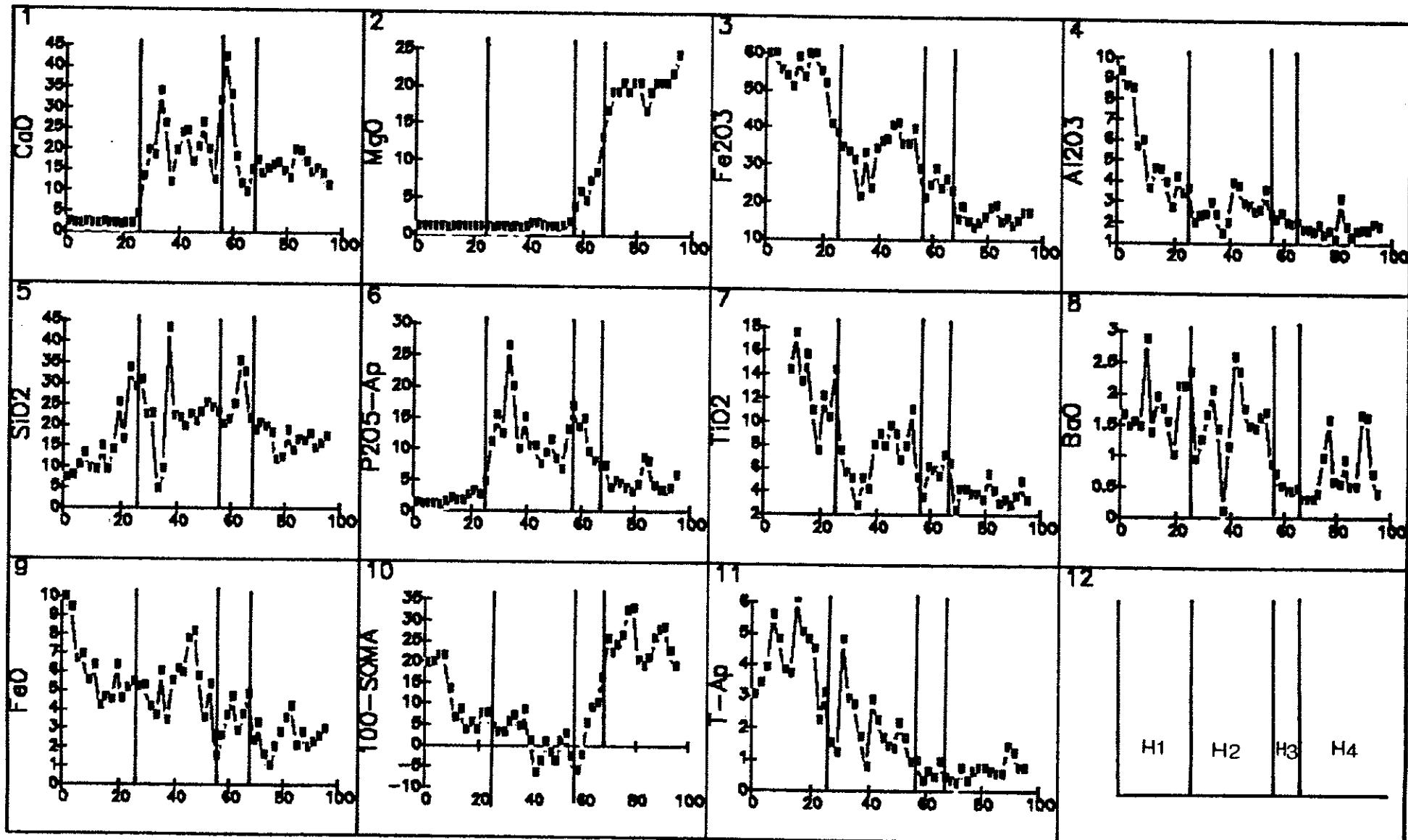


FIGURA 5 - Diagramas TEOR x PROFUNDIDADE para elementos maiores do Euro "D".

maior parte, entre 15 e 20%, e valores de MgO em ascensão (rocha alterada);

H_4 = valores de CaO irregulares e situados, em sua maior parte, entre 15 e 20%, e valores de MgO num patamar situado entre 15 e 20% (rocha fresca).

Em função desta subdivisão em horizontes, foram calculados os teores médios dos vários elementos em cada horizonte, que são apresentados nas TABELAS 5, 6, 7 e 8.

Embora a espessura varie de furo para furo, a composição média de cada horizonte é muito semelhante para os 4 furos, justificando a montagem de um perfil ideal que sintetiza o total dos dados. As TABELAS 9, 10, 11 e 12 fornecem as estatísticas básicas calculadas para cada variável em cada horizonte do perfil idealizado. A FIGURA 6 resume os principais parâmetros que caracterizam o perfil ideal.

A análise conjunta TABELAS 5 a 8 e FIGURA 6 permite que se trace um quadro geral do comportamento geoquímico dos elementos durante a alteração intempérica.

O CaO, com valores médios de 15,3% na rocha fresca e baixo desvio-padrão relativo, mantém-se com valores dessa ordem em H_0 e H_2 , porém apresentando desvios-padrões relativos mais elevados, o que significa uma menor homogeneidade do material. Em H_4 cai para valores próximos de zero. O MgO, a exemplo do CaO, apresenta valores altos e regulares em H_4 (média de 18,6%), mas, à diferença deste, cai irregularmente em H_0 para 5,3% em média e, finalmente, cai brutalmente nos horizontes superiores para valores em torno de 0,5%.

O Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂ e BaO apresentam comportamento semelhante, com médias crescentes de H_4 a H_1 : Fe₂O₃ passa de 14,7% em H_4 para 44,8% em H_1 , Al₂O₃ de 2,1% em H_4 a 5,6% em H_1 , TiO₂ de 3,4% em H_4 a 13,5% em H_1 e BaO, de 0,7% em H_4 a 2,0% em H_1 .

A SiO₂ apresenta valores na faixa de 16% em H_4 , que

nº amostras	H ₁ (0-19m)	H ₂ (20-51m)	H ₃ (58-91m)	H ₄ (92-100m)
	10	18	17	5
P ₂ O ₅ total	5.51 0.87	14.44 5.3	12.29 2.75	5.68 0.99
CaO	0.58 0.06	15.66 6.22	14.60 4.23	15.48 1.17
MgO	0.55 0.16	0.53 0.11	5.71 3.06	15.40 0.80
Fe ₂ O ₃	45.59 7.02	31.95 6.64	25.25 4.44	15.42 0.87
Al ₂ O ₃	3.55 1.21	2.04 0.67	2.63 0.86	1.34 0.16
SiO ₂	24.85 8.63	24.96 8.71	23.46 3.23	16.66 2.25
P ₂ O ₅ ap	0.89 0.18	12.18 5.44	11.59 2.55	5.26 1.24
TiO ₂	11.57 3.13	7.66 3.18	6.86 2.18	4.17 0.92
BaO	1.65 0.22	1.07 0.47	1.33 0.73	1.00 0.4
K ₂ O	0.05 0.00	0.06 0.001	0.21 0.29	1.16 1.09
P.F.	6.11 2.84	6.35 19.75	7.66 3.61	23.68 2.38
P ₂ O ₅ fosfII	4.62 0.87	2.26 1.00	0.69 0.56	0.42 0.28

TABELA 5 - DADOS GEOQUÍMICOS (MÉDIA E DESVIO PADRÃO) PARA OS HORIZONTES DEFINIDOS PARA O FURO "A"

	H ₁ (7-21m) nº amostras	H ₂ (22-39m) 8	H ₃ (40-71m) 16	H ₄ (71-107m) 16
PeO ₂ total	12.11 0.91	11.05 2.63	14.74 2.81	10.06 2.40
CaO	0.62 0.24	9.47 4.86	16.71 3.49	18.13 3.46
MgO	0.49 0.03	0.63 0.25	4.67 3.30	15.63 1.16
Fe ₂ O ₃	42.2 5.51	28.7 4.12	23.35 3.60	13.03 1.64
Al ₂ O ₃	4.25 0.65	3.39 0.60	3.70 0.73	3.15 1.73
SiO ₂	23.82 9.37	29.21 3.57	18.99 3.67	17.37 3.78
PeO ₂ ap	0.91 0.34	8.38 3.70	12.67 2.65	8.69 2.02
TiO ₂	14.1 3.28	9.26 1.12	7.70 2.06	3.25 0.94
BaO	2.27 0.56	1.63 0.53	0.84 0.61	0.73 0.38
K ₂ O	0.06 0.02	0.08 0.03	1.17 0.78	1.14 0.89
P.F.	5.71 3.19	6.35 2.58	8.14 4.40	17.51 3.52
PeO ₂ fosfII	4.85 1.05	2.68 1.45	2.07 0.74	1.37 1.33

TABELA 6 - DADOS GEOQUÍMICOS (MÉDIA E DESVIO PADRÃO) PARA OS HORIZONTES DEFINIDOS PARA FURTO "B"

no amostras	H ₁ (0-15m)	H ₂ (16-53m)	H ₃ (54-79m)	H ₄ (80-115m)
P ₂ O ₅ total	9.43 1.83	13.75 2.85	11.57 4.28	6.28 2.23
CaO	0.29 0.35	13.18 5.20	14.43 5.41	13.16 2.43
MgO	0.53 0.15	0.41 0.12	5.17 4.58	1.42 1.12
Fe ₂ O ₃	33.47 13.42	23.48 5.69	24.87 6.05	15.91 3.00
Al ₂ O ₃	10.59 3.62	1.66 0.78	1.88 0.61	1.70 0.43
SiO ₂	19.48 5.79	32.86 8.03	23.16 5.86	14.99 2.33
P ₂ O ₅ ap	0.65 0.47	11.06 3.78	9.60 3.79	5.69 2.21
TiO ₂	16.08 4.01	5.67 2.53	5.36 1.38	3.23 0.87
BaO	2.57 0.96	0.99 0.45	0.52 0.25	0.61 0.29
K ₂ O	0.11 0.03	0.07 0.03	0.13 0.08	0.37 0.14
P.F.	7.46 3.37	7.56 5.00	12.91 3.02	22.33 3.61
P ₂ O ₅ fosfII	8.78 1.59	2.67 1.27	1.97 0.91	0.59 0.52

TABELA 7 - DADOS GEOQUÍMICOS (MÉDIA E DESVIO PADRÃO) PARA OS HORIZONTES DEFINIDOS PARA O FURADO "C"

no amostras	H ₁ (0-25m)	H ₂ (26-53m)	H ₃ (54-67m)	H ₄ (68-95m)
P ₂ O ₅ total	5.37 1.24	13.83 5.43	11.81 3.51	4.79 1.70
CaO	1.22 1.24	19.57 5.87	22.17 11.59	14.69 2.27
MgO	0.57 0.06	0.61 0.19	5.82 3.39	19.46 1.81
Fe ₂ O ₃	52.70 6.71	33.01 5.52	24.05 2.75	14.95 1.96
Al ₂ O ₃	5.07 2.12	2.47 0.67	1.87 0.25	1.50 0.53
SiO ₂	14.50 8.23	21.47 8.47	24.75 5.49	15.80 2.97
P ₂ O ₅ ap	1.32 1.02	11.87 5.11	11.27 3.42	4.58 1.91
TiO ₂	12.60 2.86	6.76 2.21	5.31 1.07	3.42 0.19
BaO	1.72 0.460	1.47 0.58	0.46 0.18	0.60 0.38
K ₂ O	0.11 0.05	0.13 0.12	0.40 0.33	0.51 0.36
P.F.	10.03 6.81	0.69 4.20	3.37 7.53	24.02 4.49
P ₂ O ₅ ap	4.05 1.07	1.95 0.98	0.54 0.26	0.41 0.18

TABELA 8 - DADOS GEOQUÍMICOS (MÉDIA E DESVIO PADRÃO) PARA OS HORIZONTES DEFINIDOS PARA O FURADO "D"

	P ₂ O ₅	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅ ap	TiO ₂	BaO	K ₂ O	CaO/P ₂ O ₅	PF	T-Ap
Nº Amostras	39	38	39	39	39	39	39	35	39	39	38	38	39
Média	6.31667	0.760263	0.539744	44.7885	5.64359	20.0821	0.989744	13.429	1.98718	0.0835897	0.137195	7.80842	5.32692
Mediana	6	0.7	9.5	45.36	4.36	16.78	0.9	13.16	1.76	0.06	0.117157	6.715	4.9
Moda	6	1	0.5	59.04	2.95	31.4	0.9	16.13	1.48	0.05	0.2	6.63	4.7
Média Geom.	6.03092	0.58613	0.527054	43.0719	4.89253	17.9318	0.807896	12.935	1.88415	0.07534	0.0964255	6.35328	4.94697
Variância	4.18373	0.302413	0.013971	122.841	11.6048	87.9174	0.499366	14.3251	0.489647	1.84993E-3	9.47126E-3	25.004	4.59906
D. Padrão	2.04542	0.549921	0.118199	11.0833	3.40658	9.37643	0.706658	3.78485	0.699748	0.0430108	0.0973204	5.0004	2.14454
E. Padrão	0.327529	0.089209	0.018927	1.77476	0.54549	1.50143	0.113156	0.639756	0.112049	6.88725E-3	0.0157875	0.811172	0.343401
Mínimo	3.2	0.1	0.25	16.88	2.3	6.46	0.2	7.17	0.96	0.05	8.47478E-3	0.7	2.1
Máximo	11.8	3.4	0.9	59.68	15.76	41.88	4	23.47	3.92	0.24	0.485714	20.41	10.9

TABELA 9 - Estatísticas básicas calculadas para o horizonte H₁.

	P ₂ O ₅	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅ ap	TiO ₂	BaO	K ₂ O	CaO/P ₂ O ₅	PF	T-Ap	
Nº Amostras	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
Média	13.6364	15.031	0.47	29.1017	2.21254	27.1714	11.2763	7.07237	1.22271	0.0810169	1.09222	3.47161	2.36017
Mediana	12.4	14.36	0.5	29.76	2.02	27.36	10.3	7.56	1.2	0.06	1.07091	4.56	2.05
Moda	10	9	0.5	23.04	1.6	22.16	9.9	4.77	1.4	0.05	1.06957	4.5	2.6
Média Geom.	12.9645		0.494946	28.2309	2.03007	25.35	10.2263	6.46812	1.06917	0.0695746	1.02596		2.05515
Variância	21.0758		0.0346404	49.6252	0.80999	95.613	24.0384	8.13352	0.316434	4.4886E-3	0.128766	148.389	1.45567
D. Padrão	4.56	3.8056	0.186119	7.04451	0.89999	9.25273	4.9029	2.85193	0.562525	0.066997	0.358839	12.1815	1.20651
E. Padrão		0.856716	0.0242307	0.917118	0.11717	1.2046	0.638302	0.37129	0.0732345	8.72227E-3	0.0467169	1.58589	0.157074
Mínimo	5.3	0.8	0.25	15.68	0.56	3.8	1.5	2.44	0.04	0.02	0.126924	-7.58	0.5
Máximo	28.5	33.05	1.2	44.64	4.52	53.2	25.7	13.12	2.86	0.51	2.11333	89.28	5.4

TABELA 10 - Estatísticas básicas calculadas para o horizonte H₂.

	PeO _e	CaO	MgO	Fe _e O ₃	Al _e O ₃	SiO _e	PeO _e ap	TiO _e	BaO	K _e O	CaO/PeO _e	PF	T-Ap
Nº Amostras	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
Média	12.7868	16.1942	5.27642	24.4245	2.66679	22.207	11.3858	6.54113	0.866415	0.507925	1.29088	8.52792	1.40094
Mediana	12.6	14.58	4	23.68	2.36	22.22	11.1	6.24	0.64	0.2	1.15794	8.59	1.4
Moda	12.2	11.78	2	23.68	2.16	22.56	10.4	3.88	0.36	0.1	1.12197	8.5	0.2
Média Geom.	12.239	15.1512	4.06437	24.0071	2.46987	21.6469	10.8453	6.21118	0.684017	0.260978	1.23794	-	0.994321
Variância	12.8934	41.4886	13.4203	21.2572	1.078	25.0049	10.7705	4.49688	0.43077	0.432786	0.188807	28.824	0.968605
D. Padrão	3.59074	6.44117	3.66338	4.61055	1.03827	5.00049	3.2818	2.12058	0.65633	0.657865	0.43452	5.3688	0.984177
E. Padrão	0.493225	0.884762	0.503204	0.633308	0.142617	0.68687	0.45079	0.291285	0.0901539	0.0903647	0.0596859	0.737461	0.1351877
Mínimo	3.6	6.84	0.75	14.16	0.9	10.96	2.7	2.53	0.24	0.05	0.684	-6.85	0.1
Máximo	22.4	41.23	16	36.16	5.16	34.38	18.8	12.64	2.8	2.8	2.71111	20.27	3.7

TABELA 11 - Estatísticas básicas calculadas para o horizonte H_a.

	PeO _e	CaO	MgO	Fe _e O ₃	Al _e O ₃	SiO _e	PeO _e ap	TiO _e	BaO	K _e O	CaO/PeO _e	PF	T-Ap
Nº Amostras	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
Média	6.97151	15.2828	18.5849	14.7419	2.05509	16.0649	6.1717	3.36453	0.71434	0.806415	2.48566	21.414	0.799811
Mediana	6.6	15.26	18.75	14.16	1.65	16.04	6.1	3.31	0.65	0.53	2.24462	20.96	0.6
Moda	3.8	15.71	20	13.76	1.65	17.94	5.2	2.76	0.45	0.25	1.96842	18.76	0.6
Média Geom.	6.36896	14.9207	18.3576	14.5475	1.83728	15.7813	5.59844	3.23798	0.613871	0.529938	2.34273	20.9155	0.529636
Variância	8.89791	11.409	8.44919	6.36237	1.58293	9.57193	7.06976	0.85316	0.162983	0.835231	0.806075	21.034	0.815617
D. Padrão	2.98294	3.37772	2.90675	2.52237	1.25814	3.09385	2.6589	0.923667	0.403711	0.91391	0.897817	4.58628	0.903115
E. Padrão	0.409738	0.463965	0.399273	0.346475	0.172819	0.424973	0.365228	0.126875	0.055454	0.125535	0.123325	0.629975	0.124052
Mínimo	3	8.75	13.4	10.16	1	10.74	2.2	1.67	0.24	0.1	1.225	11.44	0.1
Máximo	15.2	24.12	23.75	23.2	7.08	25.84	12.7	5.48	1.88	4.3	4.52	31.97	5.9

TABELA 12 - Estatísticas básicas calculadas para o horizonte H_a.

	Espessura mínima e máxima		Cobertura laterítica	Teores médios (4 furos de sondagem) %												
				CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	BaO	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO/P ₂ O ₅	PF	P ₂ O ₅ (ap)	P ₂ O ₅ (fósforo II)
H 1 n=39	15-25 m		Cobertura laterítica	0,8 (72)	0,5 (22)	44,8 (25)	20,1 (47)	5,6 (61)	13,5 (28)	2,0 (35)	6,3 (2,0)	0,1 (51)	0,14 (71)	7,8 (64)	0,99 (71)	5,33 (40)
H 2 n=59	24-32 m		Saprolito com estrutura con- servada	15,0 (44)	0,5 (35)	29,1 (24)	27,2 (34)	2,2 (41)	7,1 (40)	1,2 (46)	13,6 (4,6)	0,1 (83)	1,09 (33)	5,5 (223)	11,28 (44)	2,36 (51)
H 3 n=53	28-34 m		Rocha altera- da	16,2 (40)	5,3 (69)	24,4 (19)	22,2 (23)	2,7 (39)	6,5 (32)	0,9 (76)	12,8 (3,6)	0,5 (130)	1,29 (34)	8,5 (62)	11,39 (29)	1,40 (70)
H 4 n=53			Rocha fresca glimerito cor- tado por cor- bonatito	15,3 (22)	18,6 (16)	14,7 (17)	16,1 (19)	2,1 (61)	3,4 (27)	0,7 (57)	7,0 (3,0)	0,8 (113)	2,48 (36)	21,4 (21)	6,17 (43)	0,80 (113)
		Mineralogia														
H 1		Goethita, quartzo, fosfatos de alumínio, caulinato, anatásio, magnetita, barita														
H 2		Apatita, goethita, quartzo, magnetita, barita, anatásio														
H 3		Apatita, goethita, quartzo, carbonato, vermiculito, ilmenito, magnetita, barita														
H 4		Carbonato, flogopita, opalita, magnetita, ilmenito, barita														

FIGURA 6 - Principais características do perfil ideal

sobem para 22,2% em H_0 e 27,2% em H_2 , e caem para 20,1% em H_4 . Os desvios-padrões relativos são crescentes de H_4 a H_2 , evidenciando a cada vez maior heterogeneidade da distribuição da sílica em direção aos níveis mais alterados. É interessante observar que a SiO_2 atinge, localizadamente, no material alterado (H_0 , H_2 e H_4), valores que excedem 30% e, no caso de H_2 chegam a exceder 50%.

A perda ao fogo (PF) apresenta valores máximos na rocha fresca, que vão caindo muito irregularmente nos horizontes superiores. Valores negativos de perda ao fogo (TABELAS 1, 2, 3 e 4) são devidos a erros analíticos na determinação dos outros óxidos e não apresentam maior significado.

O FeO contido na apatita está presente na rocha fresca com 6,2% em média e cresce em H_0 e H_2 até cerca de 11% em média. Embora esses 2 horizontes sejam semelhantes quanto ao teor médio de FeO apatítico, em H_0 a faixa de variação de teores é bem mais estreita que em H_2 , onde é encontrado seu valor máximo (25,7%). Em H_4 o FeO apatita tende a zero. O FeO contido nos fosfatos secundários cresce continuamente de H_4 a H_2 , partindo de valores praticamente nulos na base do perfil, e atingindo no topo valores médios de 5,3% e valor máximo de 10,9%.

Finalmente, o K_2O , que está presente no perfil sempre em valores muito baixos, apresenta uma tendência à queda, de H_4 a H_0 , e ao quase total desaparecimento em H_2 e H_4 .

2. BALANÇO GEOQUÍMICO

O TiO_2 foi selecionado entre os óxidos analisados como referência imóvel no cálculo do balanço por ser, entre os elementos analisados, o mais insolúvel no meio superficial. A TABELA 13 mostra os resultados desses cálculos, sempre referidos ao horizonte de rocha fresca H_4 .

	H _a	H _e	H _d
CaO	-44	-53	-99
MgO	-85	-99	-99
Fe ₂ O ₃	-13	-5	-22
Al ₂ O ₃	-33	-48	-33
SiO ₂	-28	-19	-68
TiO ₂	0	0	0
BaO	-29	-14	-29
K ₂ O	-63	-94	-96
P.F.	-79	-88	-91
FeO _e total	-4	-6	-77
FeO _e ap	-3	-13	-96
FeO _e fosfII	-10	+38	+62
Variação			
Total	-48	-52	-75

TABELA 13 - Balanço geoquímico isotí (perdas e ganhos porcentuais em relação a H_d).

Variações em torno de 10% são consideradas nulas dentro dos limites de erro admitidos.

O que se observa é uma evolução por perda generalizada de massa que chega a atingir, em média, valores de 48% em H_a, 52% em H_e e, finalmente, 75% em H_d. Quase todos os elementos são perdidos durante a alteração, mas em ritmos diferentes. MgO, K₂O e CaO são os que atingem percentuais de perda mais elevados, chegando a mais de 95% em H_d, sendo que para o MgO as perdas ocorrem desde os níveis mais iniciais da alteração, já em H_a, enquanto que para o K₂O e CaO elas só se acentuam em H_e e em H_d, respectivamente.

O comportamento do FeO_e é bastante peculiar. Se considerarmos o FeO_e total, verificaremos que há conservação em H_a e em H_e e perdas substanciais (77%) em H_d. Suas parcelas (FeO_e apatita e FeO_e fosfII), no entanto,

apresentam comportamento bem diferenciado. O Fe_{M} apatita mantém-se constante em H_0 e em H_2 , e sofre perda brutal, quase total, em H_4 . Já o Fe_{M} fosfII mostra praticamente conservação de sua pequena quantidade original em H_0 , ganhos em H_2 e ganhos maiores ainda em H_4 .

A SiO_2 , de modo geral, é perdida, levemente em H_0 e H_2 e em quase 70% de seu valor inicial em H_4 . O fato de a perda em H_0 ser menor que em H_2 pode indicar uma ligeira acumulação relativa de SiO_2 em H_2 , a partir dos horizontes superiores.

O Fe_{M} sofre perdas praticamente nulas em H_0 e H_2 , e leves em H_4 , apresentando um comportamento quase que estritamente residual, como aquele assumido para o TiO_2 . O BaO apresenta perdas leves, não chegando a 30% em H_0 e H_2 . Aqui também, como para a SiO_2 , parece haver regressão das perdas em H_4 , com possível significado de mobilidade do Ba no perfil. Com relação ao Al_{M} , a evolução também se dá por perdas, mas estas regredem em H_4 . Neste caso não há horizontes superiores que poderiam constituir fonte possível de Al_{M} no perfil para justificar essa regressão. Esse relativo aumento de Al_{M} em H_4 pode talvez ser explicado por aporte lateral, a partir de litologias mais aluminosas da borda do maciço.

Com base nos dados do balanço geoquímico pode-se estabelecer uma escala de mobilidade para os elementos, considerando o perfil como um todo, sendo esta escala a seguinte: $\text{Mg} > \text{K} > \text{Ca} > \text{P} > \text{Si} > \text{Al} > \text{Ba} > \text{Fe}, \text{Ti}$.

3. RELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS

Para investigar as relações entre as variáveis, isto é, identificar grupo de elementos de comportamento semelhante na evolução do perfil, foi utilizada a análise fatorial modo R com rotação varimax.

Este tratamento estatístico parte da matriz de

correlação entre as variáveis e define os eixos de um hiperelipsóide de dispersão explicativo da variância total das variáveis utilizadas. Assim, cada amostra será representada por um ponto no espaço de n dimensões (n = número de variáveis = número de elementos analisados). As coordenadas desse ponto serão os teores dos vários elementos analisados. Como as variáveis não são totalmente independentes entre si (algumas guardam entre si altos coeficientes de correlação), é possível construir um novo espaço cujos eixos (fatores) serão combinações lineares das variáveis originais. Os coeficientes das variáveis nessas combinações lineares são os "loadings" e as coordenadas das amostras no novo espaço fatorial são os "factor scores". São então calculados os valores próprios para cada fator, que indicam a porcentagem da variância total explicada por esse fator, assim como as communalidades para cada variável, que expressam a porcentagem de sua variância total explicada pelo modelo de n fatores. A retenção de um número k limitado de fatores ($k < n$) permitirá explicar uma parcela importante da variância total. Neste caso, as communalidades precisam ser reestimadas para um modelo de k fatores.

Existem técnicas que permitem uma rotação dos eixos fatoriais para as posições otimizadas, sendo a mais usual a denominada varimax. Em consequência da redução das dimensões do espaço original, fica mais fácil a visualização da informação. A projeção das variáveis no plano definido por pares de fatores é um auxiliar gráfico no processo interpretativo, capaz de traduzir por um critério de distância a interrelação entre elas. Essa interrelação entre as variáveis (no caso, os elementos químicos) pode ser interpretada como devida à influência de processos geoquímicos comuns que governam seu comportamento.

As técnicas de análise fatorial aplicadas a dados geoquímicos têm sido extensivamente utilizadas. A teoria está muito bem exposta em DAVIS (1973) e JORESKOG *et al.* (1976), entre outros. A aplicação em geoquímica é

principalmente voltada para dados de prospecção (VAIRINHO et al. 1990; PAN & HARRIS 1990; MARCOTTE & FOX 1990 por exemplo).

Para o presente estudo o número total de amostras consideradas foi de 199, pois 6 delas apresentavam análises incompletas. Do total de 16 variáveis da planilha original, foram selecionados as 10 consideradas mais relevantes: CaO, MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, FeO_e apatita, TiO₂, BaO, Ferda ao Fogo e FeO_e fosfII. Foi, portanto, sobre uma matriz de 199x10 que a análise fatorial foi executada.

A TABELA 14 apresenta a matriz dos coeficientes de correlação Pearson entre as variáveis. Na TABELA 15a estão indicados as communalidades e os valores próprios para os 10 fatores calculados que indicam a porcentagem da variância total explicada para cada um deles. Dado que os 2 primeiros fatores dão conta de uma parte substancial da variância total (69,2%), escolheu-se um modelo de 2 fatores para efetuar a rotação varimax. A TABELA 15b indica os "loadings" para cada variável em cada um dos fatores rotacionados e a FIGURA 7 é a representação gráfica desses dados. Na TABELA 15c constam as communalidades estimadas para o modelo de 2 fatores.

O exame da FIGURA 7 permite identificar 4 grupos de elementos:

- MgO, PF : altos "loadings" negativos em F₂; "loadings" próximos de zero em F₁;
- CaO, FeO_e apatita : altos "loadings" negativos em F₁; "loadings" positivos em F₂;
- Fe₂O₃, TiO₂, FeO_e fosfII, BaO, Al₂O₃ : altos "loadings" positivos em F₁; "loadings" positivos em F₂;
- SiO₂ : alto "loading" positivo em F₂; "loading" próximo de zero em F₁.

Assim, F₂ parece opor a rocha fresca (onde os valores de MgO e PF são elevados, pela presença de carbonatos magnesianos) aos materiais mais alterados, enquanto que F₁ opõe, entre os materiais alterados, aqueles

	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO ₂ -ap	TiO ₂	BaO	P.F.	T-AP
CaO	1.000	0.2110 (199)	-0.5755 (199)	-0.4423 (199)	-0.2535 (199)	0.8083 (199)	-0.6410 (199)	-0.4482 (199)	0.0187 (199)	-0.5858 (199)
	0.0000	0.0028	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.7937	0.0000
MgO	0.2110 (199)	1.0000 (199)	-0.6760 (199)	-0.2517 (199)	-0.4541 (199)	-0.1992 (199)	-0.5861 (199)	-0.3853 (199)	0.8314 (199)	-0.5209 (199)
	0.0028	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000	0.0048	0.0000	0.0000	0.0000
Fe ₂ O ₃	-0.5755 (199)	-0.6760 (199)	1.0000 (199)	0.3178 (199)	0.0661 (199)	-0.3385 (199)	0.7194 (199)	0.4303 (199)	-0.6288 (199)	0.5282 (199)
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3537	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Al ₂ O ₃	-0.4423 (199)	-0.2517 (199)	0.3178 (199)	1.0000 (199)	-0.1445 (199)	-0.3434 (199)	0.6235 (199)	0.5636 (199)	-0.2195 (199)	0.6743 (199)
	0.0000	0.0003	0.0000	0.0000	0.0417	0.0000	0.0000	0.0000	0.0018	0.0000
SiO ₂	-0.2535 (199)	-0.4541 (199)	0.0661 (199)	-0.1445 (199)	1.0000 (199)	-0.0072 (199)	0.0537 (199)	0.0040 (199)	-0.3976 (199)	0.1076 (199)
	0.0003	0.0000	0.3537	0.0417	0.0000	0.9198	0.4513	0.9551	0.0000	0.1304
FeO ₂ -ap	0.8083 (199)	-0.1992 (199)	-0.3385 (199)	-0.3434 (199)	-0.0072 (199)	1.0000 (199)	-0.4215 (199)	-0.3453 (199)	-0.2807 (199)	-0.3948 (199)
	0.0000	0.0048	0.0000	0.0000	0.9198	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000
TiO ₂	-0.6410 (199)	-0.5861 (199)	0.7194 (199)	0.6235 (199)	0.0537 (199)	-0.4215 (199)	1.0000 (199)	0.6247 (199)	-0.4882 (199)	0.6920 (199)
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4513	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BaO	-0.4482 (199)	-0.3853 (199)	0.4303 (199)	0.5636 (199)	0.0040 (199)	-0.3453 (199)	0.6247 (199)	1.0000 (199)	-0.2790 (199)	0.6229 (199)
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9551	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000
P.F.	0.0187 (199)	0.8314 (199)	-0.6288 (199)	-0.2195 (199)	-0.3976 (199)	-0.2807 (199)	-0.4882 (199)	-0.2790 (199)	1.0000 (199)	-0.3473 (199)
	0.7937	0.0000	0.0000	0.0018	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
T-AP	-0.5858 (199)	-0.5209 (199)	0.5282 (199)	0.6743 (199)	0.1076 (199)	-0.3948 (199)	0.6920 (199)	0.6229 (199)	-0.3473 (199)	1.0000 (199)
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1304	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

TABELA 14 - Coeficientes de Correlação Pearson entre as variáveis.

Var.	Comunal.	Fator	Val. Próp.	X Var.	X Acum.
CaO	0.99484	1	4.76079	47.6	47.6
MgO	0.99578	2	2.16117	21.6	69.2
Fe ₂ O ₃	0.99771	3	1.18157	11.8	81.0
Al ₂ O ₃	0.95329	4	0.72790	7.3	88.3
SiO ₂	0.99553	5	0.44309	4.4	92.7
FeO _e -ap	0.99019	6	0.29701	3.0	95.7
TiO ₂	0.98319	7	0.20348	2.0	97.8
BaO	0.71163	8	0.15254	1.5	99.3
PF	0.99569	9	0.07178	0.7	100.0
T-ap	0.93859	10	0.00067	0.0	100.0

TABELA 15a - Comunalidades e valores próprios para os 10 fatores calculados.

Var/Fator	1	2	Var.	Com. Estim.
CaO	-0.86213	0.05042	CaO	0.74580
MgO	-0.28020	-0.92425	MgO	0.93274
Fe ₂ O ₃	0.62787	0.53535	Fe ₂ O ₃	0.68083
Al ₂ O ₃	0.73026	0.07649	Al ₂ O ₃	0.53913
SiO ₂	-0.02445	0.50090	SiO ₂	0.25150
FeO _e -ap	-0.77348	0.43440	FeO _e -ap	0.78697
TiO ₂	0.81424	0.39420	TiO ₂	0.81837
BaO	0.71124	0.21344	BaO	0.55142
PF	-0.13268	-0.93845	PF	0.89830
T-ap	0.79069	0.30283	T-ap	0.7169

TABELA 15b - "Loadings" para cada variável em cada um dos fatores rotacionados.

TABELA 15c - Comunalidades estimadas para dois fatores.

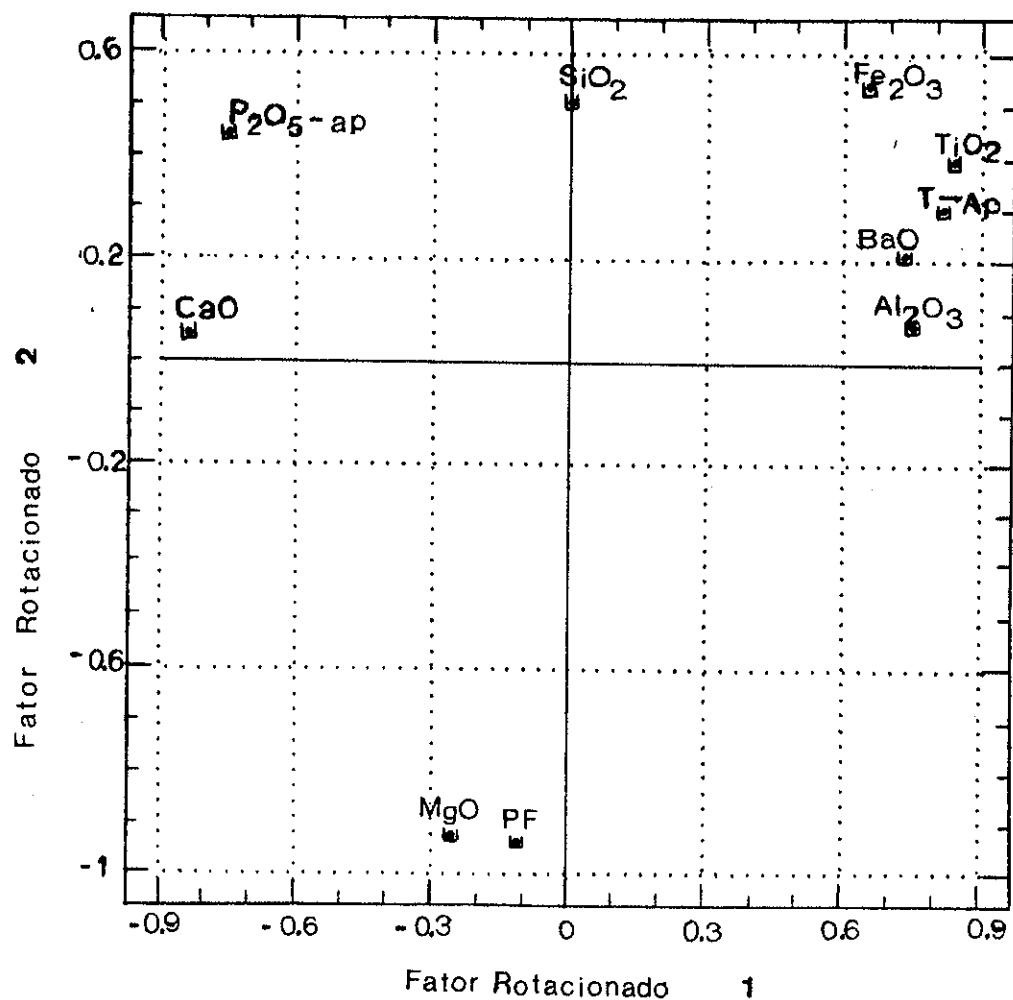


FIGURA 7 – Representação gráfica para dois fatores rotacionados.

dos níveis intermediários do perfil (Fe_{Oe} apatita e CaO elevados : concentração máxima de apatita) aos níveis superiores do perfil (Fe_{Oe} , TiO_{e} , Fe_{Oe} fosfII, BaO e Al_{Oe} elevados : concentração máxima de goethita, fosfatos secundários, barita, magnetita e anatásio). A SiO_{e} , situada no gráfico no domínio dos materiais alterados, onde, de fato, ela se concentra, é equidistante entre os dois últimos grupos mencionados, reflexo do fato de a silicificação afetar tanto os níveis intermediários como os níveis superiores do perfil.

4. EVOLUÇÃO MINERALÓGICA

A análise dos dados geoquímicos, complementada por dados difratométricos e análise por microscopia óptica de amostras representativas dos vários horizontes presentes, permite que se apresente um quadro da composição mineralógica semi-quantitativa de cada horizonte (FIGURA 6) e permite, também, que se levantem hipóteses preliminares sobre os mecanismos de destruição dos minerais primários e de formação dos minerais secundários.

A rocha fresca (H_1), uma associação de carbonatitos e glimmerito, tem como minerais principais flogopita, carbonatos magnesianos e calcíferos, opacos, e em torno de 13,5% em média, de apatita; como acessórios, estão presentes principalmente a barita e algum pirocloro. A razão CaO/ Fe_{Oe} (FIGURA 6) de 2,48 reflete o fato de que apenas parte do Ca está na apatita (CaO/ Fe_{Oe} ap = 1,3), estando o resto nos carbonatos.

No início da alteração (H_2) ocorre a progressiva diminuição na quantidade dos carbonatos por dissolução (perdas médias de 44% de CaO e 85% de MgO), e começa um processo de concentração relativa dos minerais acessórios e da apatita. A razão CaO/ Fe_{Oe} é próxima à da apatita teórica: a maior parte do CaO e do Fe_{Oe} estão contidos na apatita;

uma pequena parcela do FeO_m está nos fosfatos secundários que começam a aparecer neste nível. Não há perda de fósforo nessa horizonte, pois o que é liberado com a dissolução incipiente da apatita precipita como fosfato secundário. Assim, o que acontece com a apatita é essencialmente um processo de concentração residual, que eleva seus teores a cerca de 25% em peso. A flogopita também se concentra residualmente, mas sofre transformação em direção à vermiculita. Neste horizonte começa a haver o aparecimento de quartzo, possivelmente gerado por neoformação supérigena a partir da hidrólise dos silicatos. Não está excluída, no entanto, a hipótese de que pelo menos parte desse quartzo seja herdada de um processo de silicificação de origem hidrotermal, dada a sua frequente associação com monazita. O confinamento deste material silicificado aos horizontes do perfil de alteração poderia simplesmente representar sua maior alterabilidade por intemperismo, devido ao seu maior fraturamento.

O horizonte H_2 , de caráter saprolítico, caracteriza-se pela ausência quase completa dos carbonatos e, assim como em H_1 , pela presença importante de apatita, concentrada residualmente. No entanto, a quantidade absoluta de apatita vem diminuindo um pouco (TABELA 11), sendo o fósforo liberado integrado nos fosfatos secundários, cuja concentração absoluta aumenta nesse horizonte (+38%, TABELA 11). Isso fica refletido na razão $\text{CaO}/\text{FeO}_\text{m}=1,09$, menor do que na apatita teórica, pois, quando de sua dissolução, o Ca é lixiviado e o P permanece na forma de fosfatos secundários. Os demais minerais de comportamento residual encontram-se também mais concentrados, com exceção da vermiculita, que quase desaparece nesse horizonte. A neoformação de outros minerais secundários, como goethita e anatásio, também é observada. A regressão nas perdas absolutas de SiO_2 e BaO podem estar refletindo neoformação de quartzo e de barita, a partir de níveis superiores do perfil. O quartzo encontra-se particularmente enriquecido em

algumas amostras desse horizonte, atingindo valores ponderais que ultrapassam 50%.

Finalmente, em H_4 , que é um material laterítico aloterítico muito rico em goethita, concentram-se os minerais residuais, principalmente a magnetita, e os neoformados, com especial destaque aos fosfatos secundários. A apatita desaparece quase que totalmente nesse horizonte, sendo parte do P utilizada na formação dos fosfatos secundários e parte lixiviada do perfil, como mostram os cálculos do balanço geoquímico (TABELA 13). Essa dissolução da apatita só se inicia quando os carbonatos já não estão presentes, o que leva a supor que esse processo é controlado por valores de pH relativamente baixos. Na ausência dos carbonatos, a apatita passa a constituir o arcabouço que sustenta a estrutura do material alterado (H_3 e H_2 são níveis isalteríticos) e, com a sua dissolução, ocorre a perda da estrutura original e, consequentemente, a reorganização da alterita (H_4 é aloterítico). A silicificação é geralmente mais discreta em H_4 , devido provavelmente à dissolução do quartzo nesse horizonte, que vai se precipitar em níveis inferiores do perfil. Os níveis superiores de H_4 apresentam-se algumas vezes enriquecidos em caulinita, que parece constituir-se de material alóctone.

CONCLUSÕES

Os dados mineralógicos e geoquímicos, desde a rocha fresca até níveis mais superficiais do perfil de alteração, indicam que a rocha sofreu uma evolução do tipo laterítico, caracterizada por perda de todos os elementos, com exceção do Ti e do Fe. Essa perda, não se dando na mesma escala e no mesmo ritmo para os demais elementos, faz com que alguns deles apareçam relativamente concentrados em certos horizontes, como é o caso do $FeOe$, o que se traduz pela

existência de níveis intermediários do perfil extremamente ricos em apatita. A cobertura do perfil, representada pelo horizonte H_1 , é estéril como minério, pois embora possua teores de $P_{2}O_5$ ainda elevados, estes se apresentam como fosfatos aluminosos secundários, não apropriados à exploração.

A evolução laterítica se dá essencialmente *in situ*, contando apenas com discreta contribuição alóctone nos níveis superiores do perfil, evidenciada pelos cálculos do balanço Al_2O_3 , e pelo aparecimento repentino de caulinita em H_1 . O processo de evolução laterítica se inicia e se desenvolve preferencialmente ao longo de descontinuidades da rocha, resultando na elaboração de um material mais heterogêneo que o material de partida, o que é evidenciado por valores crescentes dos desvios-padrões relativos para os elementos mais abundantes (CaO , MgO , FeO_3 , SiO_2) de H_4 para H_1 (FIGURA 6).

A origem do intenso fenômeno de silicificação que afeta principalmente os horizontes intermediários do perfil não ficou perfeitamente esclarecida. No entanto, há elementos suficientes que indicam que dissolução e precipitação da sílica ocorreram no perfil durante o intemperismo, sendo, portanto, pelo menos parte do quartzo de origem intempérica.

CAPÍTULO IV

OS PERFIS DE ALTERAÇÃO

1. O PERFIL "A"

No perfil A (FIGURA 8a) foi amostrada uma sequência de materiais em ordem de alteração crescente (da base para o topo):

- _ A1P, A1C, A1CR e A1B, que representam a rocha fresca (H4);
- _ A2 correspondente ao horizonte de rocha alterada (H3);
- _ A3, A4 e A5 correspondentes a diferentes níveis no horizonte de saprolito, (H2);
- _ A6 e A7 correspondentes ao horizonte laterítico, (H1);
- _ A8 correspondente à cobertura superficial.

Além dessas amostras, foram também selecionadas, em diferentes níveis do perfil, amostras que correspondem a facies particulares:

- _ A1MG corresponde a uma facies enriquecida em flogopitas centimétricas dentro do horizonte H4;
- _ A4S e A4M correspondem a um "boxwork" silicoso dentro do nível A4 (A4S=arcabouço silicoso; A4M=mátriz de preenchimento);
- _ A5G corresponde a uma facies ferruginizada dentro do nível A5.

Através do estudo do primeiro grupo de amostras, será possível detalhar a caracterização da evolução do perfil de alteração, cujos traços gerais já foram abordados no Capítulo III, referente aos furos de sondagens. O estudo das facies particulares permitirá uma interpretação das variações locais que ocorrem dentro do perfil.

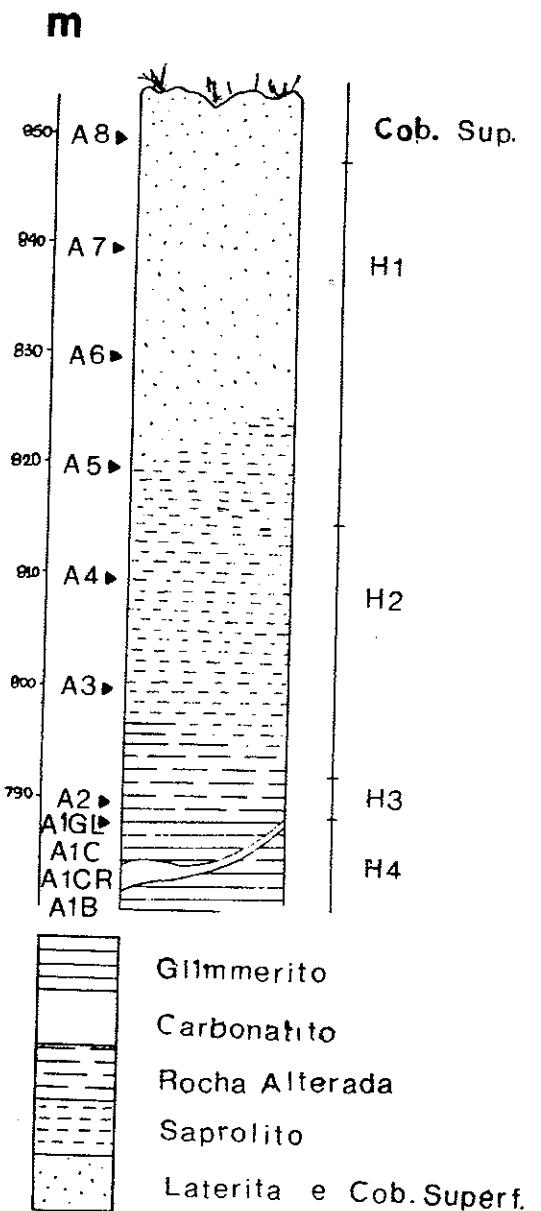


FIGURA 8a - Esquematização do perfil "A".

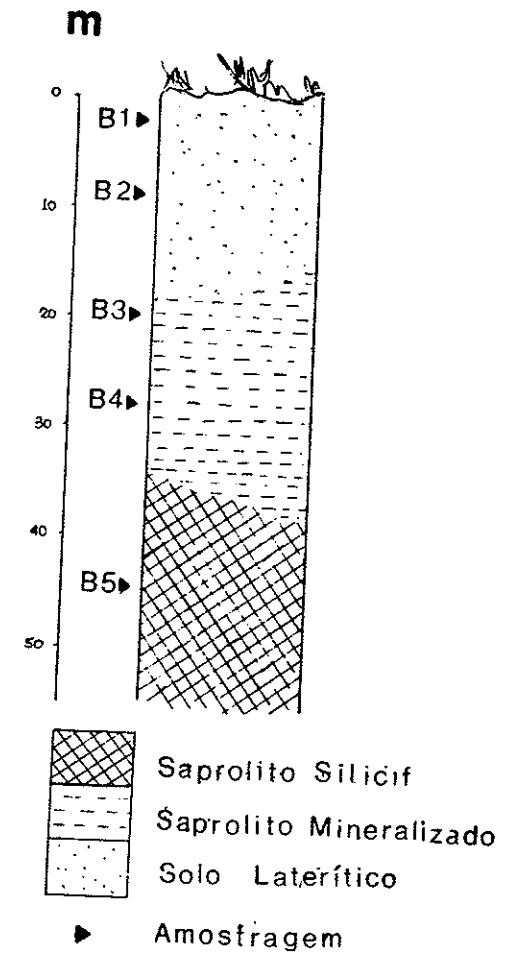


FIGURA 8b - Esquematização do perfil

a. CARACTERIZAÇÃO MACROSCÓPICA DO PERFIL DE ALTERAÇÃO

Na base do perfil, na bancada de 790 metros, a rocha carbonatítica só ocorre em veios decimétricos a milimétricos formando um verdadeiro "stockwork" que recorta a rocha glimmerítica (FIGURAS 9 e 10). As amostras A1C e A1CR representam a rocha carbonatítica só. Em A1C o carbonatito apresenta uma alternância de bandas claras e escuras, e em A1CR o carbonatito é homogêneo, de coloração cinza clara. A rocha com bandamento ocorre em veios e diques, em geral, mais espessos que a rocha sem bandamento.

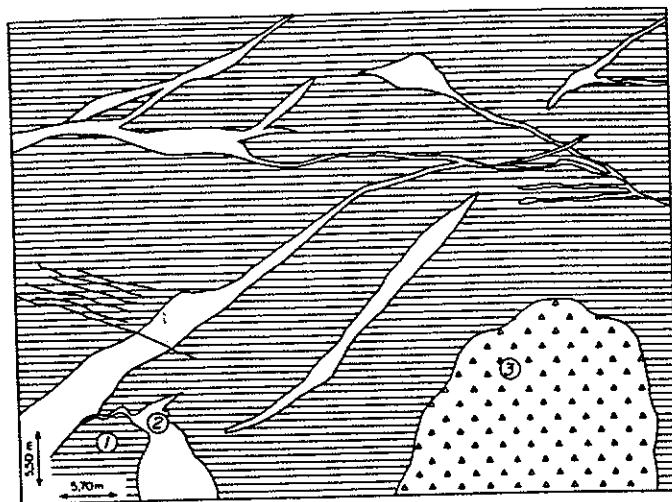
A amostra A1GL corresponde ao glimmerito, já em estágio inicial de alteração. De coloração cinza esverdeada, esta rocha apresenta, macroscopicamente, uma mineralogia composta essencialmente de flogopita e magnetita na forma de veios e pequenos bolsões centimétricos; a presença de carbonato é evidenciada pela efervescência com HCl frio.

No contato entre os veios de carbonatito e o glimmerito, podem ocorrer flogopitas apresentando dimensões superiores a 10 cm. A amostra A1MG representa uma dessas ocorrências, ligeiramente alterada, sendo composta por vermiculitas (FIGURA 11). Formando veios e sem apresentar graduação granulométrica com a matriz micácea do glimmerito, este material parece estar associado à intrusão das rochas carbonatíticas (FIGURA 10).

A amostra A1B representa uma brecha magmática, de matriz flogopítica fina contendo algum carbonato e restos de olivina disseminados. Os clastos são de rocha carbonatítica e de rocha ultramáfica. Veios de carbonato de espessura milimétrica cortam a matriz, e por vezes também os clastos.

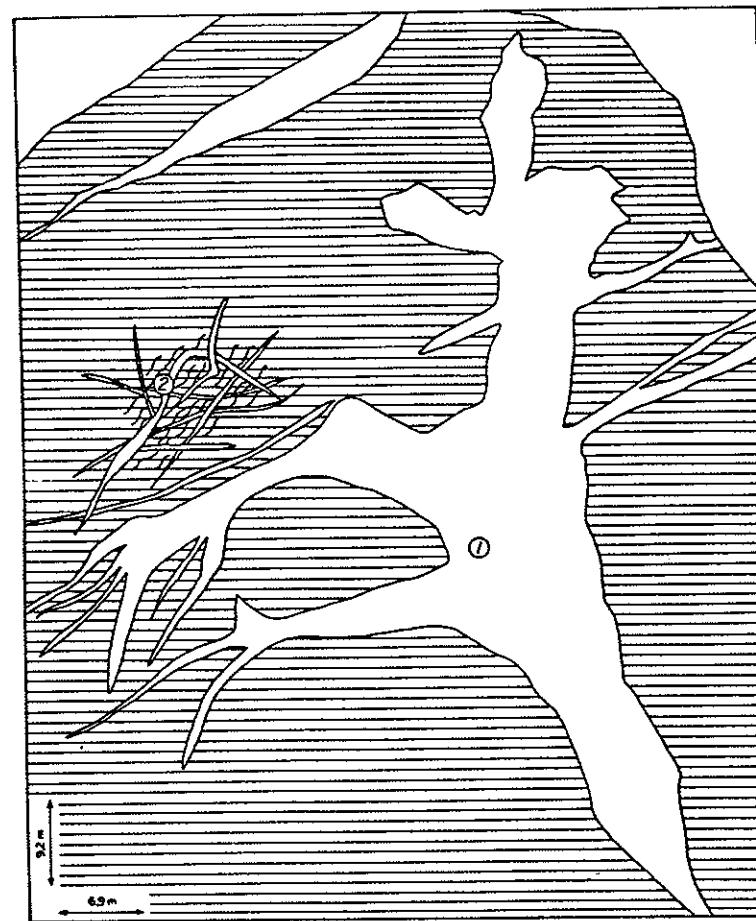
Na mesma bancada de 790 metros, a amostra A2 representa uma fase inicial da alteração de A1GL. Constitui-se num material isalterítico onde as texturas, estruturas e relações mineralógicas observadas nas amostras anteriores estão preservadas. O glimmerito alterado apresenta coloração

**FIGURA 9 - Esquematização do nível A1
(Perfil A).**



- [Horizontal lines] glimerito
- [White box] Carbonatito
- [Diagonal hatching] Veios de carbonatito (mm)
- [Dotted pattern] "Brecha" magmática
- Setor Amostrado
- (1) AIGL (2) AIC R (3) "Brecha"

FIGURA 10 - Esquematização do nível A1 (Perfil A).



- [White box] Carbonatito
- [Horizontal lines] Glimmerito
- [Diagonal hatching] Micas > 10 cm
- Setor Amostrado
- (1) AIC (2) AIMG

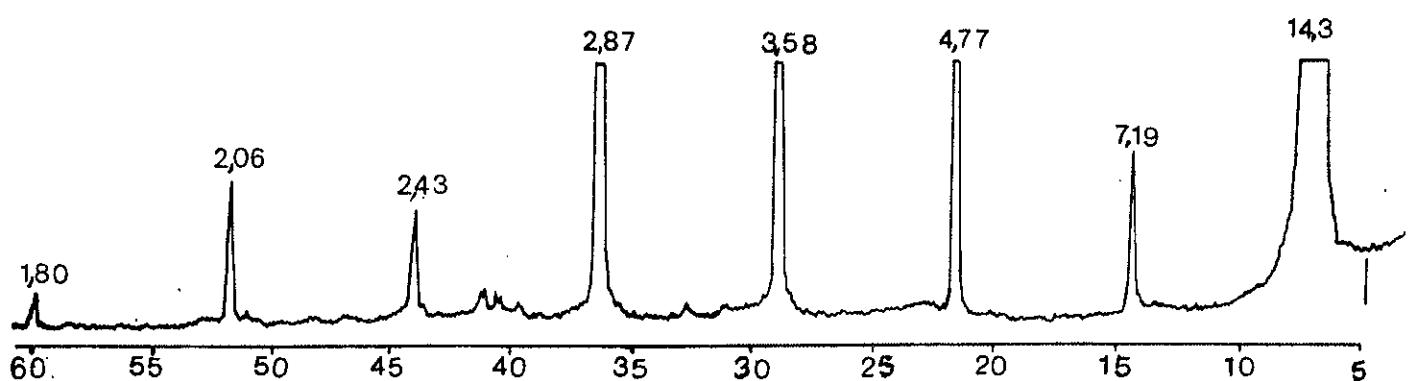


FIGURA 11 - Difratograma de raios-X da amostra AIMG.

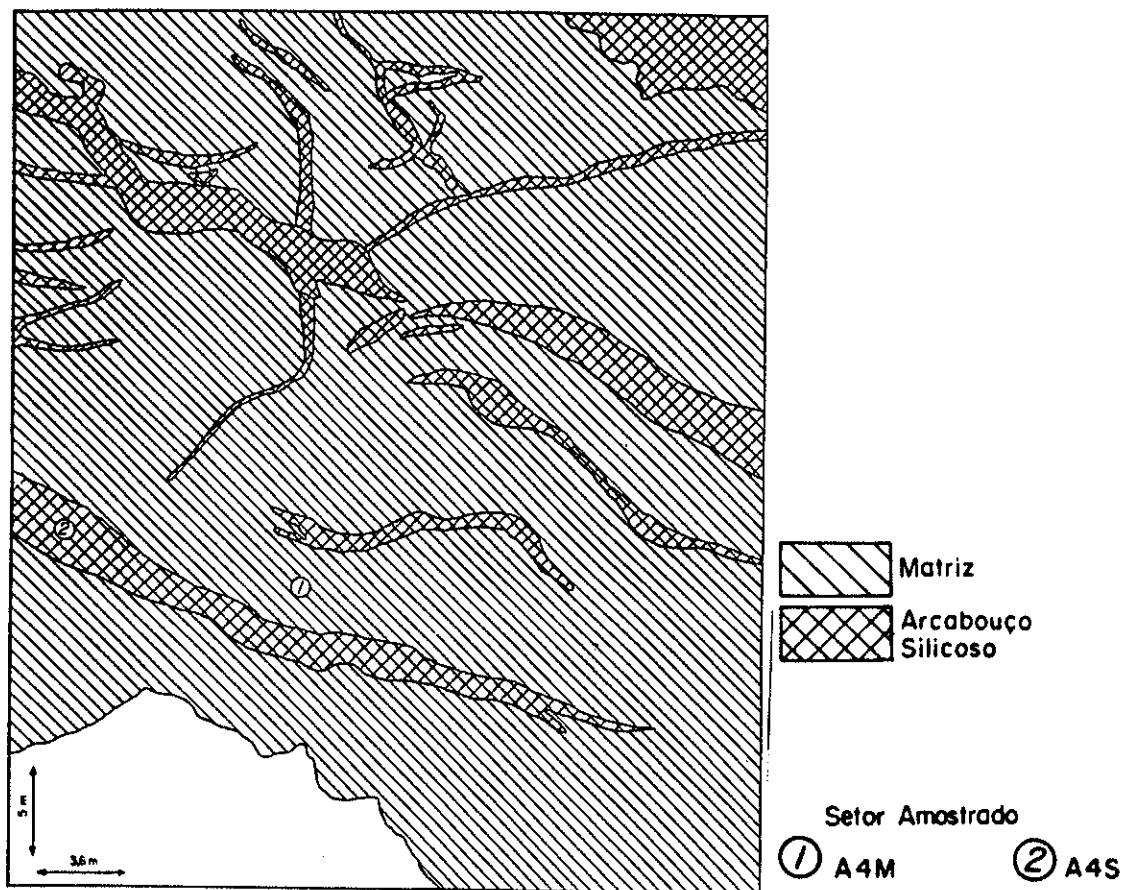


FIGURA 12 - Esquematização do nível A4 (Perfil A).

cinza com tonalidades mais esverdeadas ou amareladas, o que indica um início de vermiculização das flogopitas. Veios de material que grada do marrom avermelhado ao preto, e de granulometria variada, cortam o glimmerito alterado.

Trinta metros acima no perfil de alteração, nos níveis representados pelas amostras A3, A4 e A5, aflora o saprolito. Em A3 e A4 o material é friável, isalterítico, de coloração gradando do marrom avermelhado em A3 até o marrom amarelado a ocre em A4. Volumes com dimensões aproximadas de 5 cm e compostos essencialmente de grãos de quartzo com granulometria areia são observados em A3. O mesmo material ocorre como uma crosta endurecida em A4. As amostras A4S e A4M representam facies particulares nesse nível (FIGURA 12): trata-se de um "boxwork", onde um arcabouço de silexito (A4S) sustenta uma matriz (A4M) aloterítica e bastante oxidada. O nível A5 constitui-se num material friável, de cor ocre predominante, onde as texturas e estruturas da rocha fresca já não se apresentam tão bem conservadas quanto em A3 e A4. Observam-se neste nível acumulações de material ferruginizado (A5G) bastante endurecido e de aspecto nodular, com coloração gradando do preto ao marrom avermelhado.

Em direção ao topo do perfil, na bancada de 850 metros, as amostras A6 e A7 representam a laterita. A amostra A6 constitui-se de material aloterítico, de cor ocre a amarela, já completamente oxidado, com crostas quartzosas endurecidas. A7 é semelhante, com coloração tendendo a um marrom avermelhado.

O perfil é capeado por um material argiloso, marrom avermelhado, sem estruturas, em discordância com os materiais até então observados, indicando provável origem alóctone.

b. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS HORIZONTES ESTUDADOS

- Rocha Fresca

Os glimmeritos são rochas de granulação fina a média, compostas essencialmente por uma matriz homogênea de flogopita, Ti-magnetita, apatita e carbonato. Cristais maiores, com até 4 mm de tamanho, de olivina, flogopita e carbonato podem ocorrer dispersos na matriz. A olivina apresenta-se geralmente serpentinizada e nas flogopitas já se evidencia um início de vermiculitzação, indicado pela diminuição da birrefrigência e atenuação do pleocroísmo em suas bordas.

Com relação ao carbonatito, o bandamento observado macroscopicamente em AIC se deve a um volume maior de minerais maficos, na maioria Ti-magnetitas, nas bandas escuras em relação às bandas claras. O tamanho dos grãos também é fator de diferenciação entre as duas bandas: granulometria menor nas bandas mais claras e maior nas bandas mais escuras. Os carbonatos identificados por DRX (FIGURA 13) foram apenas calcita e dolomita, porém a observação de produtos ferruginosos entre grãos de carbonato no início da alteração sugere a existência, também, de carbonatos de ferro. As apatitas têm formato ovóide ou tabular e são mais abundantes nas bandas mais escuras. Veios milimétricos de carbonatito, essencialmente compostos por carbonatos, cortam a rocha bandada e, no contato veio/rocha, grãos de olivina e flogopita são observados. No carbonatito sem bandamento (AICR), calcita, dolomita e apatita são os minerais mais abundantes, podendo ocorrer Ti-magnetita dispersa na rocha, mas em quantidades muito pequenas.

A amostra AIB é uma brecha magmática, formada por uma matriz ultramáfica totalmente flogopitizada, que muito se assemelha ao glimmerito e que contém, ainda, cristais de perovskita e óxidos de ferro em abundância. Imersos na matriz, ocorrem grãos maiores de olivina, intensamente

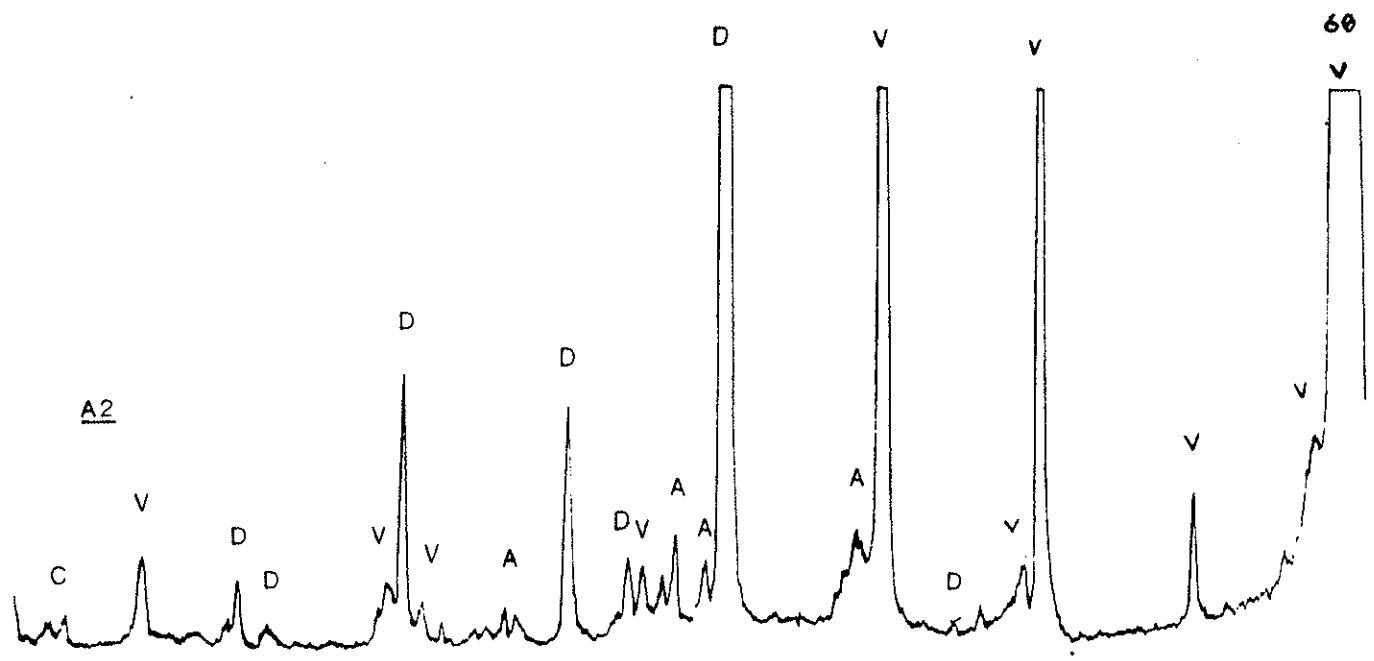


FIGURA 14 – Difratograma de raios-X da amostra A2 do horizonte rocha alterada (H3).

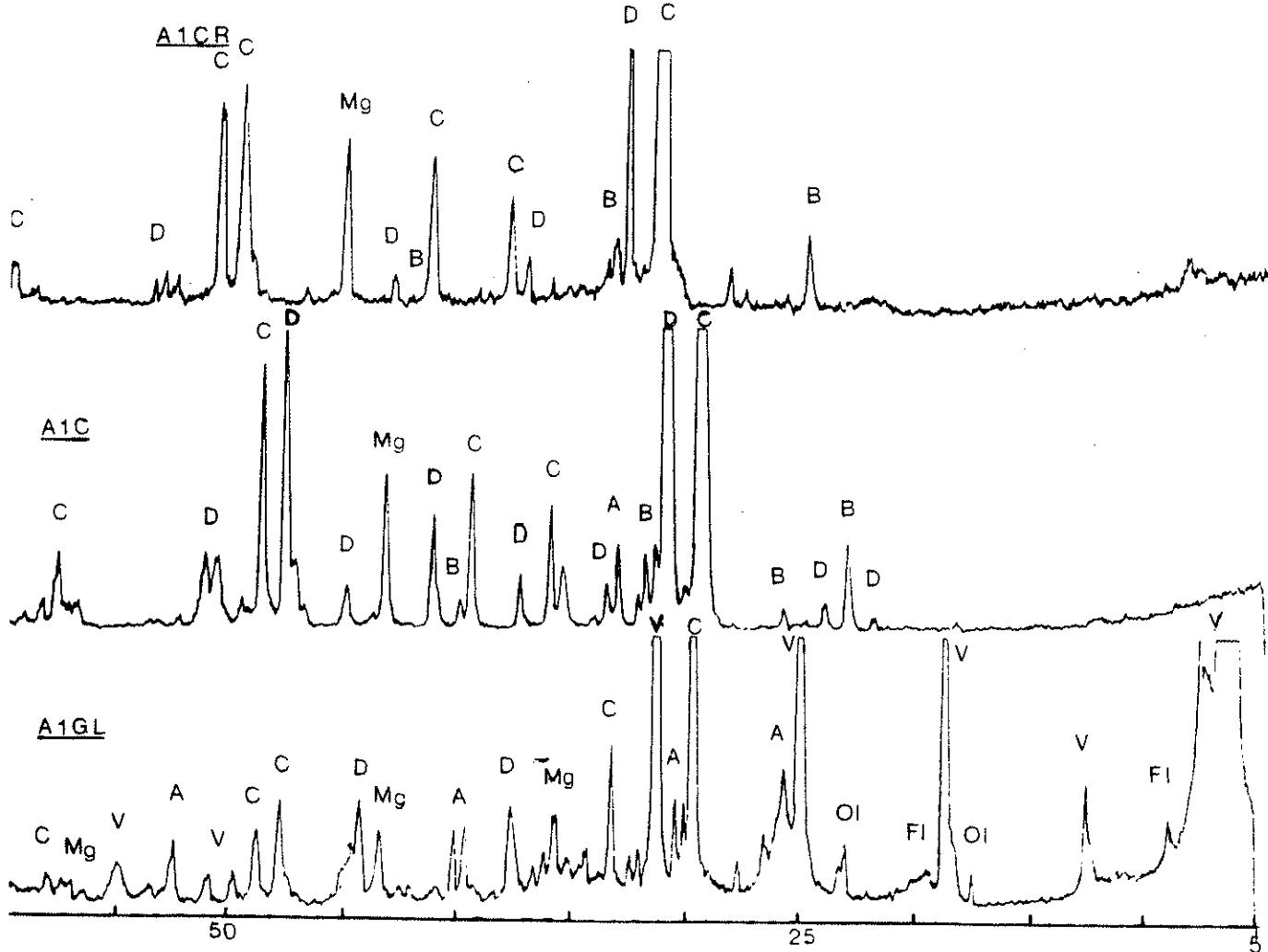


FIGURA 13 – Difratogramas de raios-X de amostras do horizonte rocha fresca (H4).

A1GL = glimmerito

A1C = carbonatito bandado

A1CR = carbonatito sem bandamento

fraturados e serpentinizados, e de carbonato. Os clastos de rocha ultramáfica não apresentam bordas de reação com a matriz.

- Horizonte Rocha Alterada

A FIGURA 14 apresenta o difratograma da amostra do nível A2. Observa-se a vermiculita proveniente da alteração das flogopitas, a diminuição da quantidade de carbonato em relação à rocha fresca, e os picos de apatita bem individualizados. Ao microscópio, observam-se grãos de carbonato bastante fraturados, com bordas de dissolução; grãos idiomórficos de apatita ocorrem dispersos. Fraturas preenchidas por produtos secundários como esmectita e caulinita são comuns e devem ter sido originadas pela dissolução de veios de carbonato. As vezes, o material de preenchimento é ferruginoso e parece provir da oxidação da magnetita que apresenta-se fraturada e com sinais de corrosão.

- Horizonte de Saprolito

A FIGURA 15 representa a evolução mineralógica de A3 a A5 através de difratogramas. Observa-se o desaparecimento das flogopitas vermiculitzadas em direção ao topo do perfil. Ao microscópio, esses minerais ocorrem esparsos em um plasma ferruginoso que se torna mais abundante de A3 a A5. Entre suas clivagens expandidas, alojam-se produtos secundários de Fe. Os grãos de apatita têm formato ovóide e ocorrem dispersos no plasma, apresentando sinais de dissolução, quando observados em direção ao topo do perfil. Cristais de Ti-magnetita com inclusões de apatita ocorrem em A3, mas já não são observados em A4 e A5. Foram ainda identificados por DRX (FIGURA 15) fosfatos aluminosos secundários do grupo da plumbogumita e da florencita nesse horizonte.

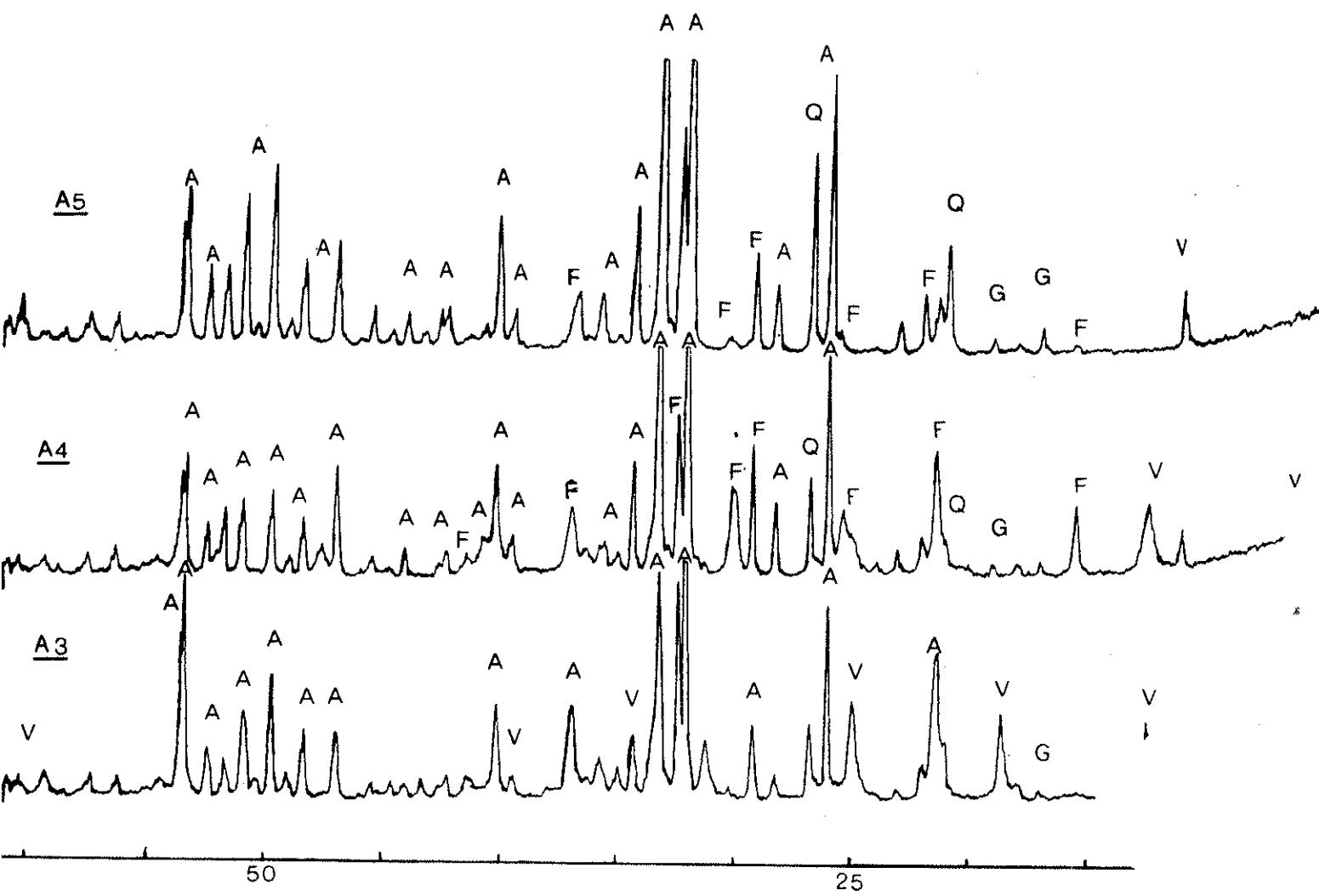


FIGURA 15 - Difratogramas de raios-X das amostras A3, A4 e A5 do horizonte saprolítico (H2).

Os minerais desse grupo pertencem à família da alunita-jarosita e têm como fórmula geral $AB_6(XO_4)_2(OH)_6$, onde A é o cátion maior de coordenação 12, B é ocupado por cátions de coordenação octaédrica e o ânion é mais frequentemente $(PO_4)^{3-}$ e $(SO_4)^{2-}$ (SCOTT, 1987). As principais espécies de fosfatos desse grupo que ocorrem em Catalão I são a goyazita (Sr), gorceixita (Ba), crandalita (Ca) e florencita (ETR). A discussão a respeito da composição química específica dos fosfatos aluminosos secundários de Catalão I será feita no Capítulo VI, dedicado ao estudo do comportamento dos ETR nos materiais amostrados.

- Horizonte Laterítico

Ao microscópio óptico observa-se um plasma ferruginoso com grãos dispersos de quartzo e Ti-magnetita. Os difratogramas (FIGURA 16) indicam a presença de goethita e fosfatos aluminosos secundários do grupo da plumbogumita e florencita. Anatásio, barita e óxidos de manganês são constituintes menores.

HIRANO *et al.* (1987) mencionou a presença de alunita nos níveis superiores do perfil de alteração. Esse mineral não foi identificado no presente estudo e, em vista dos baixos teores de potássio apresentados por esses autores para amostras supostamente portadoras de alunita, chegou-se à conclusão que houve um equívoco em sua identificação. Confundiu-se alunita com os fosfatos secundários do grupo da plumbogumita e florencita devido à semelhança em suas estruturas cristalinas.

- Cobertura Superficial

A cobertura superficial do perfil, representada pela amostra AB, é essencialmente composta por goethita, caulinita, quartzo, anatásio e fosfatos aluminosos secundários do grupo da plumbogumita e florencita.

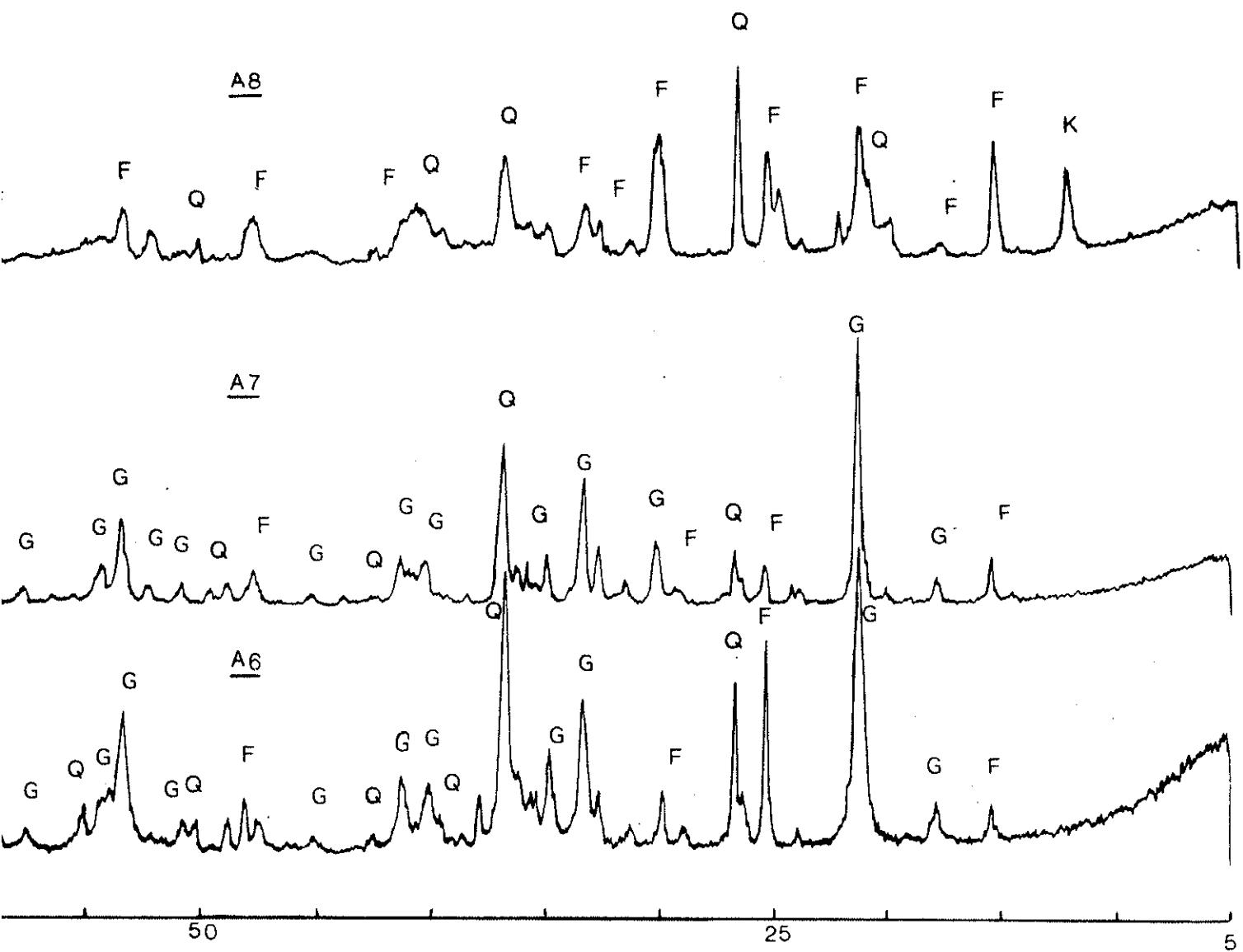


FIGURA 16 - Difratogramas de raios-X das amostras A6 e A7 do horizonte laterítico (H₁) e A8 da cobertura superficial.

c. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS HORIZONTES ESTUDADOS

As TABELAS 16 e 17 apresentam a composição química em elementos maiores e traços para as amostras dos quatro horizontes descritos.

Rocha Fresca

As amostras A1B e A1GL apresentam uma grande similaridade geoquímica. São rochas ultrabásicas com teores baixos de Al_2O_3 e teores altos de Fe_2O_3 , CaO e MgO. São quase que totalmente desprovidas de Na₂O e apresentam quantidades variáveis de K₂O, dependendo do grau de vermiculitzação das flogopitas (em A1GL, ligeiramente alterada, os valores de K₂O são mais baixos). TiO₂, P₂O₅ e F são anormalmente elevados. Possuem uma assinatura geoquímica muito especial: quanto ao Ni e Cr os altos teores são típicos de rochas ultramáficas, porém são também enriquecidas em elementos menos comuns nessas rochas como Ba, Sr, Zr e Nb.

Na amostra de carbonatito A1C, os teores de CaO superiores aos teores de MgO indicam a natureza sovítica da rocha. Há um forte empobrecimento em Na₂O, K₂O, TiO₂, Ni e Cr e elementos como P, Ba, Sr, Zr e Nb estão enriquecidos em relação a média crustal.

As razões CaO/Fe₂O₃, muito mais elevadas que na apatita, indicam que a maior parte do CaO está contido nos carbonatos.

Horizonte de Rocha Alterada

Há uma grande semelhança geoquímica entre A2 de um lado, e A1B e A1GL de outro, com exceção dos teores de Fe₂O₃ e TiO₂, ligeiramente mais elevados em A2. Os baixos teores de CaO são provavelmente devidos às heterogeneidades da rocha fresca: A2 deriva, provavelmente, de uma rocha fresca mais pobre em veios carbonatíticos que A1B ou A1GL. A razão

X	A1GL	A1B	A1C
SiO ₂	29.4	29.6	1.3
Al ₂ O ₃	2.7	2.5	<0.1
Fe ₂ O ₃	10.9	8.9	5.0
FeO	0.58	3.0	0.44
CaO	14.9	15.5	44.8
MgO	21.2	21.1	6.0
Na ₂ O	0.06	0.07	0.07
K ₂ O	0.61	3.70	0.10
MnO	0.18	0.19	0.19
TiO ₂	1.9	2.6	<0.05
P ₂ O ₅	1.7	1.4	2.7
F	0.44	0.40	0.24
LOI	14.62	10.22	38.02
SUM	99.19	99.18	99.01
 ppm			
Cr	958	753	<20
Ni	866	630	<24
Ba	2866	1940	2508
Sr	1520	295	4280
Zr	560	340	220
Nb	380	410	1140
S	660	2000	980
Th	<10	<10	13
Rb	34	130	<5
Hf	17	<8	<8
Ta	26	<10	30
Y	23	24	46
Cs	<5	<5	5

TABELA 16 - Composição química para elementos maiores de amostras do horizonte rocha fresca (H4):

A1GL = glimmerito

A1B = matriz peridotítica de uma brecha magmática

A1C = carbonatito

X	A ₂	A ₃	A ₄	A _{4S}	A _{4H}	A ₅	A _{5G}	A ₆	A ₇	A ₈
SiO ₂	33.1	9.2	6.3	76.5	51.5	8.0	1.6	5.4	4.6	21.3
Al ₂ O ₃	2.9	2.0	5.5	0.19	2.8	0.44	0.72	3.5	1.9	17.6
Fe ₂ O ₃	14.3	25.6	16.3	8.2	18.2	13.8	77.6	52.0	60.1	28.5
FeO	0.15	2.9	1.8	0.21	1.3	0.95	0.21	5.0	2.8	1.2
CaO	5.7	26.5	29.8	5.4	7.4	39.7	0.11	0.48	0.19	0.70
MgO	24.1	3.4	0.84	(0.10)	0.34	0.50	0.22	0.22	0.21	0.77
Na ₂ O	0.05	0.12	0.12	0.04	0.05	0.15	0.02	0.01	0.04	0.03
K ₂ O	0.69	0.03	0.01	0.04	0.06	0.01	0.07	0.02	0.04	0.09
MnO	0.21	0.59	0.39	1.2	0.53	0.20	3.9	1.10	0.32	0.36
TiO ₂	2.7	4.0	4.6	0.23	3.5	0.95	0.99	12.7	13.5	6.7
P ₂ O ₅	2.7	20.0	24.9	4.0	7.5	31.2	2.0	4.8	4.2	6.9
F	1.0	1.4	1.7	0.4	0.49	1.8	0.036	0.11	0.16	0.22
PF	12.32	3.52	4.37	1.83	3.78	1.18	10.86	6.84	9.08	10.55
TOTAL	99.92	99.26	96.63	98.34	97.45	98.88	98.336	92.18	97.14	94.92

PPM

Cr	1163	20	349	(20)	404	20	157	274	123	588
Ni	866	102	189	47	134	55	71	236	55	102
Ba	985	1433	11644	4400	>5000	1523	4320	9853	>5000	21497
Sr	1040	2240	5411	1720	2000	5496	170	1940	680	6680
Zr	500	1180	5996	170	530	470	460	31093	820	4430
Nb	430	360	1290	>5000	1400	1100	1960	1570	2100	3220
S	(50	50	80	(50	60	70	70	70	90	930
Th	10	56	190	120	160	34	140	120	120	270
Rb	39	< 5	5	< 5	11	< 5	13	< 5	12	< 5
Hf	13	19	30	< 10	< 10	8	< 10	190	15	59
Ta	35	26	110	78	130	120	31	95	55	360
Y	22	100	77	65	47	71	82	330	68	120
Cs	< 5	12	< 5	9	< 5	< 5	23	86	30	22

TABELA 17 - Composição química para elementos maiores de amostras dos horizontes de alteração :

A₂ = horizonte rocha alterada (H3); A₃, A₄, A₅ = horizonte de saprolito (H2);
 A_{4H}, A_{4S} = facies silicificada; A_{5G} = facies ferruginosa; A₆, A₇ = horizonte laterítico (H1); A₈ = cobertura superficial.

$\text{CaO}/\text{FeO}_\text{e}$, pouco superior à da apatita, confirma essa pouca abundância em carbonatos.

- Horizonte de Saprolito

Todas as amostras que compõem este horizonte (A3, A4 e A5) apresentam baixos teores em SiO_2 e MgO , teores elevados em FeO_e e CaO e razões $\text{CaO}/\text{FeO}_\text{e}$ semelhantes à da apatita (TABELA 17). A análise da composição química dessas amostras indica que se trata de produto de alteração de uma mistura de glimmerito e carbonatito, com predominância do último tipo litológico.

No horizonte A4, as facies particulares, A4S e A4M, revelam-se como um arcabouço silexítico (A4S), contendo apatita ($\text{CaO}/\text{FeO}_\text{e}=1,35$) (FIGURA 17), preenchido por uma matriz (A4M) também silicosa, porém rica em ferro; além da apatita, essa matriz já apresenta fosfatos aluminosos secundários ($\text{CaO}/\text{FeO}_\text{e} <$ que na apatita) (FIGURA 17). A exemplo do que ocorre em diversos maciços ultramáficos no Brasil e no mundo (OLIVEIRA et al., 1992), estas facies particulares poderiam ter se formado pela alteração intempérica das rochas ultramáficas do complexo; a assinatura geoquímica para elementos traços da amostra A4M (matriz) parece indicar essa proveniência.

A facies ferruginizada que ocorre em A5 (A5G) é composta quase que na sua totalidade de FeO_e na forma de goethita (FIGURA 17), com impurezas de MnO . Credita-se aos fosfatos aluminosos secundários o fósforo presente, pelo que indica a baixa razão $\text{CaO}/\text{FeO}_\text{e}$. Uma tal concentração de FeO_e , formando uma espécie de "chapéu de ferro" bem localizado, sugere uma origem por alteração de sulfetos que podem ocorrer concentrados em certos níveis das rochas frescas. Evidências petrográficas de goethita formada a partir da alteração de pirita são observadas no horizonte de saprolito mineralizado do perfil B (FOTO 5).

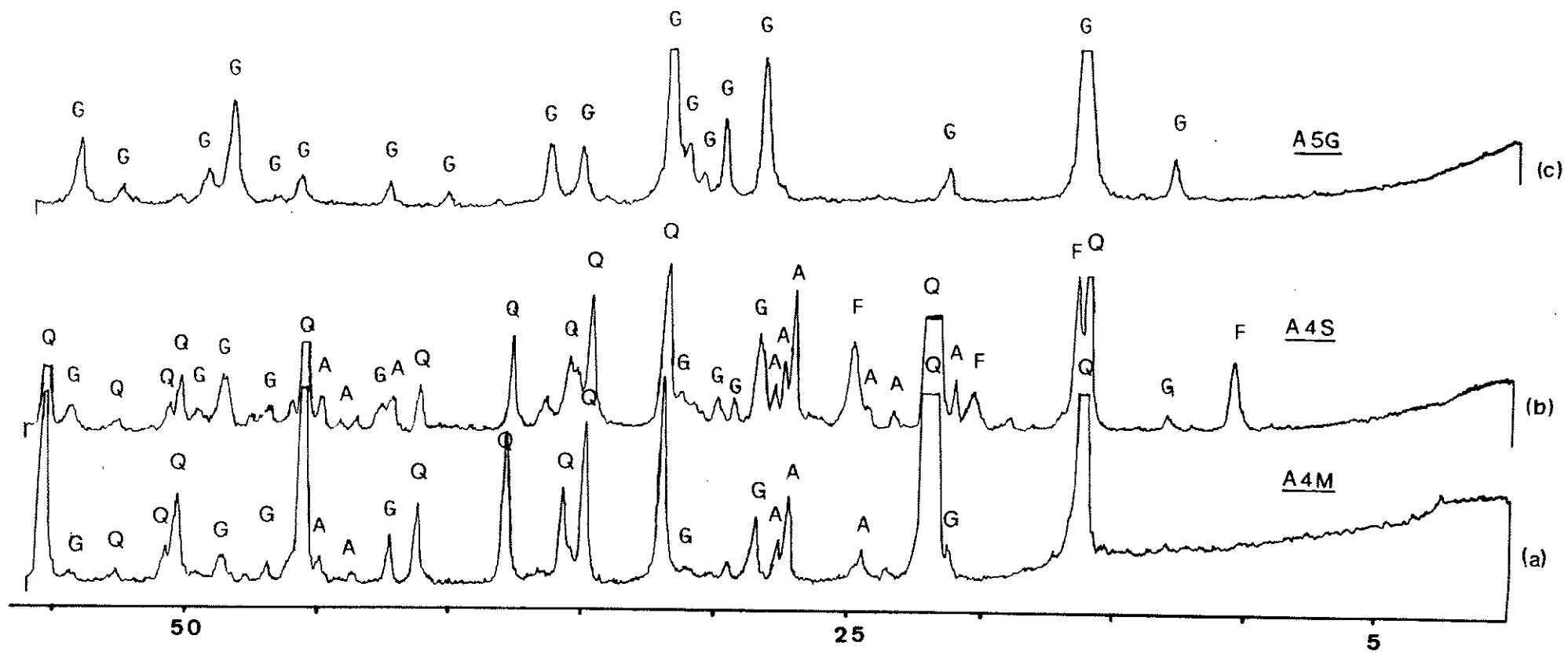


FIGURA 17 – Difratogramas de raios-X de facies particulares do perfil A : (a) A4M = matriz de preenchimento do arcabouço silexítico; (b) A4S = arcabouço silexítico; (c) A5G = facies ferruginosa.

Horizonte Laterítico

Teores elevados em Fe_{2O_3} e TiO_2 caracterizam este horizonte; FeO_2 e CaO apresentam um empobrecimento acentuado em relação aos horizontes anteriores, relacionado ao desaparecimento da apatita. Na ausência desse mineral, todo o FeO_2 presente pode ser atribuído aos fosfatos aluminosos secundários (razões CaO/FeO_2 muito baixas). Em A6 os elevados teores de Zr, Hf e Y podem estar relacionados à anômala abundância de zircão observada nesse horizonte.

Cobertura Superficial

SiO_2 , Al_{2O_3} e Fe_{2O_3} apresentam teores elevados nesse horizonte. Em relação aos horizontes anteriores, o teor de Ba se eleva bastante. Também sofrem uma concentração acentuada o Sr, Nb, S, Th, Hf, Ta e Y. Nesse nível, também, todo o fósforo presente deve ser atribuído aos fosfatos aluminosos secundários ($\text{CaO}/\text{P}_{\text{2O}_5}=0,10$).

Para uma melhor comparação entre os diferentes horizontes de alteração em função de seus teores em elementos traços, foram usados "aranhogramas" normalizados em relação ao condrito (TAYLOR & McLENNAN, 1985). Os elementos Cs, Rb, Ba, Sr, La, Y, Lu, Th, Zr, Hf, Ta e Nb foram ordenados de acordo com o aumento de sua solubilidade em água, através de seus potenciais iônicos ($z=c/r$). Elementos que apresentam potencial iônico muito baixo ($z < 3$) ou muito alto (> 12) são solúveis, ao passo que aqueles com potencial iônico intermediário são imóveis. Para os elementos analisados, os que se encontram antes do Y ($z = 3,3$) são solúveis em água, e os demais são insolúveis ($z < 7,5$).

As FIGURAS 18, 19 e 20 mostram os "aranhogramas" para a rocha fresca e para os produtos alterados. Observa-se

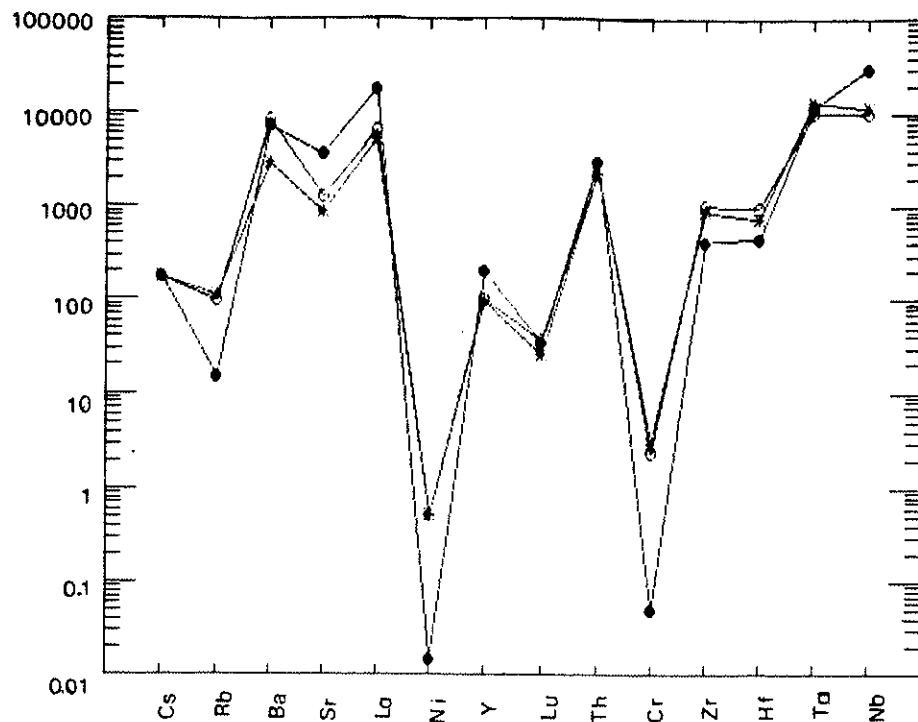


FIGURA 18 - "Aranhograma" para as amostras do horizonte rocha fresca (A1G1 e A1C) e de rocha alterada (A2). A

- A1G1 = glimmerito
- A1C = carbonatito bandado
- * A2 = rocha alterada

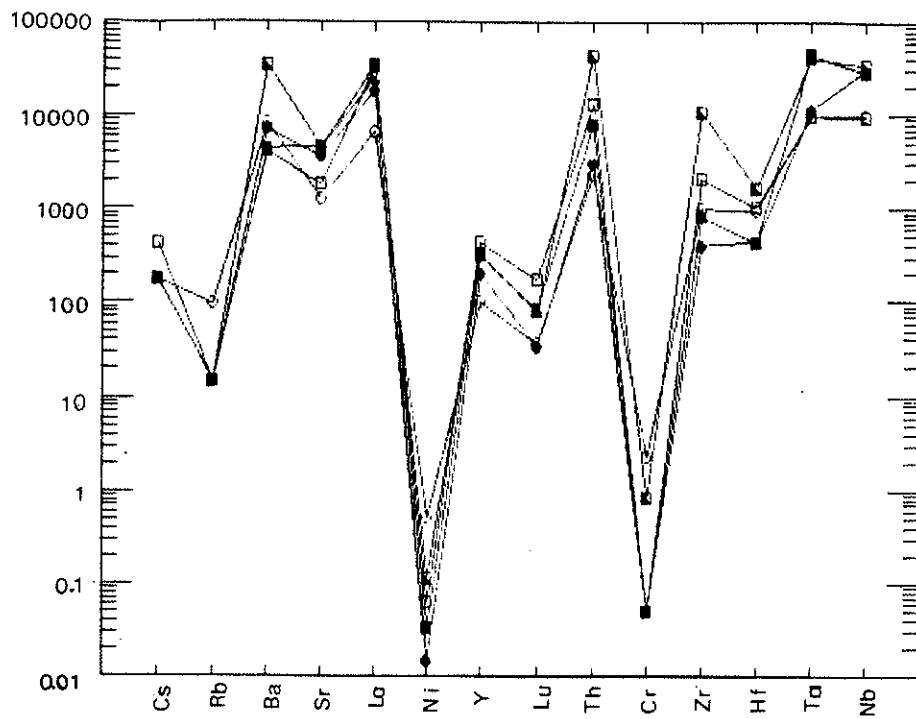


FIGURA 19 - "Aranhograma" para as amostras do horizonte rocha fresca (A1G1 e A1C) e do horizonte saprolítico (A3, A4)

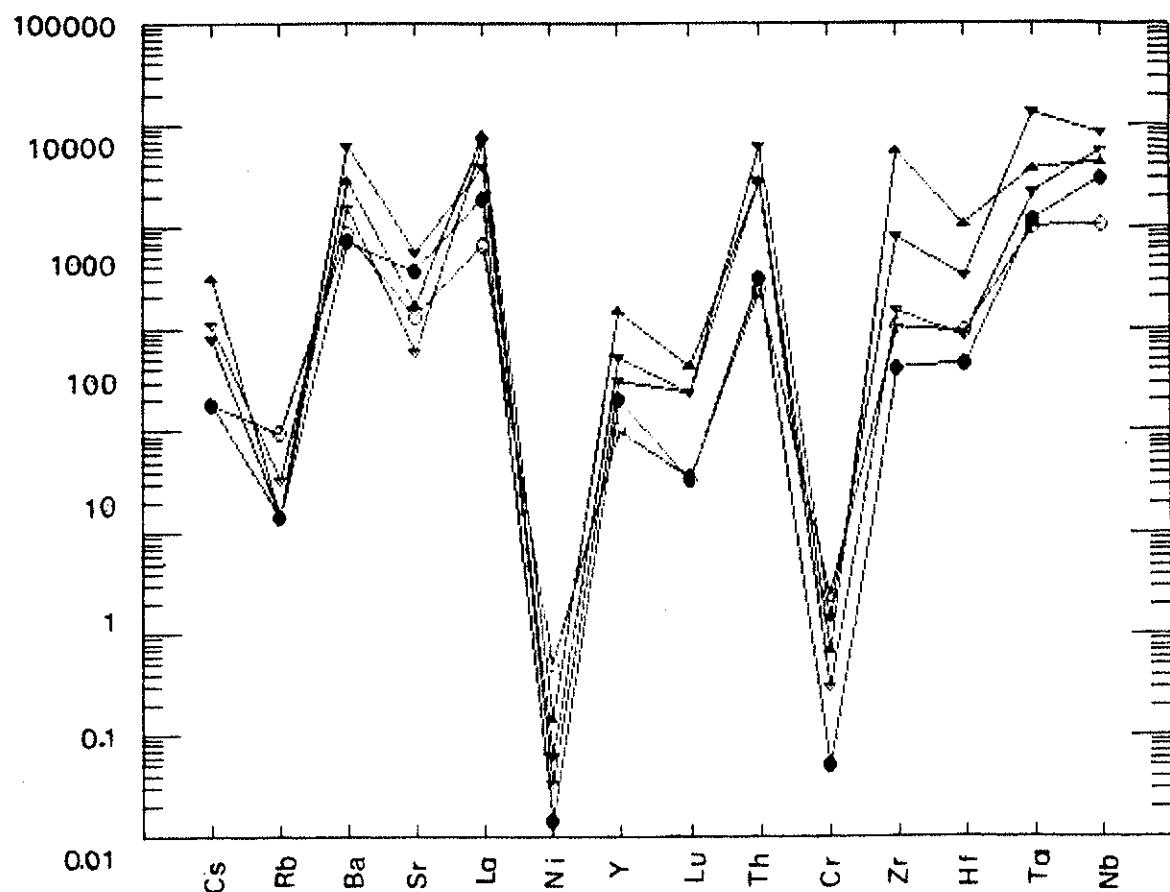


FIGURA 20 - "Aranhograma" para as amostras do horizonte rocha fresca (A1GL e A1C) e do horizonte laterítico (A6 e A7) e da cobertura superficial (A8).

A1GL = glimmerito

A1C = carbonatito bandado

A6 e A7 = horizonte laterítico

A8 = cobertura superficial

que, com exceção do Ni e Cr, tanto o glimmerito, quanto o carbonatito, são mais enriquecidos em elementos traços do que o condrito.

O padrão dos elementos traços para a rocha alterada (FIGURA 18) é muito similar ao do glimmerito, como já havia sido observado anteriormente para elementos maiores. Somente Ba e Sr são levemente empobrecidos.

As amostras de saprolito (FIGURA 19) mostram um enriquecimento geral em relação ao carbonatito e ao glimmerito, a partir dos quais devem ter se originado. Para o horizonte laterítico e cobertura superficial (FIGURA 20), o comportamento é similar, com enriquecimento em Ba e em elementos mais insolúveis, como por exemplo, Zr e Nb.

2. O PERFIL "B"

No perfil B (FIGURA 8b) a rocha fresca não aflora na sua base. Foi selecionada, da base para o topo, uma sequência de amostras em ordem de alteração crescente:

- _ B5 que representa o horizonte de saprolito silicificado, enriquecido em ETR;
- _ B4 que corresponde ao horizonte de saprolito mineralizado;
- _ B3, B2 e B1 que correspondem ao solo laterítico.

Foram também selecionadas as amostras B6 e B7, ao nível de B5, especialmente enriquecidas em ETR, que serão abordadas no Capítulo VI.

a. CARACTERIZAÇÃO MACROSCÓPICA DO PERFIL DE ALTERAÇÃO

A amostra coletada no nível inferior (B5) é material extremamente alterado, bastante silicificado, de coloração variando do amarelo ao preto. Este material apresenta cavidades milimétricas a centimétricas preenchidas por

produto verde claro de textura arenosa. Será aqui denominado de horizonte de saprolito silicificado (S5), e por representar material extremamente rico em ETR seu tratamento mais detalhado será dado juntamente com as amostras B6 e B7, no Capítulo VI.

Mais acima, no nível representado pela amostra B4, aflora o minério de nióbio. Constitui-se num material pulverulento, de textura arenosa e de coloração que grada de amarelo a marrom acinzentado, muito rico em magnetita e ilmenita, e cortado por leitos brancos. Denominaremos este horizonte de saprolito mineralizado.

Nos níveis superiores do perfil, representados pelas amostras B3, B2 e B1, o material é um solo predominantemente amarelado, de natureza laterítica, apresentando em alguns níveis concrecionamento. Da base para o topo, o material passa de uma coloração mais amarela para mais avermelhada. Este horizonte será denominado de solo laterítico.

b. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS HORIZONTES

Horizonte de Saprolito Silicificado (S5)

A análise dos difratogramas (FIGURA 21), dos diagramas de ATD (FIGURA 22) e a observação ao microscópio das amostras do saprolito silicificado mostram um "boxwork" de quartzo e goethita (FOTO 3) com cristais de pirocloro, apatita e barita disseminados. O material verde que preenche as cavidades deste "boxwork" contém monazita, identificada por DRX (FIGURA 21) que, geralmente, ocorre associada aos opacos.

Horizonte de Saprolito Mineralizado (B4)

Neste nível, os leitos brancos, observados ao microscópio e analisados por DRX (FIGURA 21), são constituídos por cristais de apatita. Diagramas de ATD

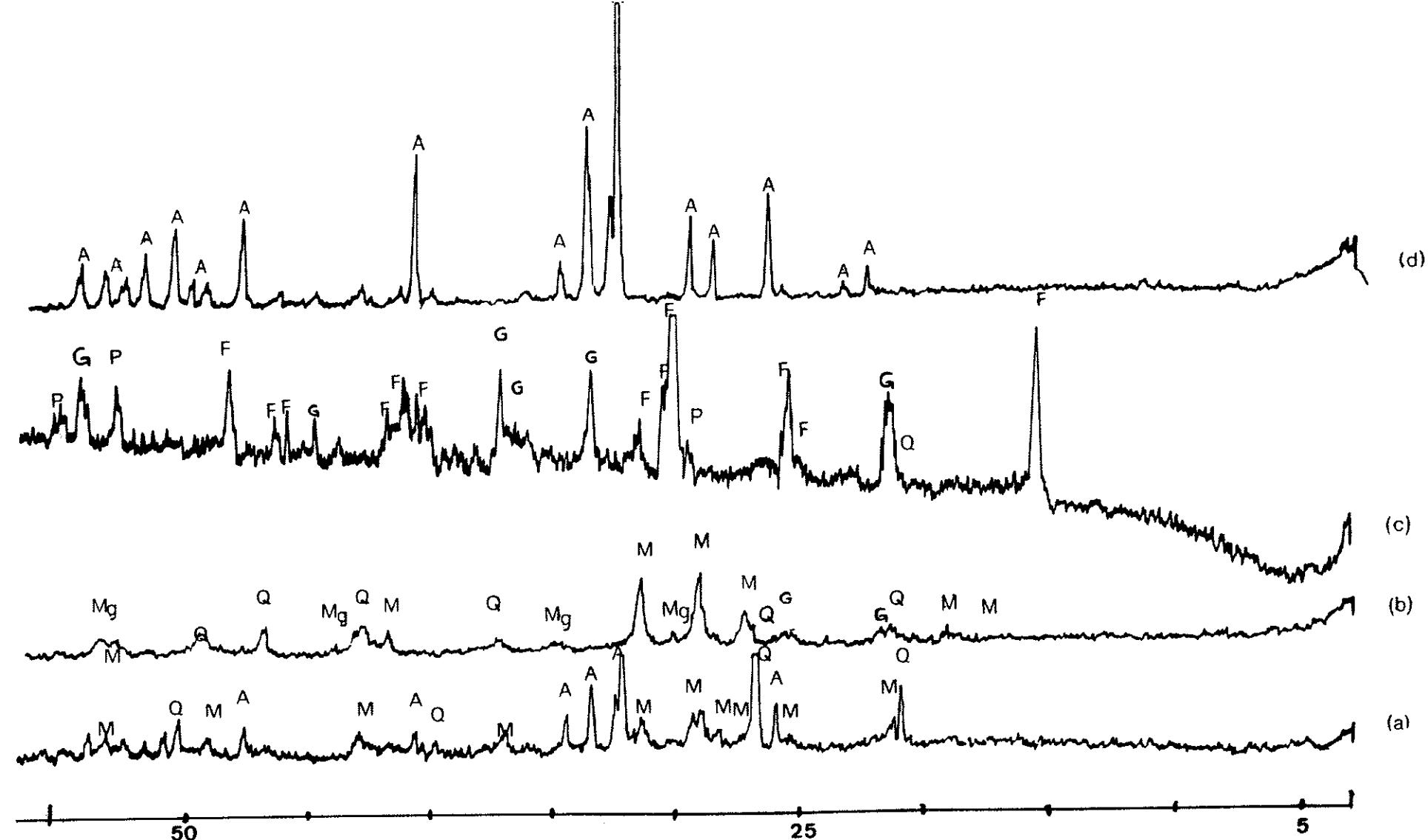


FIGURA 21 - Difratogramas de raios-X das amostras dos horizontes inferiores do perfil B:

(a) B5 = horizonte de saprolito silicificado

(b) B5 = material esverdeado do horizonte de saprolito silicificado

(c) B4 = horizonte de saprolito mineralizado

(d) B4 = leitos brancos do horizonte de saprolito mineralizado*

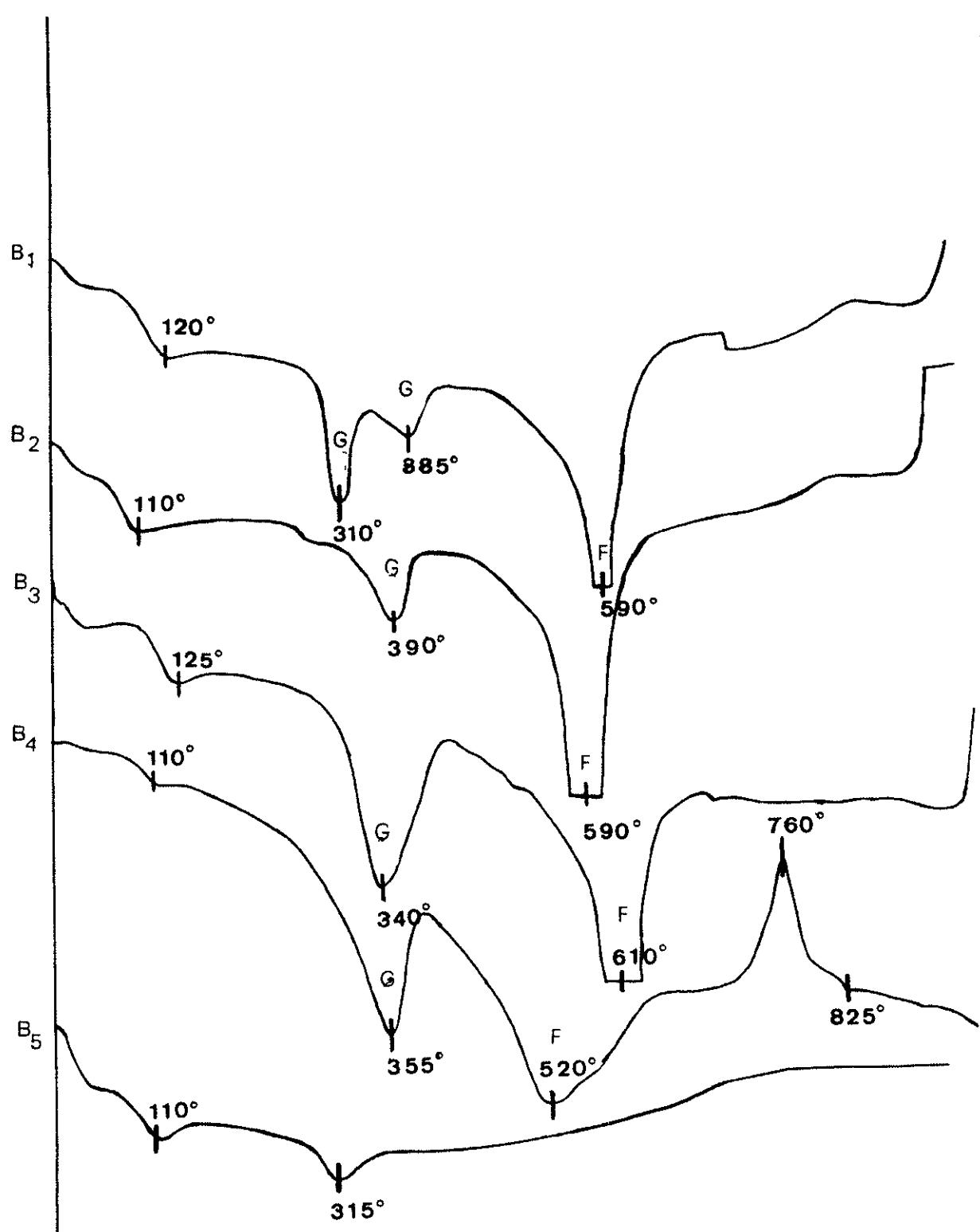


FIGURA 22 - Diagramas de ATD das amostras do Perfil "B".

B₅ = horizonte de saprolito silicificado

B₄ = horizonte de saprolito mineralizado

B₃, B₂ e B₁ = solo laterítico

0,1mm.

M.O.

Luz Pol.

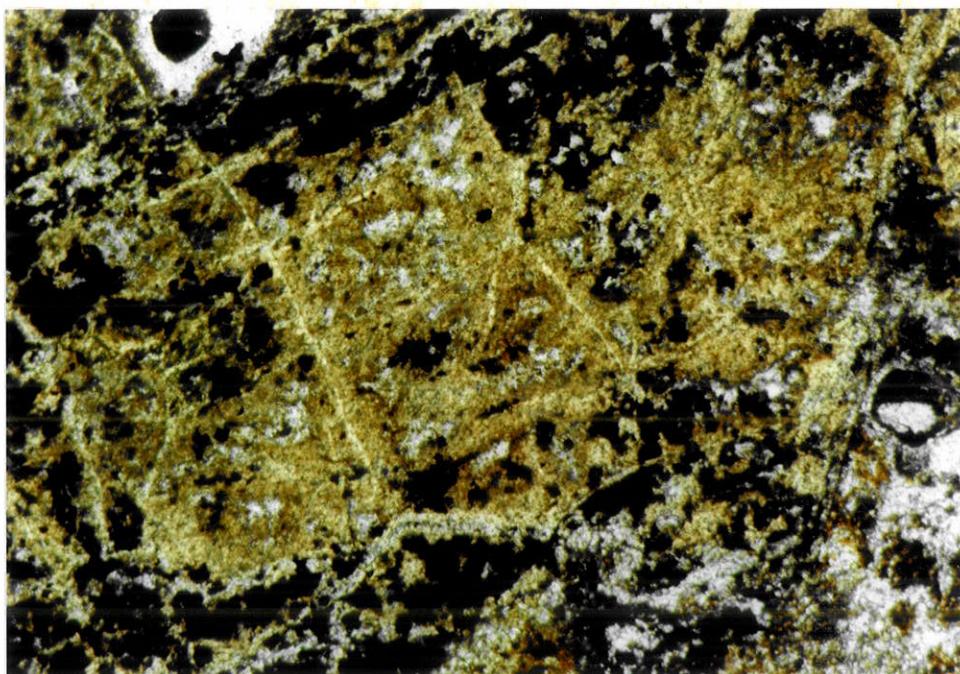


FOTO 3 - "Boxwork" de quartzo e goethita (Perfil "B")

0,1mm.

M.O.

Luz Pol.

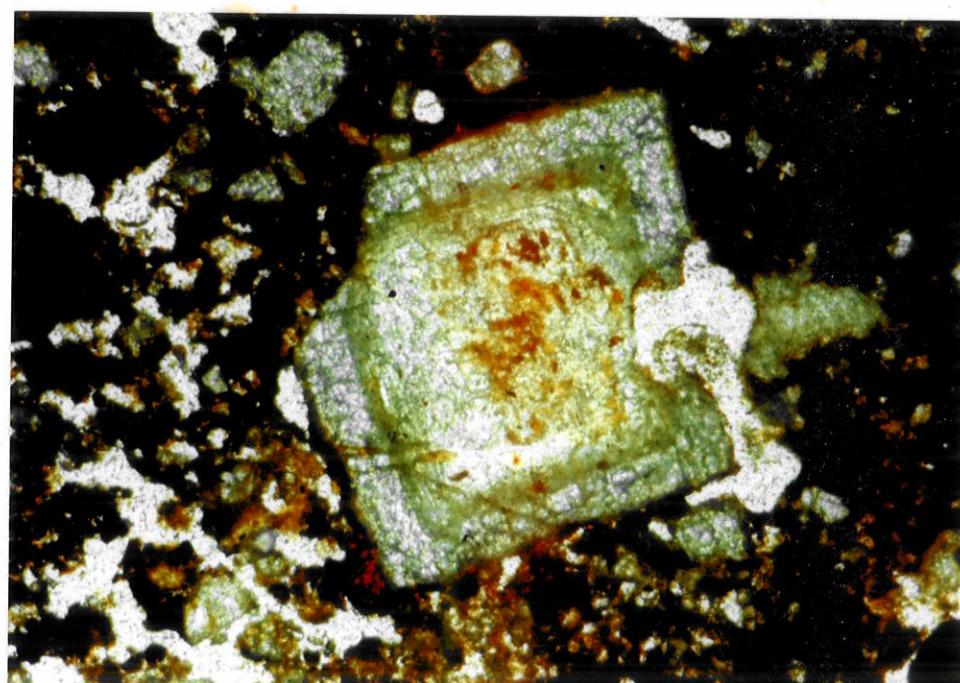


FOTO 4 - Pirocloro com zoneamento.

(FIGURA 22) indicam a presença de fosfatos aluminosos secundários e goethita. Um pico endotérmico a 760°C pode indicar a presença de pirocloro, quando comparados esses diagramas aos apresentados por VALARELLI (1971); no entanto segundo BLANCHARD (1971) e SCHWAB *et al.* (1986), fosfatos aluminosos secundários podem também apresentar picos endotérmicos próximos a essa temperatura. Pirocloro e magnetita são observados somente ao microscópio óptico, envoltos por um plasma de coloração marrom. Espectros EDS (FIGURA 23 e 24) mostram tratar-se de Ba-pirocloro. O centro do mineral contém Ta, Fe, Ca e Al e as bordas, muito puras, são compostas apenas de Nb e Ba, caracterizando um zoneamento, também observado ao microscópio (FOTO 4). Pirocloros zonados são citados por LAVAL *et al.* (1988) no carbonatito de Mabounié, África. O pirocloro pode ocorrer, também, como inclusões em opacos. A presença de pirita é sugerida por pseudomorfos cúbicos de goethita (FOTO 5).

_ Solo Laterítico

Goethita e caulinita constituem um plasma poroso, onde fosfatos aluminosos secundários identificados por DRX (FIGURA 25) e diagramas de ATD (FIGURA 22) ocorrem disseminados amplamente. Dispersos neste plasma, observam-se cristais de quartzo arredondados e bastante fraturados (FOTO 6), e opacos com sinais de corrosão. A apalita inexiste nesses horizontes e o pirocloro, observado somente ao microscópio, encontra-se finamente dividido. Na amostra B2 observa-se um início de nodulação concêntrica e em B3 são visíveis cutãs, já indicando forte influência dos processos pedogenéticos.

CONCLUSÕES

Os perfis de alteração A e B, embora localizados em

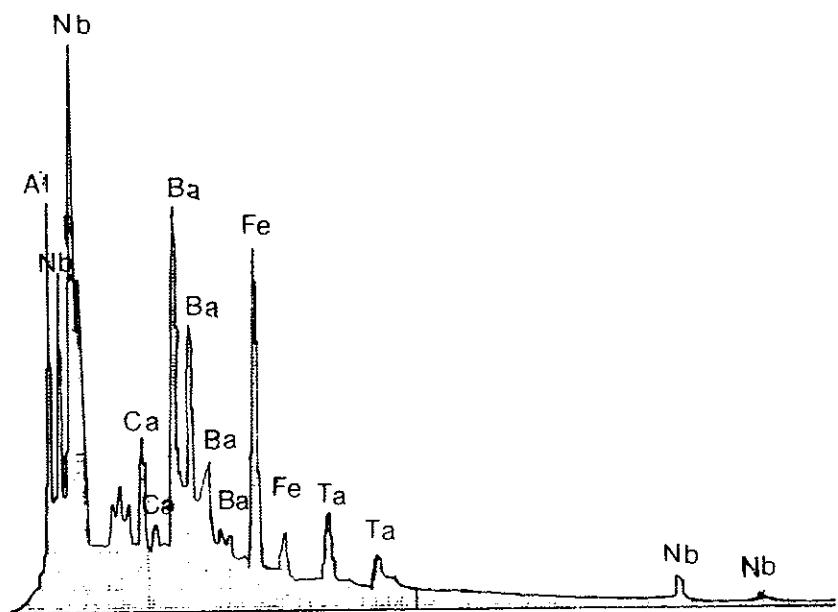


FIG. 23

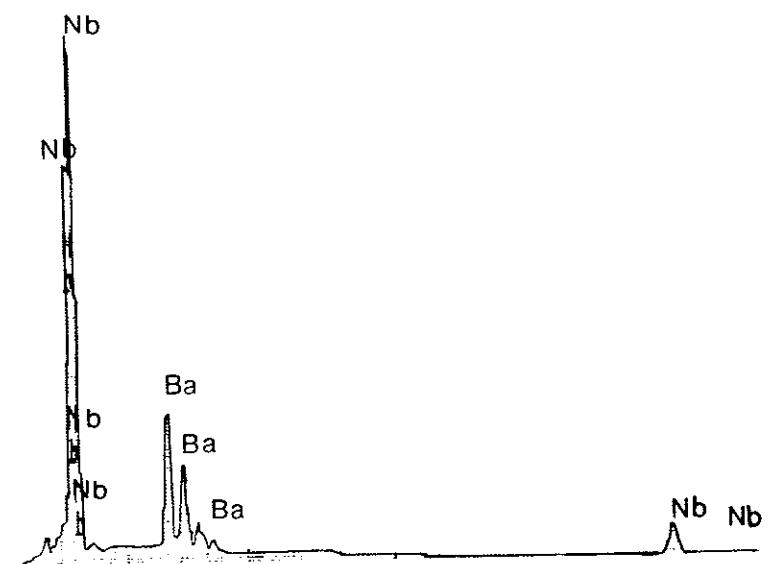


FIG. 24

FIGURA 23 e 24 – Espectros EDS para o centro e borda, respectivamente, do pirocloro da amostra B5.

0,1mm.

M.O.
Luz Pol.

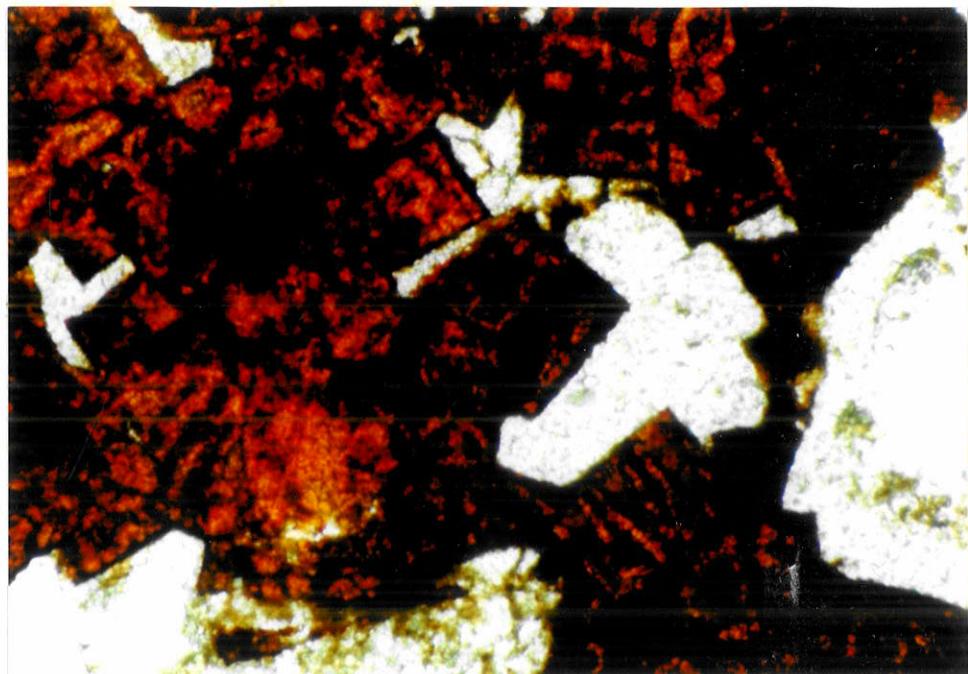


FOTO 5 - Pseudomorfos cúbicos de goethita.

0,4mm.

M.O.
Luz Pol.

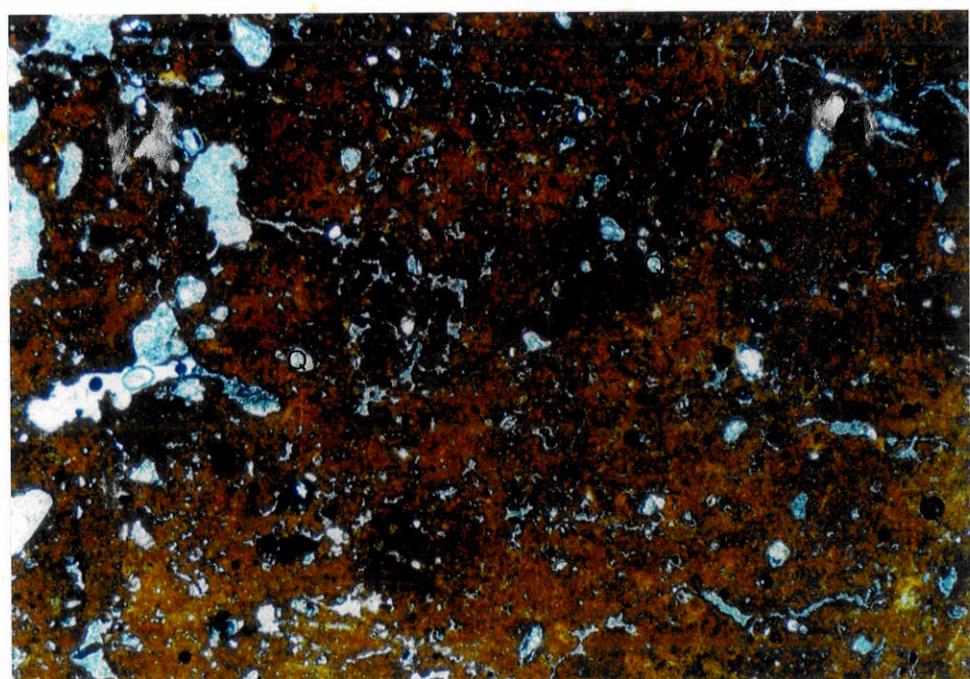


FOTO 6 - Apatita de Catalão I.

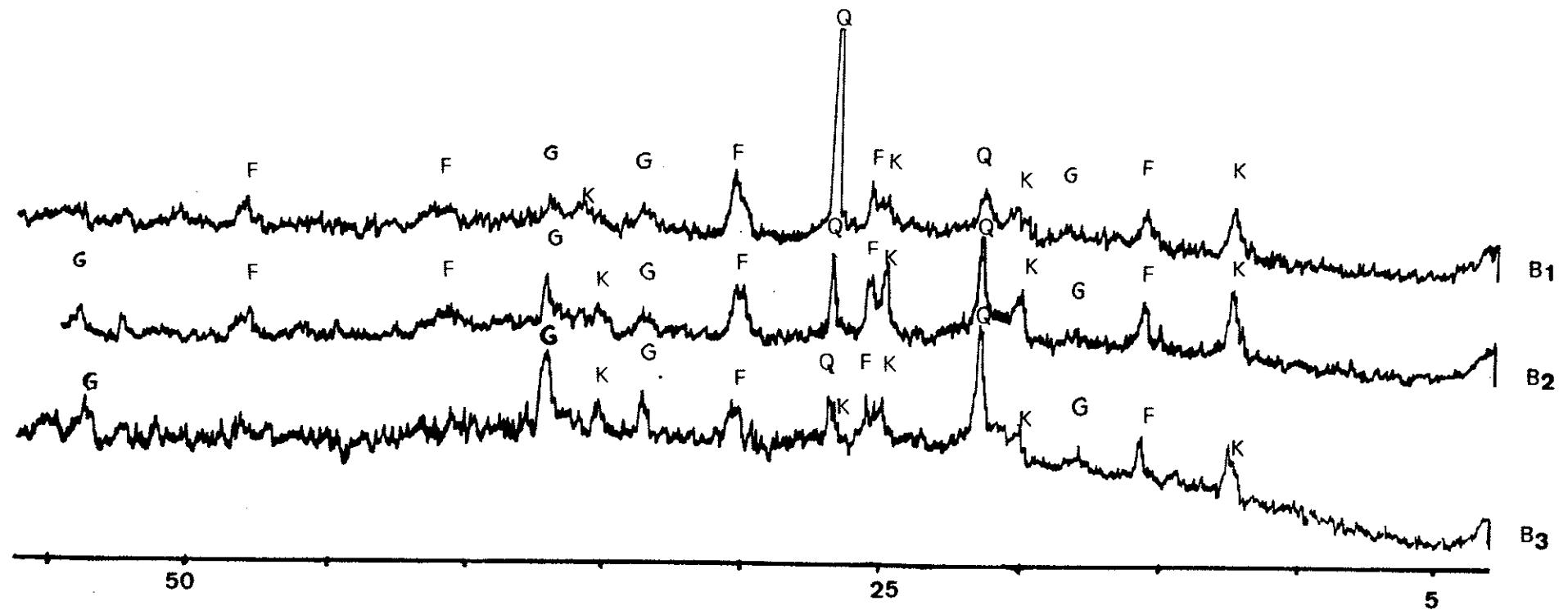


FIGURA 25 - Difratogramas de raios-X das amostras dos
Horizontes superiores do perfil B.
B3, B2 e B1 = solo laterítico

áreas diferentes, com mineralizações distintas, apresentam traços em comum:

- _ o horizonte saprolítico é o horizonte mineralizado;
- _ no horizonte saprolítico começam a aparecer os fosfatos aluminosos secundários, que serão os principais portadores de fósforo no horizonte laterítico;
- _ nos horizontes lateríticos ocorre a caulinita;
- _ a silicificação ocorre com maior intensidade em certos níveis de ambos os perfis, porém no perfil B está nitidamente associada à presença de monazita, o que não ocorre no perfil A;

Esses traços gerais são os mesmos também observados nos furos de sondagem. O aporte principal do estudo dos perfis A e B foi o de permitir a identificação de variedades faciológicas dentro de um mesmo horizonte e melhor caracterizar as fases presentes.

Com relação à geoquímica dos elementos maiores, os dados para o perfil A possibilitaram uma melhor caracterização dos litotipos presentes no horizonte de rocha fresca, e confirmaram as tendências gerais durante a alteração intempérica, apontadas pelo estudo dos furos de sondagem:

- _ perda de Ca, Mg e K e ganho relativo de Fe, Al, Ti e Ba, atestando a natureza laterítica do processo;
- _ concentração máxima de FeO nos níveis intermediários do perfil, resultado da concentração relativa de apatita;
- _ razão $\text{CaO}/\text{FeO} > 1,3$ na rocha fresca, aproximadamente 1,3 no saprolito e $< 1,3$ na laterita, indicando as fases portadoras do fósforo;
- _ queda da perda ao fogo na passagem rocha fresca/saprolito (dissolução dos carbonatos) e aumento na passagem saprolito/laterita (formação de minerais secundários hidratados).

Para os elementos traços, o estudo do perfil A mostrou que a maioria deles (Sr, Ba, Zr, Nb, Th, Hf, Ta, Y e Cs) se concentra nos níveis superiores do perfil de

alteração.

A silicificação está presente em todos os perfis estudados e nos furos de sondagem. Os teores de SiO₂ atribuíveis ao quartzo são, no entanto, sensivelmente maiores nos níveis alterados dos furos de sondagem do que nas amostras correspondentes do perfil A. Nestas, a silicificação parece ser principalmente localizada e de origem intempérica, enquanto que nos furos de sondagem a extensão do fenômeno e a associação com monazita, conforme observado anteriormente, sugerem uma origem hidrotermal. No perfil B a associação quartzo, barita e monazita no horizonte silicificado, semelhante à que ocorre nas amostras isoladas especialmente ricas em ETR (Capítulo VI), parece também indicar uma origem hidrotermal. Em ambos os casos, no entanto, houve certamente também dissolução e reprecipitação do quartzo durante o intemperismo. Silicificação localizada de origem supostamente intempérica é citada no carbonatito de Mt. Weld, Austrália (LOTTERMOSER, 1990) e em Mabounié, na África (LAVAL *et al.*, 1988).

CAPÍTULO V

ESTUDO DAS APATITAS

1. INTRODUÇÃO

Os minerais que compõem a série das apatitas são os mais importantes portadores de fósforo na natureza. Apresentam fórmula geral $M_{1-x}(XO_4)_xZ_x$, onde: $M = Ca, Sr, Ba, Cd, Pb$. Esses elementos ocorrem tipicamente podendo, ainda, ser possíveis substituições por outros cátions monovalentes (Na, K, Ag, Li), bivalentes ($Mn, Mg, Zn, Br, Fe, Ni, Cu, Cr, Co, Rh$), trivalentes (Sc, Y, Bi, Al, ETR) e tetravalentes (U); $X = P, C, As, V, Mn, Cr, S, Si$, como anions bivalentes ($CO_3^{2-}, SO_4^{2-}, CrO_4^{2-}$), trivalentes ($[PO_4]^{3-}, [CO_3F]^{2-}, [CO_3OH]^{2-}$) e tetravalentes ($AsO_4^{4-}, VO_4^{4-}, SiO_4^{4-}$); $Z = OH^-, F^-, Cl^-, Br^-, O^{2-}$.

As variedades mais frequentes estão representadas pela série isomorfa com componentes extremos de fluorapatita ($Ca_5[PO_4]_3F$), cloroapatita ($Ca_5[PO_4]_3Cl$), hidroxi-apatita ($Ca_5[PO_4]_3OH$) e carbonato-apatita ($Ca_5[PO_4, CO_3, OH]_3EF, OH$).

Em complexos alcalino-carbonatíticos, os minerais de apatita são bastante abundantes, sendo a fluor-apatita o mais frequentemente encontrado (SLUKIN et al., 1985); em alguns complexos são citadas as variedades carbonato-apatita e hidroxi-apatita (SLUKIN et al., 1985; BRAGA & BORN, 1988; FLICOTEAUX & WALTER, 1988). O termo "apatita" é usado genericamente, como sinônimo destas variedades minerais.

A estrutura básica do mineral fluor-apatita consiste de seis tetraedros de fosfato na cela unitária, quatro átomos de cálcio nos eixos trigonais envoltos prismaticamente por seis átomos de oxigênio, e seis átomos de cálcio envoltos por um poliedro irregular de um átomo de

fluor e seis átomos de oxigênio.

Algumas substituições possíveis para a estrutura da fluorapatita seriam:

- _ na posição do Ca^{++} : Na^{++} , Sr^{++} , Mn^{++} , K^{+} , U^{++} , Ba^{++} , Mg^{++} , $\text{ETR}^{++}, \text{P}^{+}$;
- _ na posição do P^{5+} : C^{++} , S^{++} , Si^{++} , As^{5+} , V^{5+} , Cr^{4+} , Al^{3+} ;
- _ na posição do F^{4-} : OH^{4-} , Cl^{4-} , CO_3^{2-} ; e
- _ na posição do O^{2-} : F^{4-} , OH^{4-} .

Em minerais de apatita, em geral, estas substituições ocorrem em canais orientados ao longo do eixo cristalográfico \perp , que possuem água adsorvida (zeolítica) em temperaturas inferiores a 750°C. A troca, total ou parcial, de íons como Ca^{++} , F^{4-} , OH^{4-} , Cl^{4-} , CO_3^{2-} e outros substituindo esta água pode ocorrer, sendo a velocidade de difusão ao longo destes canais elevada, o que possibilita estas substituições. Os parâmetros de cela \perp tem relação direta com a espessura destes canais e inversa com as quantidades de íons Cl^{4-} , OH^{4-} e F^{4-} substituídos; o parâmetros de cela \perp está diretamente relacionado à quantidade de Cl^{4-} no mineral, independente dos demais ânions.

Assim, dois fatores, espessura dos canais e natureza dos cátions presentes, relacionados à temperatura a qual o mineral está submetido, condicionam a fixação de Cl^{4-} , F^{4-} ou OH^{4-} . Estas substituições irão promover modificações que se refletirão em propriedades do mineral, tais como densidade, índice de refração, solubilidade e outras (McCLELLAN, 1980).

2. AS APATITAS DE CATALÃO I

Para os estudos realizados nas apatitas de Catalão I, foram efetuadas separações mineralógicas em um concentrado de rocha fosfática cedido pela Goiasfértil e em amostras do agregado natural dos níveis A3, A4 e A5 do perfil A, conforme metodologia descrita no Capítulo III. As apatitas separadas do concentrado de rocha fosfática serão denominadas de amostra C1 e as do perfil A de C3, C4 e C5.

A amostra C1 foi submetida à análise por difração de raios-X e identificada como fluorapatita (FIGURA 26). As análises difratométricas no carbonatito fresco e no horizonte mineralizado do perfil A (H3), de onde foram obtidos os concentrados C3, C4 e C5, também evidenciaram a variedade fluorapatita. VALARELLI (1971) identificou em Catalão I carbonato-apatita (dahlita) no agregado natural.

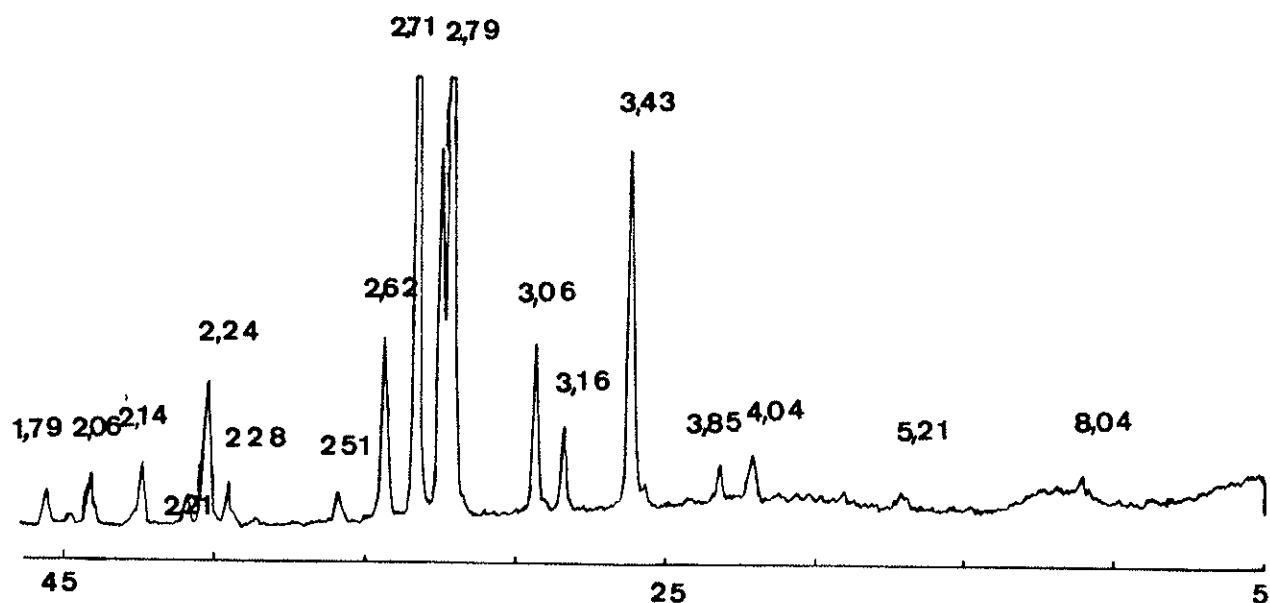


FIGURA 26 - Difratograma de raios-X da fluorapatita do concentrado de rocha fosfática (C1) de Catalão I.

A partir do estudo difratométrico, foi possível calcular os parâmetros de cela a e c para a apatita separada

do concentrado de rocha fosfática.

O valor do parâmetro a foi calculado pela expressão genérica para cristais hexagonais:

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{4(h^2 + hk + k^2)/3a^2 + l^2/c^2}}$$

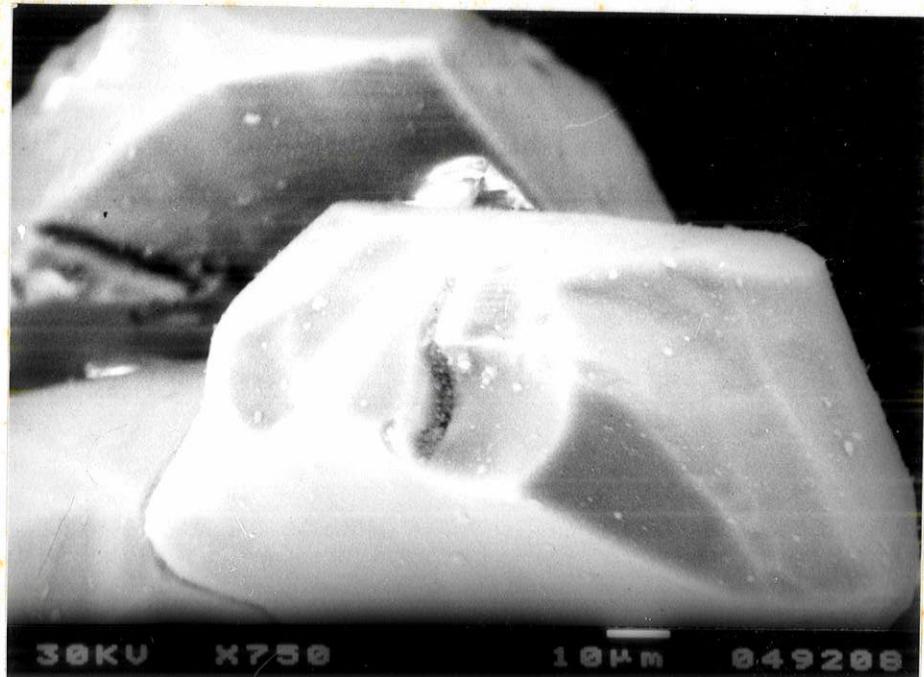
(McCLELLAN & LEHR, 1960 apud PEREIRA, 1990),

utilizando-se os valores de distância interplanar d correspondente aos picos 300, 410 e 310. Obteve-se um valor médio de $a = 9,3723$.

O valor para o parâmetro c foi calculado a partir do valor da distância interplanar d do pico 002, sendo:

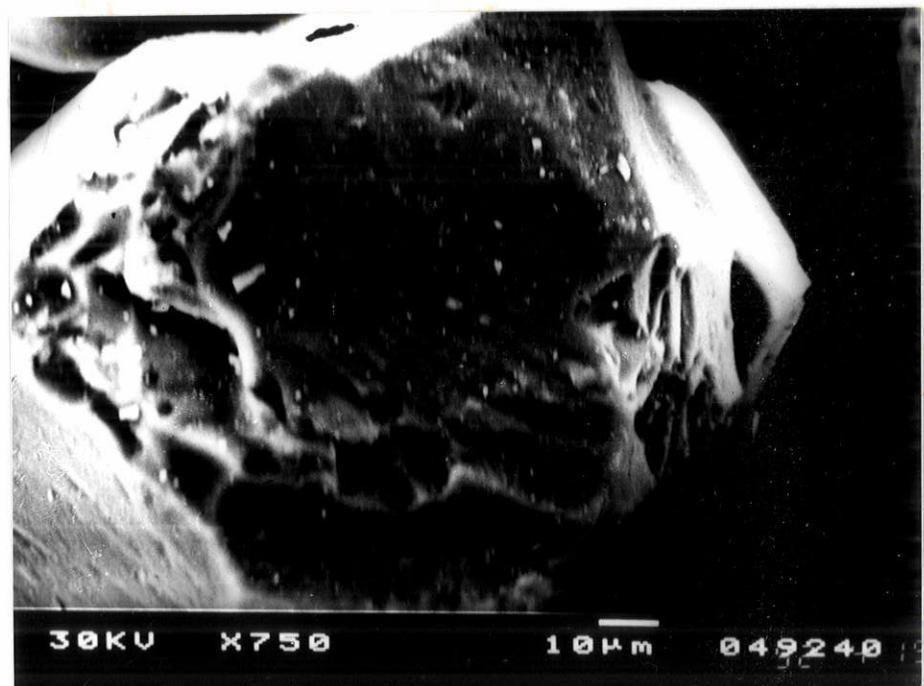
$c = d_{002} \times 2$, e obteve-se um valor de $c = 6,8600$. PEREIRA (1990) determinou parâmetros com valores bastante próximos para as apatitas de Anitápolis, $a_{média} = 9,3836$, e $c_{média} = 6,8762$. Segundo MEHMEL & NÁRAY-SZABÓ (1930 apud McCLELLAN, 1980), que determinaram a estrutura do cristal de fluorapatita, os valores dos parâmetros a e c para o mineral são, respectivamente, 9,3700 e 6,8800.

As apatitas da amostra C1 apresentam-se como grãos ovóides de cerca de 100 μm de dimensão máxima (FOTO 6). Apesar de resistentes aos processos de intemperismo e sofrendo concentração residual nos perfis de alteração, a dissolução das apatitas é observada em Catalão I. Ao microscópio eletrônico, apresentam sinais de dissolução, como cavidades na superfície dos grãos (FOTO 7), e figuras de corrosão, como canais orientados sobre as faces dos cristais (FOTOS 8 e 9). Ao microscópio óptico observam-se grãos com bordas e contatos inter-minerais corroídos.



30KV X750 10 μ m 049208

FOTO 7 - Fotomicrografia de apatitas de Catalão I
(Concentrado de rocha fosfática, amostra C1).



30KV X750 10 μ m 049240

* FOTO 8 - Cavidades superficiais de dissolução em apatita do concentrado de rocha fosfática (C1) de Catalão I.

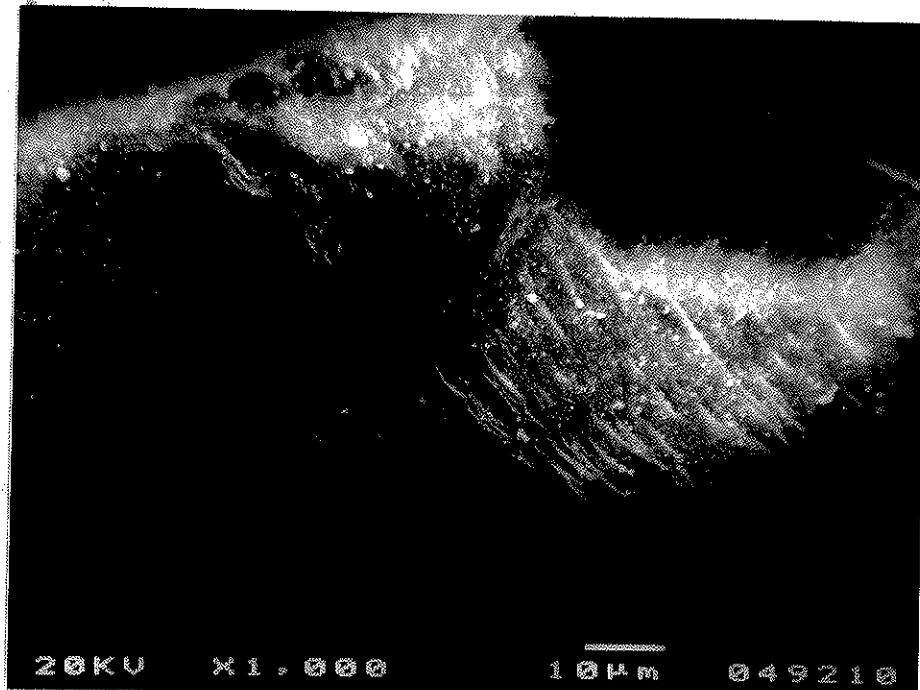


FOTO 9 - Figuras de corrosão como canais orientados sobre as faces de cristais de apatita do concentrado de rocha fosfática (C1) de Catalão I.

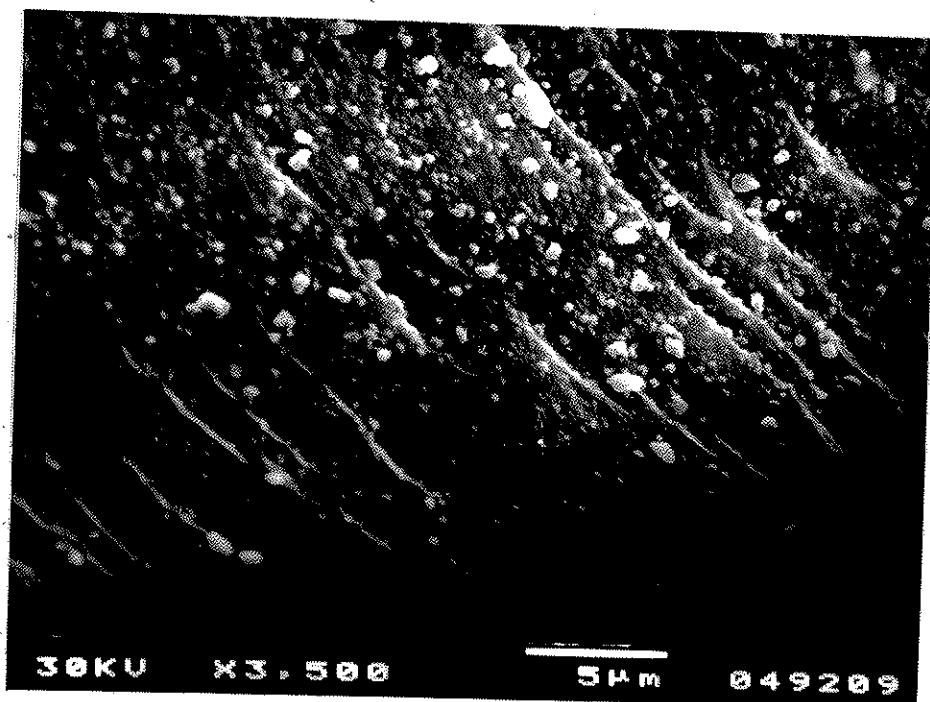


FOTO 10 - Detalhe da FOTO 8

MARCHENKO *et al.* (1976) estudaram apatitas do manto de alteração intempérica sobre carbonatitos da antiga União Soviética. Um estágio inicial de dissolução da apatita é acompanhado pela lixiviação do fluor, hidratação, e um leve excesso de cálcio pode ser creditado à lixiviação parcial de fósforo. De modo geral, quando em condições de intenso intemperismo, a presença de carbonatos impede a alteração da apatita. Com a alteração dos carbonatos, o meio fica empobrecido em Ca, tornando-se mais ácido. Nessas condições, a apatita entra em solução e, na ausência de Al, proveniente da alteração de minerais alumino silicatados, pode ocorrer a reprecipitação de apatita secundária em níveis inferiores do perfil na forma de carbonato ou hidróxi-carbonato apatita (FLICOTEAUX & LUCAS, 1984; REEDMAN 1984; SLUKIN *et al.*, 1985; BRAGA & BORN 1988; LOTTERMOSER, 1990; ALCOVER NETO, 1991; WALTER, 1991). Em Catalão I estas variedades de apatita não foram identificadas, sendo os minerais observados ao microscópio eletrônico de varredura e microscopia óptica desprovidos de morfologia característica de apatitas secundárias como, por exemplo, agregados fibroradiados (LAVAL *et al.*, 1988; ALCOVER NETO, 1991) e prismas hexagonais e agregados nodulares (LOTTERMOSER, 1990).

A partir da dissolução da apatita, no caso de haver alguma fonte de alumínio presente, pode ocorrer a formação de fosfatos aluminosos secundários (FLICOTEAUX & LUCAS, 1984; KAZUE *et al.*, 1985; LOTTERMOSER, 1990). Em Catalão I, devido ao fato de o carbonatito encontrar-se sempre associado a outros tipos litológicos portadores de Al, como é o caso do glimmerito, houve condições para a formação de fosfatos aluminosos secundários do grupo da plumbogumita e florencita. Essas fases neoformadas agem como armadilhas para os ETR que assim, podem concentrar-se nos níveis superiores do perfil.

_ COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS APATITAS

A análise química para elementos maiores das apatitas separadas do concentrado de rocha fosfática (C1) está apresentada na TABELA 18, juntamente com análises químicas pontuais semi-quantitativas de apatitas primárias dos carbonatitos de Juquiá, Tapira e de Maicuru. O teor de F dosado indica que, de fato, a variedade fluorapatita é predominante em Catalão I, conforme observado anteriormente pelas análises por difração de raios-X. A pequena perda ao fogo observada pode significar uma certa quantidade ânions OH⁻ e CO₃²⁻ na estrutura do mineral. Teores elevados de MgO em C1 e em uma amostra de Juquiá, e em SiO₂, em C1, são observados. A relação CaO/FeO_e é aproximadamente constante para todas as amostras.

A FIGURA 27 apresenta as curvas normalizadas em relação ao condrito para ETR dosados nas amostras C1 (por espectrometria de plasma-ICP) e em C3, C4 e C5 (por ativação neutrônica). A utilização destes dois métodos analíticos foi comparada por outros autores, não apresentando discrepâncias entre os resultados (PEREIRA *et al.*, 1991; DUTRA & FORMOSO, 1991). Observa-se para todas as amostras um mesmo padrão geral de enriquecimento, principalmente dos ETRL, com forte fracionamento.

Para uma análise comparativa, as TABELAS 19a e 19b apresentam dosagens para ETR, pelos dois métodos analíticos, para apatitas de alguns complexos alcalino-carbonatíticos do Brasil e para as apatitas analisadas para Catalão I. A soma total de ETR (TABELA 19b) indica que as apatitas de Catalão I estão entre as mais enriquecidas em ETR, juntamente com as de Angico dos Dias. Este enriquecimento é acentuado principalmente para ETRL, resultado de um alto grau de fracionamento, evidenciado pelas elevadas razões La/Lu. As amostras analisadas neste trabalho não confirmam a anomalia negativa de Ce encontrada por DUTRA & FORMOSO (1991) para apatitas de Catalão I.

Catalão I #	(1)*	(2)*	(3)¶	(4)¶	(5)¶
CaO/FeO _e	1,28	1,26	1,32	1,32	1,31
FeO _e	41,30	42,82	37,61	41,32	41,25
CaO	55,0	54,05	49,69	53,58	54,41
Na ₂ O	0,17	0,11	2,25	-	-
MgO	0,30	0,05	0,07	-	-
MnO	0,02	0,04	0,12	-	-
SiO _e	0,32	0,12	0,13	-	-
F	2,5	-	-	3,68	3,75
Cl	-	0,01	0,02	-	-
P.F.	0,70	-	-	-	-

(1) 86 análises da parte central de apatitas com borda de maior birrefrigência de Juquiá, SP (WALTER, 1991).

(2) 20 análises em bordas de maior birrefrigência de apatitas endógenas de Juquiá, SP (WALTER, 1991)

(3) apatita primária de apatitito de Maicuru, PA (LEMOS, 1990).

(4) apatita primária de glimmerito de Maicuru, PA (LEMOS, 1990).

(5) apatita primária de Tapira, MG (ROEDER et al., 1987).

TABELA 18- * Análises químicas pontuais semi-quantitativas (EDS) de apatitas primárias.

Análises químicas quantitativas de apatitas primárias

Nº	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu
01	1484	3688	1660	208.9	40.4	107.9	42	7.1	13.1	4	0.5
02	1126	3018	1367	248.7	57.46	140.7	75.1	12.74	22.88	8.31	0.85
03	1257	2594	1304	230.8	62.4	153.8	115.3	19.83	37.26	16.67	1.65
04	466	541	297.5	52.08	14.6	42.2	20.76	3.38	7.02	3.49	0.32
05	276.3	537.6	366.1	62.39	16.4	41.03	17.9	2.68	5.39	1.9	0.14
06	912	2206	1192	206.4	56.62	132.8	82.99	13.93	27.26	12.46	1.26
07	485.4	600.7	247.2	48.91	15.33	44.22	32.99	5.86	12.07	5.69	0.59
08	322.9	897.3	526.5	93.75	23.66	57.76	32.49	5.54	10.12	3.26	0.36
09	1326	3229	2240	346.7	75.53	163.4	69	10.5	17.91	4.78	0.44
10	1365	3382	2063	337.9	70.8	158.7	68.1	11.42	19.73	6.67	0.73
11	1588	1770	1780	228.6	46.57	108.3	43	6.4	11.2	3.11	0.34
12	188.4	519.1	349.6	96.56	19.18	51.96	34.07	5.97	12.9	5.61	0.66
13	183.9	535	352.8	71.83	18.88	51.0	34.57	5.51	11.18	4.93	0.49
14	212.1	581.7	382	75.9	21.21	56.86	37.18	6.56	13.21	6.02	0.70
15	212.9	588.2	386.4	78.2	21.57	57.06	38.26	6.52	13.30	5.91	0.62
16	245.1	661.5	415.0	79.91	21.67	57.08	39.67	6.79	14.29	6.92	0.73
17	480.9	1378	764.4	139.2	37.1	88.98	50.91	8.15	15.44	6.84	0.75
18	376.2	1087	650.1	116.2	30.99	74.9	44.19	7.37	14.3	6.54	0.76
19	377.7	1121	664.6	121.9	31.82	80.54	49.68	8.35	16.52	7.15	0.77
20	331.5	874.0	514.3	96.52	27.38	68.8	49.41	9.3	21.44	14.29	1.93
21	187.4	531.8	351.2	66.22	18.32	46.22	29.21	5.14	10.31	4.73	0.47
22	197.4	620.0	306.4	82.3	16.6	50.2	27.6	4.4	9.4	5.0	0.55
23	316.3	773.0	495.0	127.0	26.0	68.0	30.0	5.0	9.3	3.6	0.42

Apatitas analisadas por Ativação Neutrônica

Nº	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Tb	Dy	Yb	Lu
24	2259	4181	-	1888	268	71	14	-	9.7	1.15
25	1766	3594	-	1548	200	53	11.7	-	6.7	-
26	1297	2848	-	1586	178	47	20	-	11.6	0.93
27	515	1221	155	682	129	36	11	52	9.2	0.97
28	244	521	81	402	83	22	8.2	44	7.6	0.77
29	256	604	105	418	85	22	10	44	6.7	0.77
30	240	515	83	411	78	22	8.9	42	7.3	0.68
31	460	1199	180	763	137	35	11.5	52	9.3	0.77
32	460	1084	181	645	128	33	11.3	53	8.9	0.72
33	425	646	81	553	107	30	12.9	67	30	3.7
34	204	545	73	376	79	22	8.2	41.2	9.2	0.72

TABELA 19a - Dados analíticos para ETR para apatitas de complexos alcalino-carbonatíticos do Brasil

Amostra 1- apatita de concentrado de rocha fosfática (Goiásfértil) de Catalão I, GO (C1)

Amostra 2- apatita cristalinas, Araxá, MG (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 3- apatita microcristalina, Araxá, MG (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 4- apatita de carbonatita, Tapira, MG (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 5- apatita de Jacupiranga, SP-Padrão IPT

Amostra 6- apatita decomposta, Araxá, MG (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 7- apatita Fosfértil-Tapira, MG (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 8- apatita de carbonato-dolomítico, Jacupiranga, SP (FORMOSO et al., 1991)

Amostras 9 e 10 - apatitas de Angico dos Dias, AM (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 11- apatita de Catalão I, GO (FORMOSO et al., 1991)

Amostras 12 a 21 -apatitas de Anitápolis, SC (PEREIRA, 1990)

Amostras 22 e 23 -apatitas de apatitito de Maicuru, PA (LEMOS, 1990)

Amostras 24 a 26 -apatitas de horizonte mineralizado em fosfato de Catalão I, GO (C3, C4 e C5)

Amostras 27 a 33 -apatitas de Anitápolis, SC (PEREIRA, 1990)

Amostra 34 -apatita de Juquiá, SP (ALCOVER NETO, 1990)

Nº	ETRL	ETRP	ETRL/ETRP	ETR	La/Lu
01	7081.3	174.6	40.56	7255.9	2968.0
02	6087.16	260.58	23.36	6347.74	1324.7
03	5448.2	344.51	15.81	5792.71	761.82
04	1371.18	77.17	17.77	1448.35	1456.25
05	1258.43	69.04	18.23	1327.47	1973.57
06	4573.02	270.7	16.89	4843.72	723.8
07	1397.54	101.42	13.78	1498.96	822.7
08	1864.11	109.54	17.02	1973.65	896.94
09	7217.23	266.03	27.1	7483.26	3013.6
10	7218.48	265.25	27.21	7483.73	1869.9
11	5413.17	172.38	31.4	5585.55	4670.6
12	1172.84	111.17	10.55	1284.01	285.4
13	1162.41	107.68	10.80	1270.09	375.3
14	1272.91	120.49	10.56	1393.4	303.0
15	1287.27	64.61	19.92	1351.88	343.83
16	1423.18	125.48	11.34	1548.66	335.75
17	2799.6	171.07	16.37	2970.67	641.2
18	2260.49	148.06	15.27	2408.55	495.0
19	2317.02	163.01	14.21	2480.03	490.5
20	1843.7	165.17	11.16	2008.87	171.76
21	1154.94	96.08	12.02	1251.02	398.72
22	1222.7	97.15	12.59	1319.85	358.91
23	1737.3	116.32	14.94	1853.62	753.10

Ativação Neutrônica

24	8667.0	24.85	348.77	8692.85	1964.34
25	7161.0	18.4	389.18	7179.4	-
26	5956.0	32.53	183.09	5988.53	1394.6
27	2738.0	73.17	37.42	2811.17	530.93
28	1353.0	60.57	22.34	1413.57	316.9
29	1490.0	61.47	24.24	1551.47	332.5
30	1349.0	58.88	22.91	1407.88	352.9
31	2774.0	108.57	25.55	2882.57	597.4
32	2531.0	106.92	23.67	2637.92	638.9
33	1842.0	143.6	12.83	1985.6	114.9
34	1299.0	59.3	21.91	1358.3	283.3

TABELA 19b - Dados analíticos para ETR para apatitas de complexos alcalino-carbonatíticos no Brasil.

Amostra 1- apatita de concentrado de rocha fosfática (Goiásfértil) de Catalão I, GO (C1)

Amostra 2- apatita cristalinas, Araxá, MG (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 3- apatita microcristalina, Araxá, MG (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 4- apatita de carbonatita, Tapira, MG (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 5- apatita de Jacupiranga, SP-Padrão IPT

Amostra 6- apatita decomposta, Araxá, MG (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 7- apatita Fosfértil-Tapira, MG (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 8- apatita de carbonato-dolomítico, Jacupiranga, SP (FORMOSO et al., 1991)

Amostras 9 e 10 - apatitas de Angico dos Dias, AM (FORMOSO et al., 1991)

Amostra 11- apatita de Catalão I, GO (FORMOSO et al., 1991)

Amostras 12 a 21 -apatitas de Anitápolis, SC (PEREIRA, 1990)

Amostras 22 e 23 -apatitas de apatito de Maicuru, PA (LEMOS, 1990)

Amostras 24 a 26 -apatitas de horizonte mineralizado em fosfato de Catalão I, GO (C3, C4 e C5)

Amostras 27 a 33 -apatitas de Anitápolis, SC (PEREIRA, 1990)

Amostra 34 -apatita de Juquiá, SP (ALCOVER NETO, 1990)

O enriquecimento em ETRL e o alto grau de fracionamento são também característicos para as demais amostras. Como já foi assinalado por ROEDER (1987) e FEREIRA (1990), estes são traços característicos de apatitas de carbonatitos.

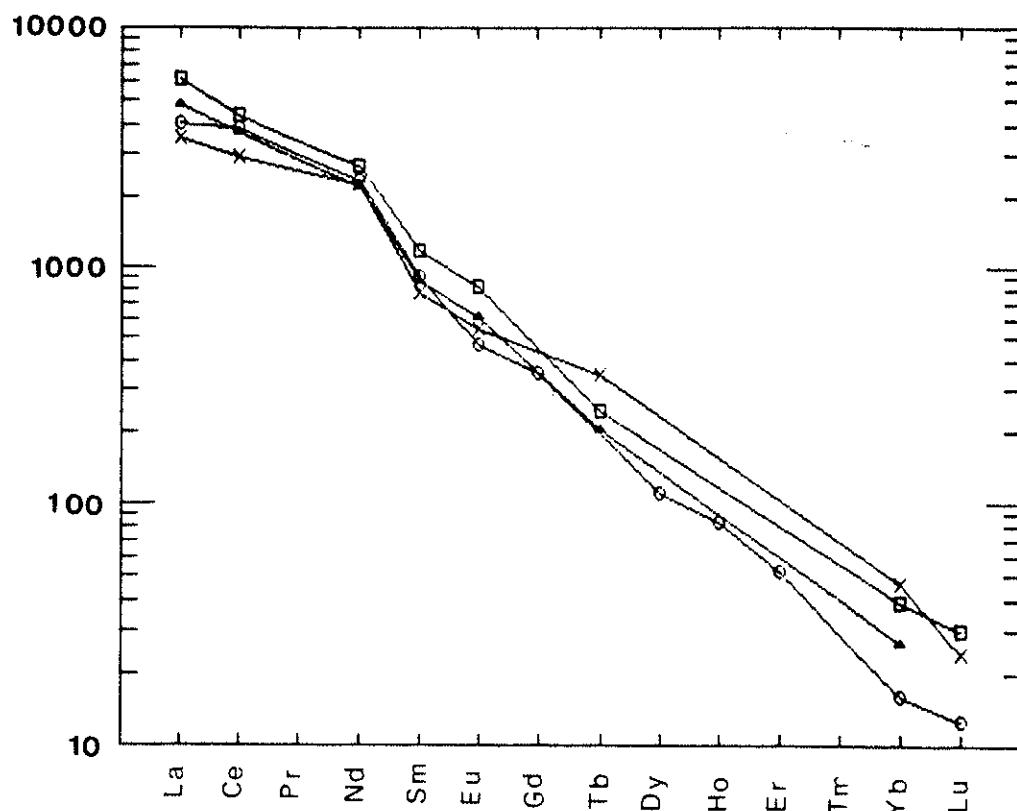


FIGURA 27 - Curvas dos teores de ETR, normalizados para o condrito, de apatitas de Catalão I (amostras C1, C3, C4 e C5).

CONCLUSÕES

As apatitas de Catalão I foram identificadas, através de análises químicas e difratométricas de raios-X, como fluorapatitas. Apesar de serem citadas outras variedades no complexo (VALARELLI, 1971), estas não foram observadas.

A dosagem para ETR evidenciou um enriquecimento e fracionamento elevados para as apatitas de Catalão I, quando comparadas às apatitas de outros complexos alcalino-carbonatíticos do Brasil. As apatitas parecem ser fonte importante de ETR para os fosfatos secundários aluminosos encontrados nos níveis superiores dos perfis de alteração em Catalão I.

Foram observadas feições de dissolução na superfície das apatitas, porém não se encontraram cristais com características de apatita secundária. No entanto, a presença de carbonatoapatita, identificada por VALARELLI (1971), pode corresponder a apatitas supérgenas. A dissolução da apatita fornece elementos para a formação de fosfatos aluminosos secundários do grupo da plumbogumita e florencita.

CAPÍTULO VI

O COMPORTAMENTO DOS ETR DURANTE A ALTERAÇÃO INTEMPÉRICA

O comportamento dos ETR durante os processos de alteração intempérica das rochas tem sido estudado por diversos autores e não se encontra ainda bem definido (STEINBERG & COURTOIS, 1976; NESBITT, 1979; DUDDY, 1980; COSTA, 1987; HUMPRIS, 1988; FORMOSO *et al.*, 1989; FLICOTEAUX *et al.*, 1990; LOTTERMOSEN, 1990; OLIVEIRA & SILVA, 1990).

De maneira geral, o enriquecimento ou empobrecimento dos ETR nos materiais alterados parece estar relacionado às condições físico-químicas das soluções de intemperismo (NESBITT, 1979; HUMPRIS, 1988) e à habilidade dos minerais secundários neoformados de acomodar os ETR retirados dos minerais primários (HUMPRIS, 1988).

Na alteração intempérica pode haver um fracionamento dos ETR concentrando os ETRL em relação aos ETRP (NESBITT, 1979; FORMOSO *et al.*, 1989; FLICOTEAUX *et al.*, 1990; OLIVEIRA & SILVA, 1990); anomalias de Ce são citadas como comuns em processos de laterização (STEINBERG & COURTOIS, 1976; FORMOSO *et al.*, 1989; OLIVEIRA & SILVA, 1990).

Em complexos alcalino-carbonatíticos, esses elementos encontram-se bastante enriquecidos, quando comparados com outros tipos de rochas. Seus produtos da alteração intempérica encontram-se também, geralmente, enriquecidos, podendo em alguns casos constituir-se como depósitos minerais (VALARELLI, 1971; LOTTERMOSEN, 1990).

Em Catalão I foi realizado um estudo dos ETR nas amostras do perfil A, com a finalidade de determinar o comportamento desses elementos desde a rocha fresca até a laterita. Amostras especialmente enriquecidas em ETR, provenientes de níveis extremamente silicificados na área do perfil B, foram estudadas com a finalidade de identificar e caracterizar suas principais fases portadoras. Também nos

furos de sondagem foram selecionadas 9 amostras que apresentaram manchas esverdeadas características de enriquecimento em monazita.

1. O PERFIL "A"

Os resultados analíticos para os teores de ETR dosados para as amostras do perfil "A" estão apresentados nas TABELAS 20 e 21.

Os materiais originais que compõem o horizonte rocha fresca (AIC e AIGL) apresentam teores de ETR elevados em relação à média crustal (0,0151%) (TABELA 20). Os carbonatitos são mais enriquecidos do que os glimmeritos, e exibem maior fracionamento dos ETRL em relação aos ETRP, como é indicado pela mais alta razão $(La/Lu)_n$. Em ambos os litotipos, a apatita é certamente uma das fases portadoras desse grupo de elementos pois, como visto no Capítulo V, esse mineral apresenta 0,85% em $TReO_3$. Sua baixa abundância nessas rochas, 4,1% no glimmerito e 6,5% no carbonatito aproximadamente, indicada pelos teores de fósforo nas rochas frescas (TABELA 16), não permite atribuir apenas a esse mineral os teores em ETR apresentados pelas duas amostras analisadas. Outros minerais possivelmente portadores de ETR nas rochas estudadas são os carbonatos, a barita, o pirocloro e a perovskita.

A análise do comportamento geoquímico dos ETR nos diversos horizontes de alteração, quando comparado ao da rocha fresca, como é mostrado pelas curvas normalizadas para o condrito (FIGURAS 28, 29 e 30), possibilita as seguintes observações:

— Horizonte Rocha Alterada (Amostra A2)

	A1GL	A1C
La	243.7	668.9
Ce	566.2	1423.0
Nd	232.1	530.7
Sm	30.8	63.9
Eu	6.2	12.4
Gd	15.3	31.3
Dy	7.0	12.8
Ho	1.2	2.2
Er	2.3	3.9
Yb	0.93	1.05
Lu	0.14	0.13
TR _{REE} (%)	0.13	0.32
(La/Lu) _n	187	530

TABELA 20 - Teores de ETR (ppm) da rocha fresca

A1GL = glimmerito; A1C = carbonatite

	A _e	A _g	A ₄	A _{4S}	A _{4H}	A ₅	A _{5G}	A ₆	A ₇	A ₈
La	197.4	1193.0	930.0	284.3	876.7	1249.0	1396.0	2895.0	2493.0	1446.0
Ce	517.8	2627.0	2366.0	640.4	2147.6	3120.0	3027.0	7275.0	5641.0	3280.0
Nd	244.8	1290.0	1188.0	285.1	778.1	1622.0	1279.0	4409.0	2251.0	1542.0
Sm	34.8	181.7	166.4	39.8	99.8	225.2	189.7	852.9	332.4	211.0
Eu	7.3	38.2	33.8	8.0	19.1	45.8	41.4	198.2	66.2	42.8
Gd	17.6	101.9	86.0	21.0	48.7	110.5	107.3	492.1	195.9	108.3
Dy	7.8	49.0	36.6	10.2	21.3	43.4	51.3	207.3	68.3	51.5
Ho	1.3	8.4	6.0	1.8	3.6	7.1	8.7	33.5	11.0	8.8
Er	2.2	15.4	9.5	3.4	6.3	11.1	15.3	50.2	18.9	16.2
Yb	0.76	6.3	2.8	1.2	2.3	2.9	6.3	16.3	6.5	7.3
Lu	0.096	0.68	0.31	0.19	0.28	0.33	0.74	1.63	0.90	0.88
TR _{REE} (%)	0.12	0.64	0.56	0.15	0.47	0.75	0.72	1.92	1.30	0.79
(La/Lu) _n	213	183	313	158	322	396	197	185	287	170

TABELA 21 - Teores de ETR (ppm) dos horizontes de alteração :

A_e = rocha alterada; A_g, A₄, A₅ = saprolito; A_{4H}, A_{4S} = facies silicificada;A_{5G} = facies ferruginosa; A₆, A₇ = laterita; A₈ = cobertura superficial.

Os materiais nesse horizonte parecem ter se originado a partir do glimmerito, como já observado anteriormente, em função dos teores de elementos maiores e traços. A quase perfeita superposição entre as curvas normalizadas (FIGURA 28) para o glimmerito (A1GL) e para a rocha alterada (A2) indicam que nesse primeiro estágio do intemperismo a mobilidade dos ETR é praticamente nula.

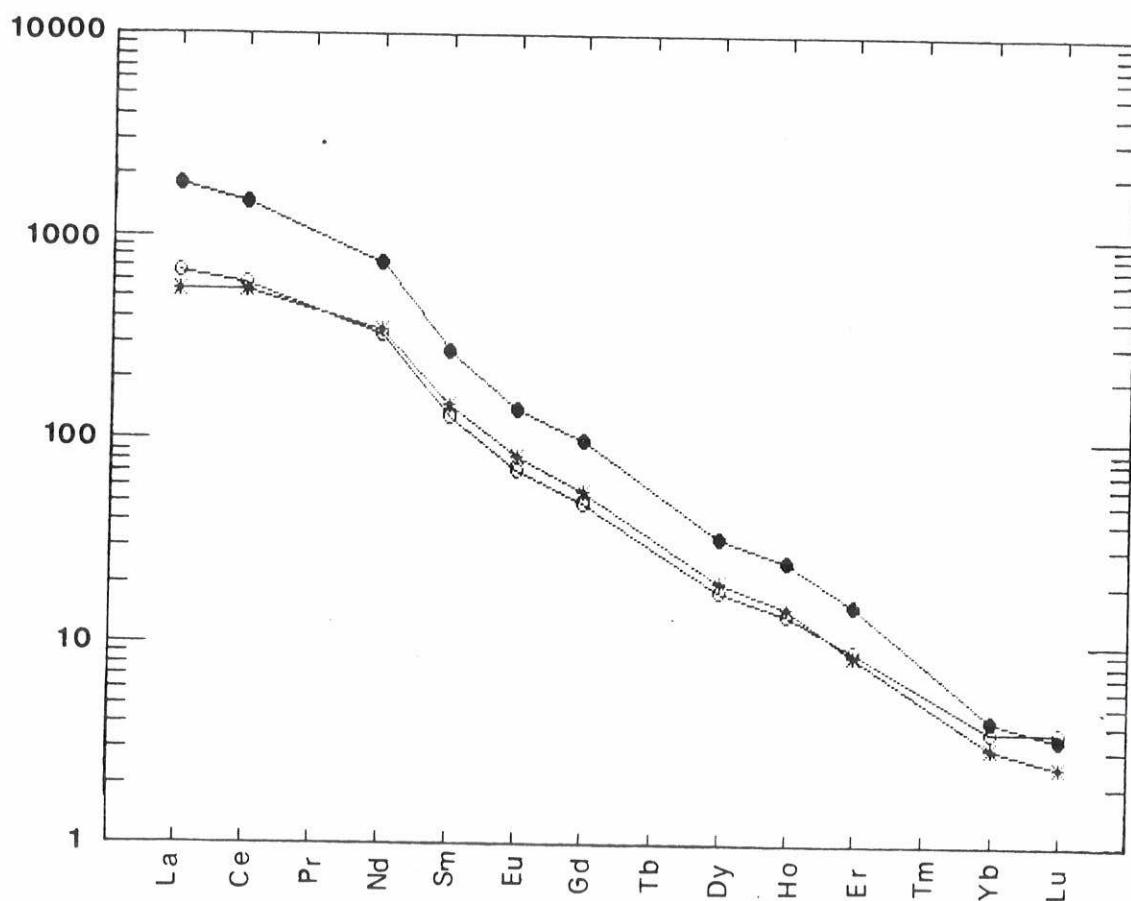


FIGURA 28 – Curvas dos teores de ETR, normalizados para o condrito, do horizonte rocha fresca (A1GL e A1C) e horizonte rocha alterada (A2):

- A1GL = glimmerito
- A1C = carbonatito bandado
- * A2 = horizonte rocha alterada

Horizonte Saprolítico (Amostras A3, A4 e A5)

Os três níveis que compõem esse horizonte estão enriquecidos tanto em relação ao glimmerito, quanto em relação ao carbonatito. Esse enriquecimento deve ser, pelo menos em parte, devido à concentração relativa de apatita. As curvas para os materiais alterados são sensivelmente paralelas àquelas representativas dos materiais frescos (FIGURA 29). As razões $(La/Lu)_N$ permanecem no intervalo entre as do carbonatito e do glimmerito, o que não permite falar em fracionamento durante a alteração intempérica.

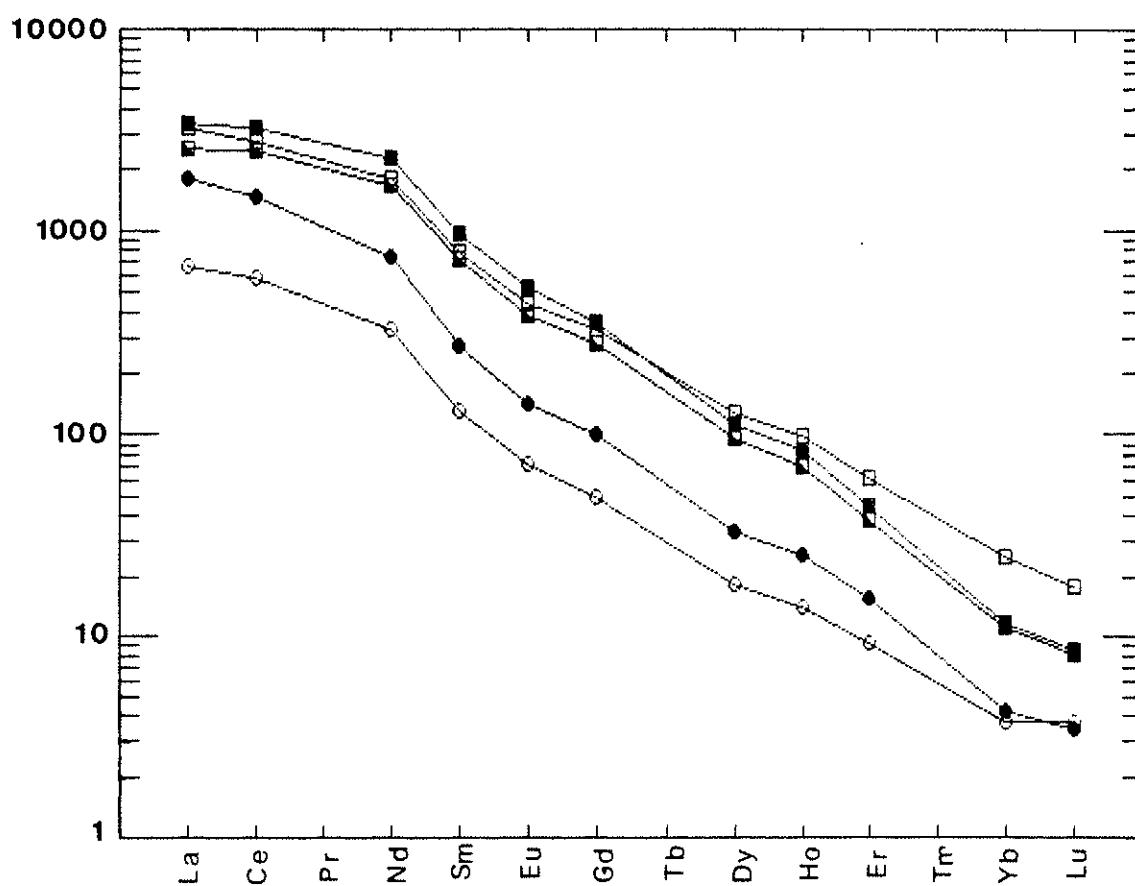


FIGURA 29 - Curvas dos teores de ETR, normalizadas para o condrito, do horizonte rocha fresca (AIGL e AIC) e horizonte saprolítico (A3, A4 e A5).

- AIGL = glimmerito
- AIC = carbonatito bandado
- A3, A4 e A5 = horizonte saprolítico

- Horizonte Laterítico (Amostras A6 e A7) e Cobertura Superficial (Amostra A8)

Os dados da TABELA 21 indicam que as amostras A6, A7 e A8 são bastante enriquecidas em ETR, quando comparadas com as demais amostras do perfil. A FIGURA 30 mostra as curvas normalizadas aproximadamente paralelas às da rocha fresca, o que, juntamente com as razões (La/Lu)_n mantidas dentro do intervalo verificado para essas rochas, aponta para a inexistência de fracionamento evidente durante a alteração.

Nesses níveis, os principais minerais portadores de ETR devem ser os fosfatos aluminosos secundários. Se considerarmos que os teores de Sr, Ca e ETR nesses horizontes são inteiramente atribuíveis aos fosfatos aluminosos secundários e projetarmos esses teores em diagramas triangulares, veremos que o membro predominante nesses materiais é a florencita (FIGURA 31).

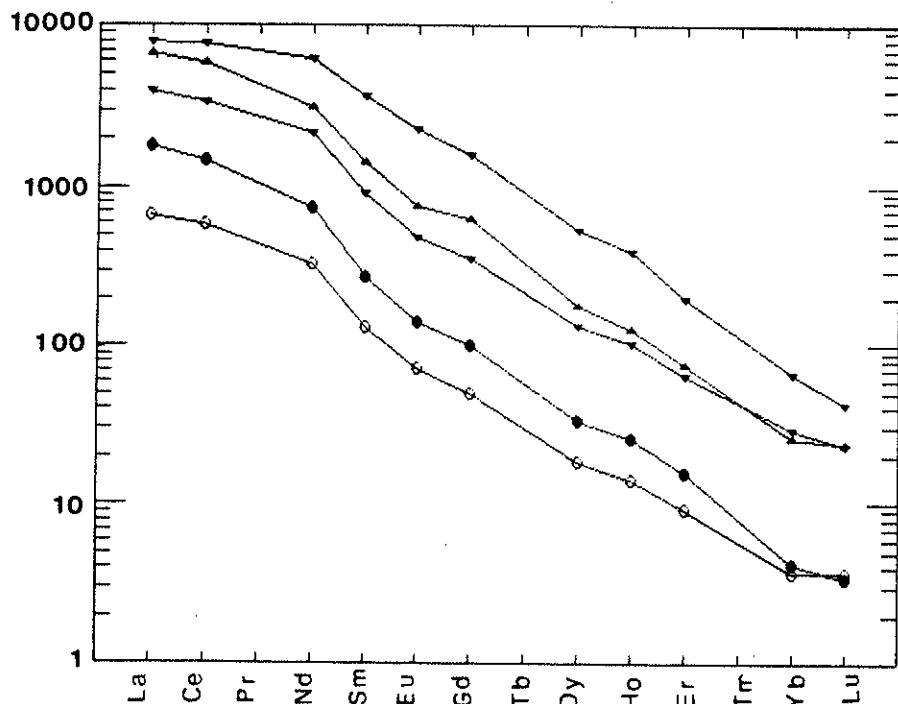


FIGURA 30 - Curvas dos teores de ETR, normalizadas para o condrito, do horizonte rocha fresca (A1GL e A1C) e horizonte laterítico (A6 e A7) e cobertura superficial (A8).

- A1GL = glimmerito
- A1C = carbonatito bandado
- ▽ A6 e △ A7 = horizonte laterítico
- ▼ A8 = cobertura superficial

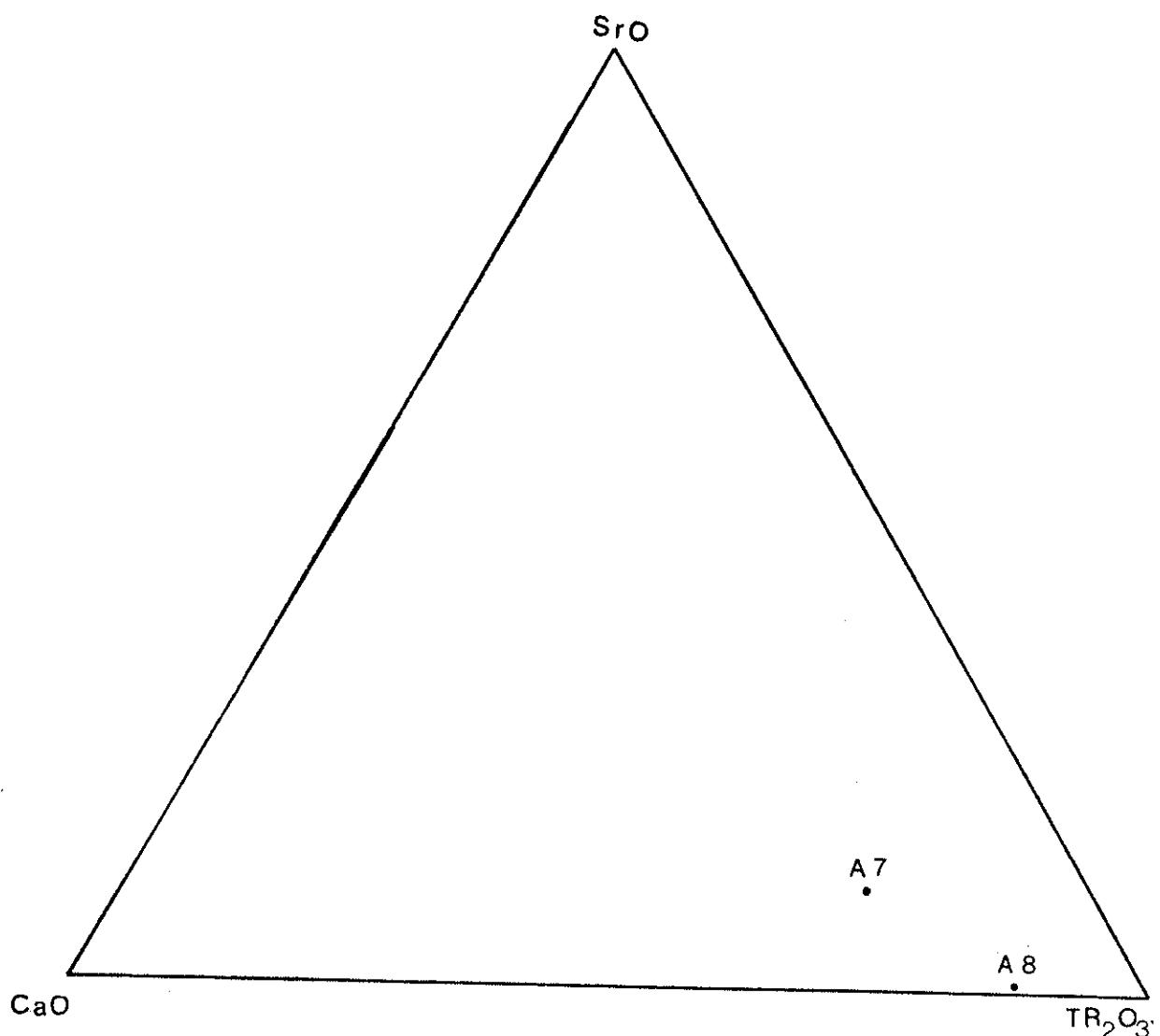


FIGURA 31 - Diagrama triangular $\text{SrO}-\text{CaO}-\text{TR}_2\text{O}_3$.

A7 = horizonte laterítico

A8 = cobertura superficial

- Fácies Particulares

No nível A4 as amostras A4M e A4S representam facies particulares que compõem um "boxwork" silicoso. Os teores de ETR na matriz (A4M) são um pouco inferiores aos do saprolito no nível A4, e no arcabouço silicoso o teor de ETR decresce bastante. Isso é devido à diluição causada pelo quartzo nesses dois materiais, mais acentuada no caso do arcabouço silicoso. No entanto, verifica-se que também aqui o paralelismo entre as curvas normalizadas é mantido (FIGURA 32).

A amostra A5G é representativa de uma facies ferruginosa no nível A5. Os teores de ETR em A5G são da mesma ordem de grandeza dos teores do nível A5 (TABELA 21), o que pode ser observado pela superposição das curvas normalizadas em relação ao condrito (FIGURA 33). Para os ETRP, no entanto, nota-se um ligeiro enriquecimento em A5G.

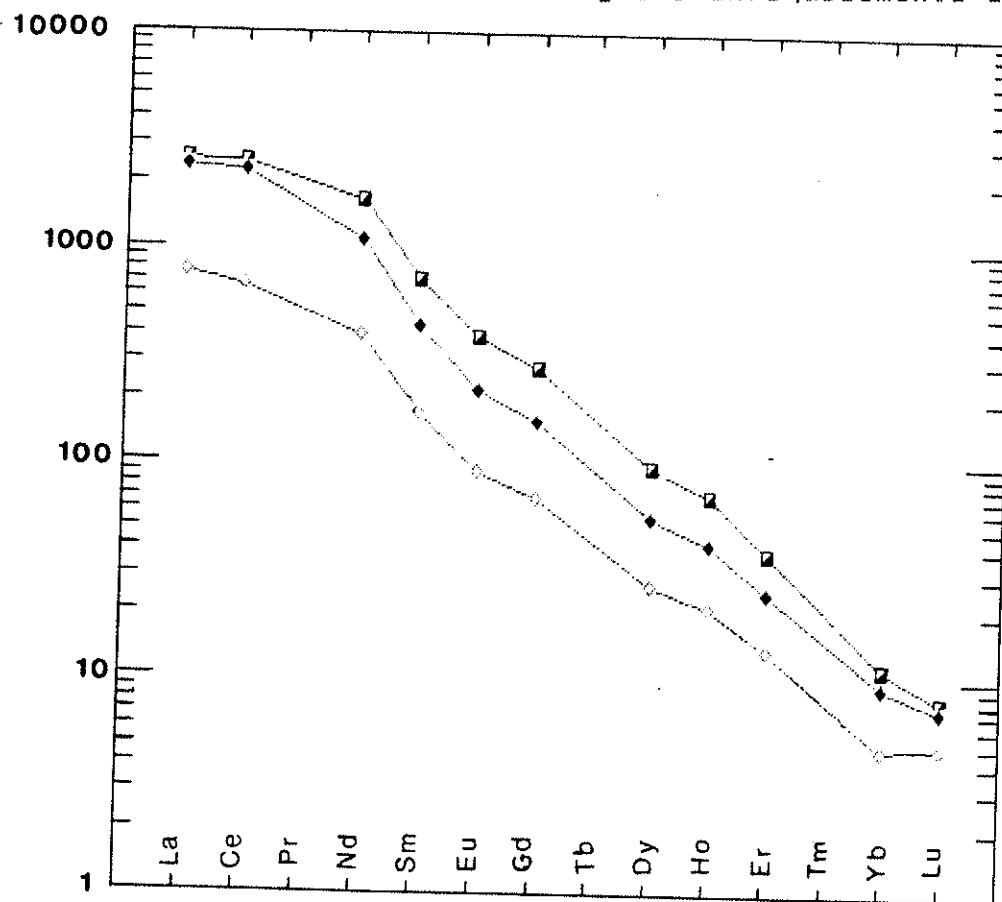


FIGURA 32 - Curvas dos teores de ETR, normalizadas para o condrito, da amostra do nível A4 e facies particulares A4S e A4M.

◊ A4S= arcabouço silexítico

◆ A4M= matriz de preenchimento do arcabouço silexítico

óxidos de ferro em abundância e grande quantidade de cristais centimétricos de barita. Em cavidades que variam de milímetros a centímetros de diâmetro, concentra-se um material de aspecto terroso, cor esverdeada quando fresco e verde acinzentado quando já exposto. Esse mesmo material pode também ser observado como filmes sobre o silexito, em forma de leques (FOTO 10).

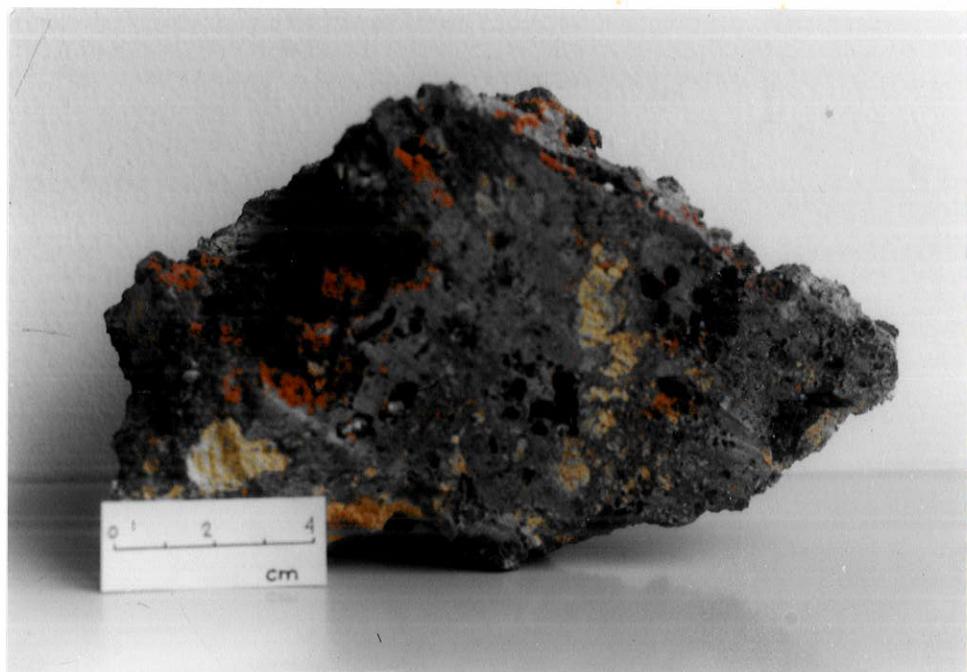


FOTO 11 - Amostra de material silicificado extremamente enriquecido em ETR, da área do perfil B (amostra SCII).

- Caracterização mineralógica dos materiais

Em lâminas delgadas as amostras SCI, SCII, SCIII e SCIV apresentam mineralogia bastante semelhante, também observada pela análise por difração de raios-X (FIGURA 34). Quartzo, barita, monazita e óxidos de ferro compõem as amostras, com pequenas variações com relação à maior ou menor quantidade de óxidos de ferro e grau de cristalização do quartzo.

As amostras B5, B6 e B7 foram submetidas à difração

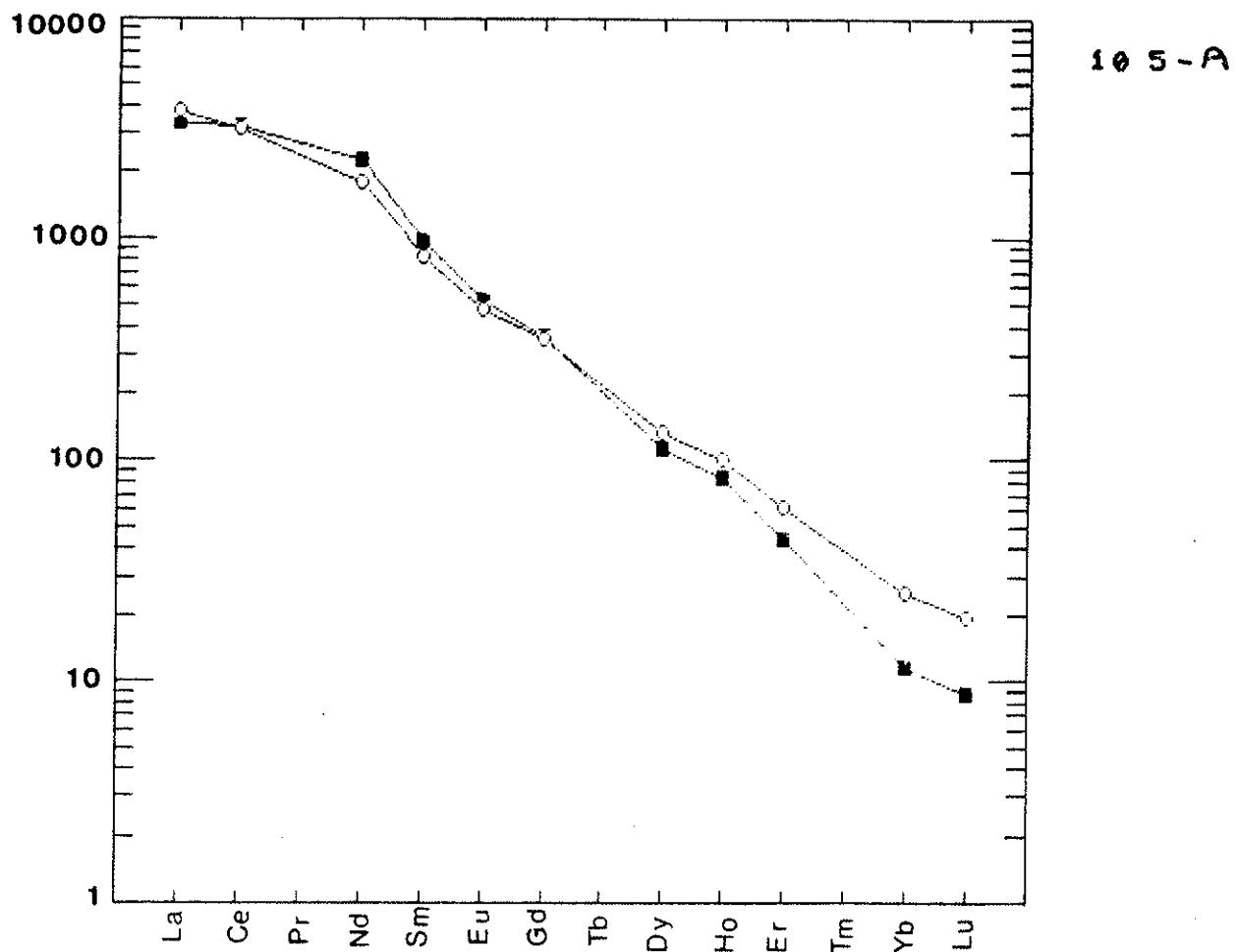


FIGURA 33 - Curvas dos teores de ETR, normalizadas para o condrito, da amostra do nível A5 e facies particular A5G.
○ A5G = facies ferruginizada.

2. MATERIAIS ENRIQUECIDOS EM ETR

a. Amostras provenientes da área do perfil B

Com a finalidade de caracterizar o material extremamente rico em ETR, foram selecionadas 4 amostras em área adjacente ao perfil B, na mina 2 da Mineração Catalão, nas cotas 825, 845, 850 e 855 metros denominadas de SCI, SCII, SCIII e SCIV, respectivamente. Essas amostras representam um horizonte silicificado, bastante semelhante ao nível B5 na base do perfil B. Foram também coletadas as amostras B6 e B7 de material semelhante à mesma cota da mostra B5 do perfil B.

As amostras apresentam-se muito silicificadas, com

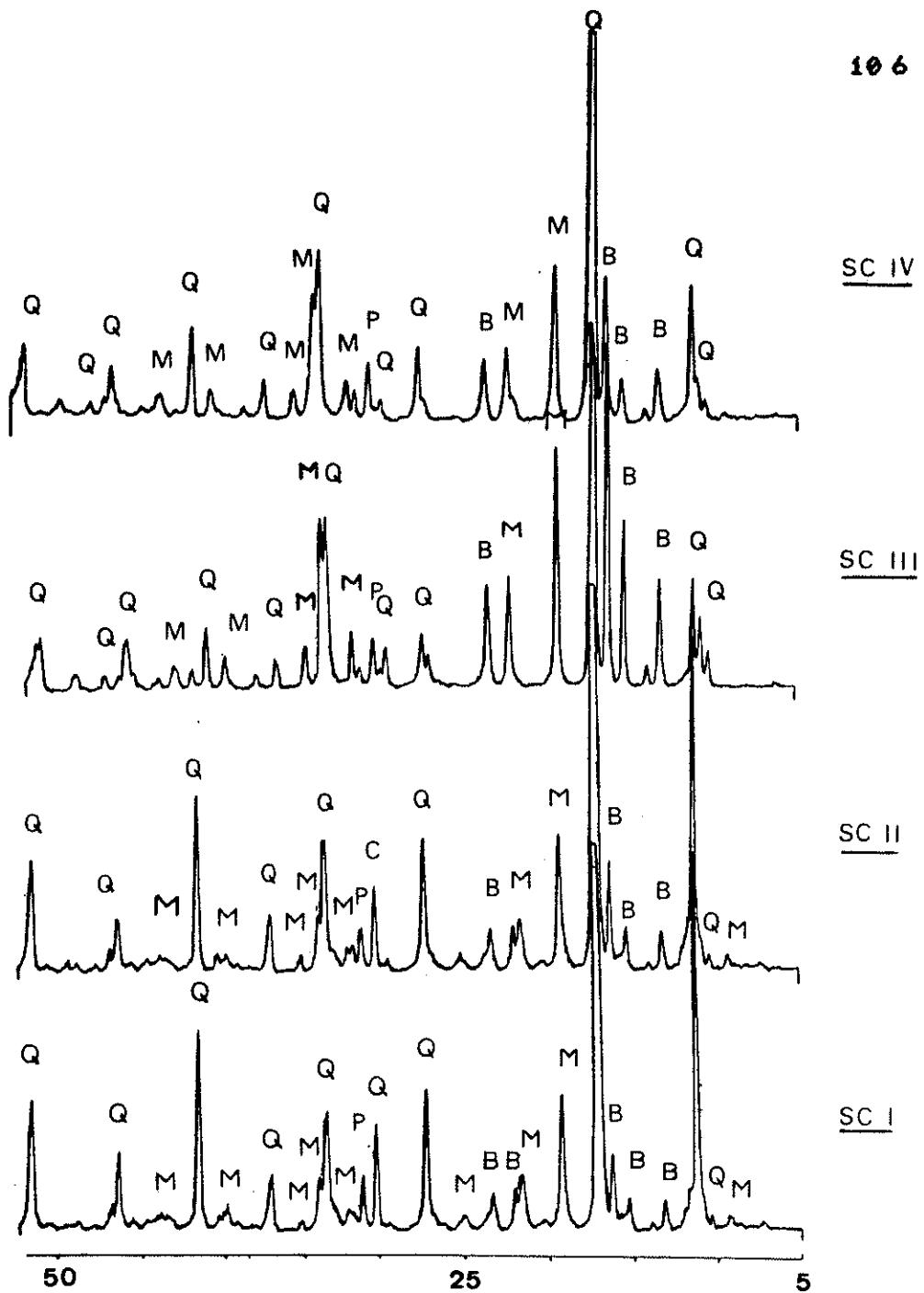


FIGURA 34 - Difratogramas de raios-X das amostras SC (material silicificado enriquecido em ETR).

SCI = banco 825 metros

SCII = banco 845 metros

SCIII = banco 850 metros

SCIV = banco 855 metros

de raios-X (FIGURA 21a e b), e observadas ao microscópio eletrônico de varredura com microanalisador. Apresentam mineralogia bastante semelhante às das amostras SC, incluindo a presença de monazita. Este material foi identificado quase puro no agregado esverdeado por difração de raios-X (FIGURA 35).

A apatita também foi identificada por difratometria de raios-X (FIGURA 21a e b) nesses níveis. Os cristais são bem formados (FOTO 12) e ocorrem associados à monazita. Óxidos de Mn e Ba, provavelmente da família da criptomelana, e óxidos de Mn, Ba e ETR foram identificados através de espectros EDS (FIGURAS 36 e 37) na forma de "bolinhas" e "repolhos" (FOTOS 13 e 14).

Nas amostras coletadas no perfil B (B5, B6 e B7), também a monazita é a fase mineral portadora de ETR nos materiais analisados por difração de raios-X (FIGURA 21). Espectros EDS efetuados nesses materiais (FIGURAS 38 e 39) confirmam as observações efetuadas pelas análises difratométricas, e fotomicrografias mostram que este material pode ocorrer na forma de placas ou fibroso (FOTOS 15 e 16).

Caracterização química das amostras

Elementos Maiores e Traços das Amostras SC

Trata-se de amostras muito ricas em SiO₂, com teores baixos de Fe₂O₃ (TABELA 22). Dados os valores quase nulos de CaO, todo o Fe₂O₃ presente deve estar associado à monazita. O baixo valor de fechamento das análises deve ser devido à ausência da dosagem quantitativa do Ba, apenas indicada como superior a 5000 ppm. A observação da presença de barita e os altos teores de S presentes fazem supor que os teores de BaO

X	SC II	SC IV
SiO ₂	67.3	56.0
Al ₂ O ₃	1.0	3.1
Fe ₂ O ₃	9.2	2.7
FeO	0.52	0.42
CaO	0.29	0.17
MgO	<0.10	<0.10
Na ₂ O	0.01	0.01
K ₂ O	0.01	0.01
MnO	0.53	0.46
TiO ₂	0.14	0.20
P ₂ O ₅	2.6	1.6
F	0.037	0.035
LOI	2.58	1.56
SUM	84.317	66.365

PPM		
Cr	<20	<20
Ni	39	31
Ba	>5000	>5000
Sr	1880	1420
Zr	73	76
Nb	170	240
S	12000	38000
Th	<10	<10
Rb	<5	<5
Hf	<10	<10
Ta	<10	<10
Y	>7	79
Cs	110	12

TABELA 22 - Composição química de amostras silicificadas ricas em ETR da área do perfil "B".

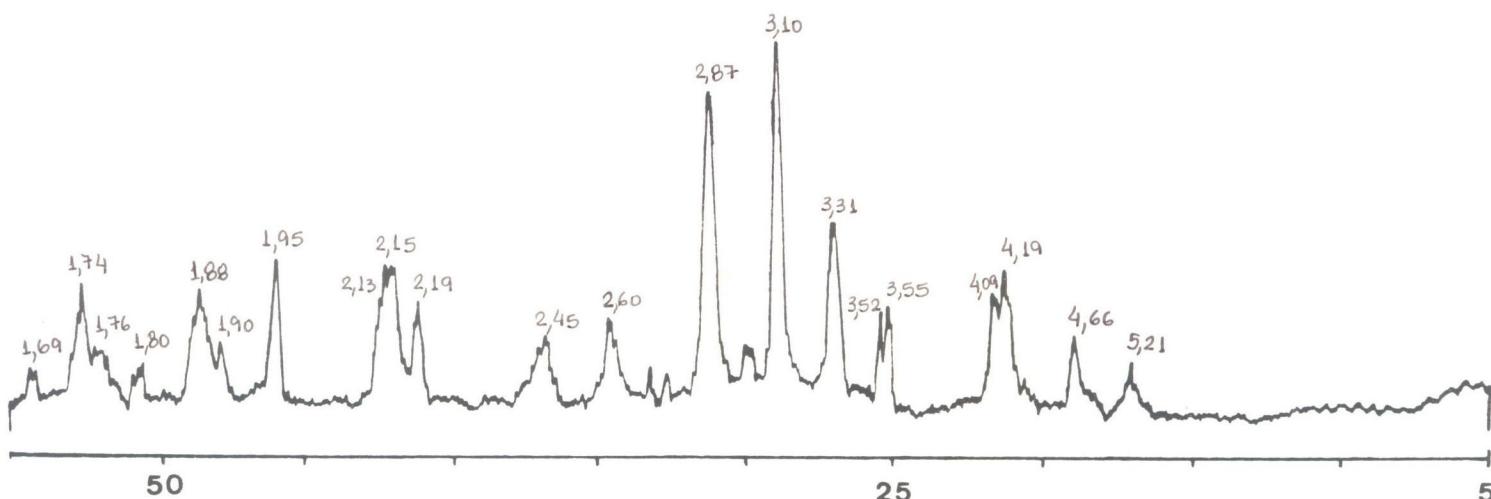


FIGURA 35 - Difratograma de raios-X de material esverdeado extremamente enriquecido em ETR, identificado como monazita (amostra SCII).

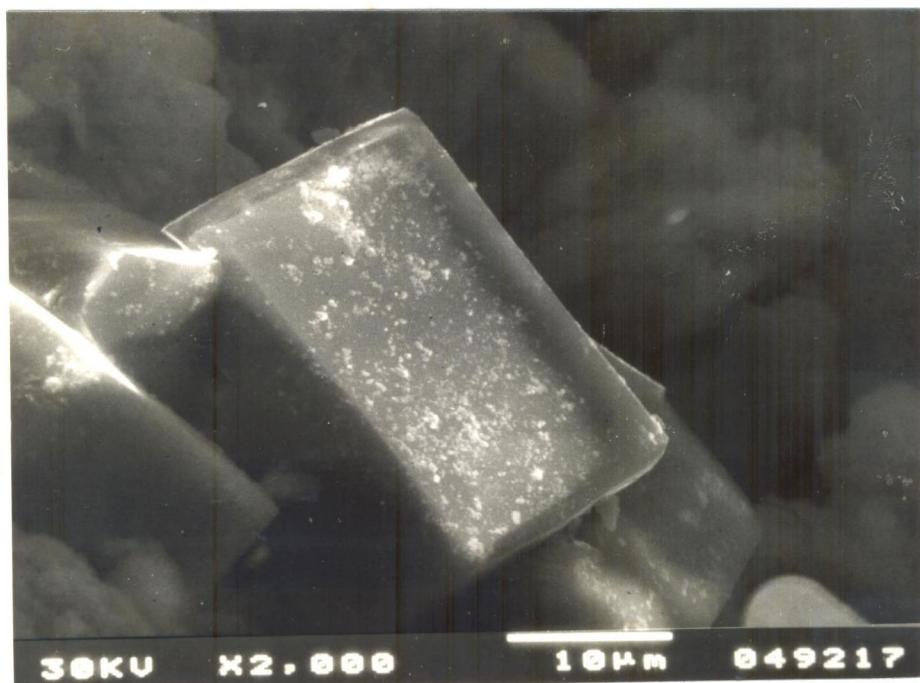
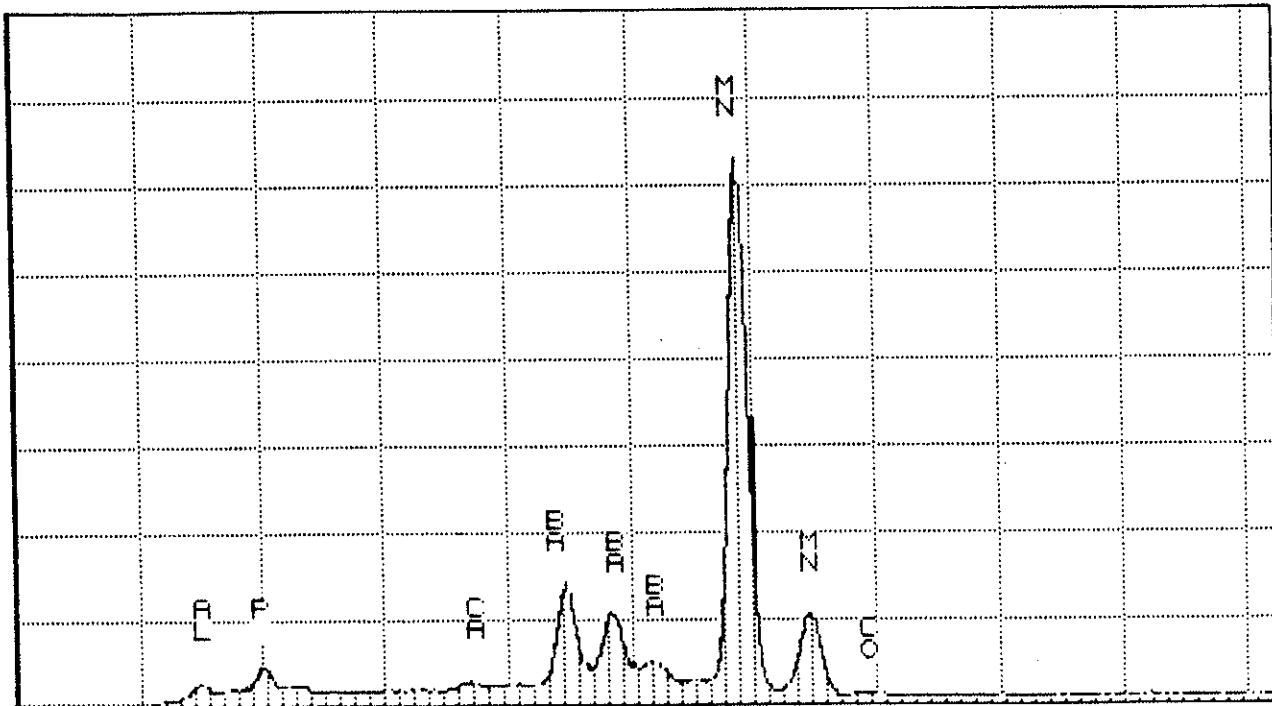
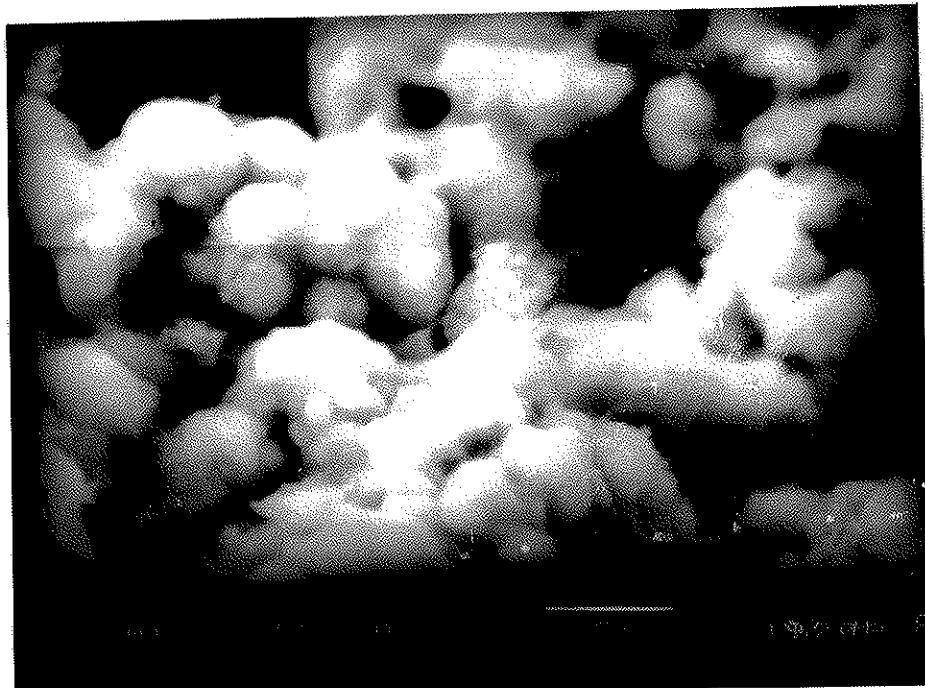


FOTO 12 - Fotomicrografia de apatita no nível B5 do perfil B associada à monazita.



**FIGURA 36 - Espectros EDS de óxidos de Mn e Ba
(provavelmente criptomelana - amostra B6 e B7)**



**FOTO 13 - Fotomicrografia de óxidos de Mn e Ba,
provavelmente criptomelana (Amostra B5).**

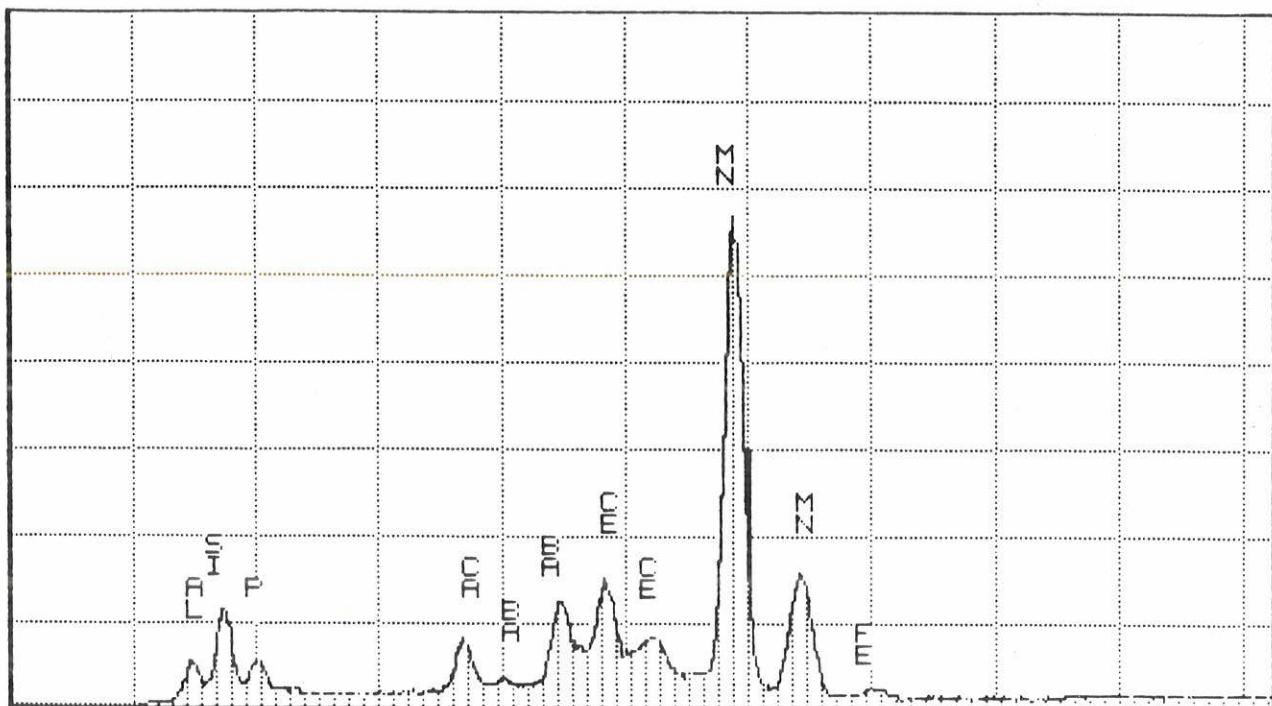


FIGURA 37 – Espectros EDS de óxidos de Mn, Ba e ETR
(provavelmente criptomelana – amostra B6 e B7)

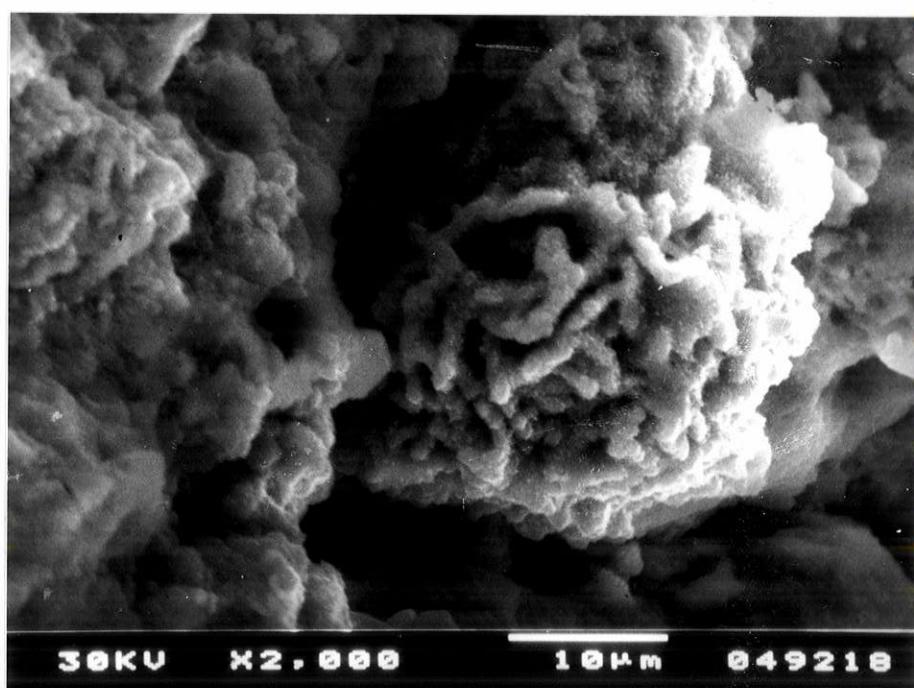


FOTO 14 – Fotomicrografia de óxidos de Mn, Ba e ETR,
provavelmente criptomelana (Amostra B5).

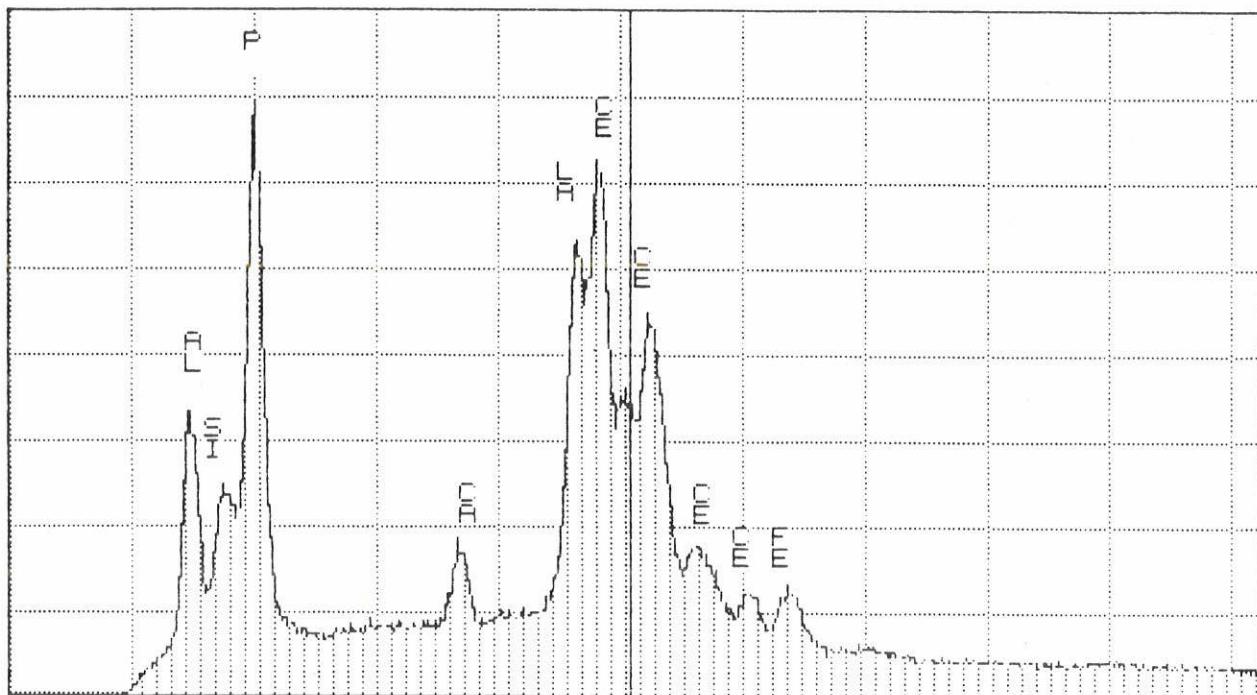


FIGURA 38 - Espectro EDS de amostra de material esverdeado, identificado por difratometria de raios-X como monazita, no nível B6 do perfil B.

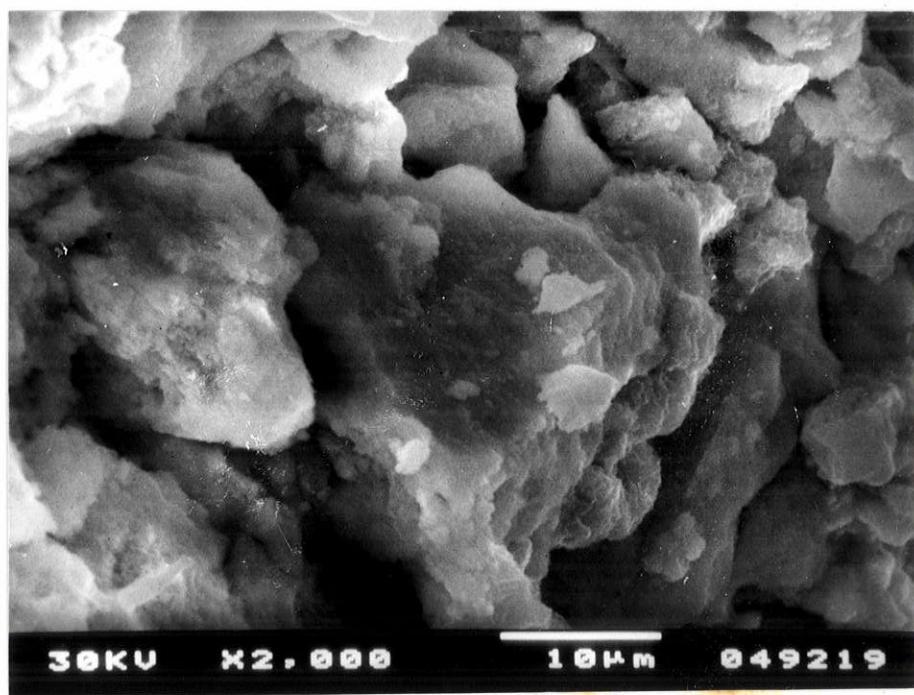


FOTO 16 - Monazita em placas (AMostra B6).

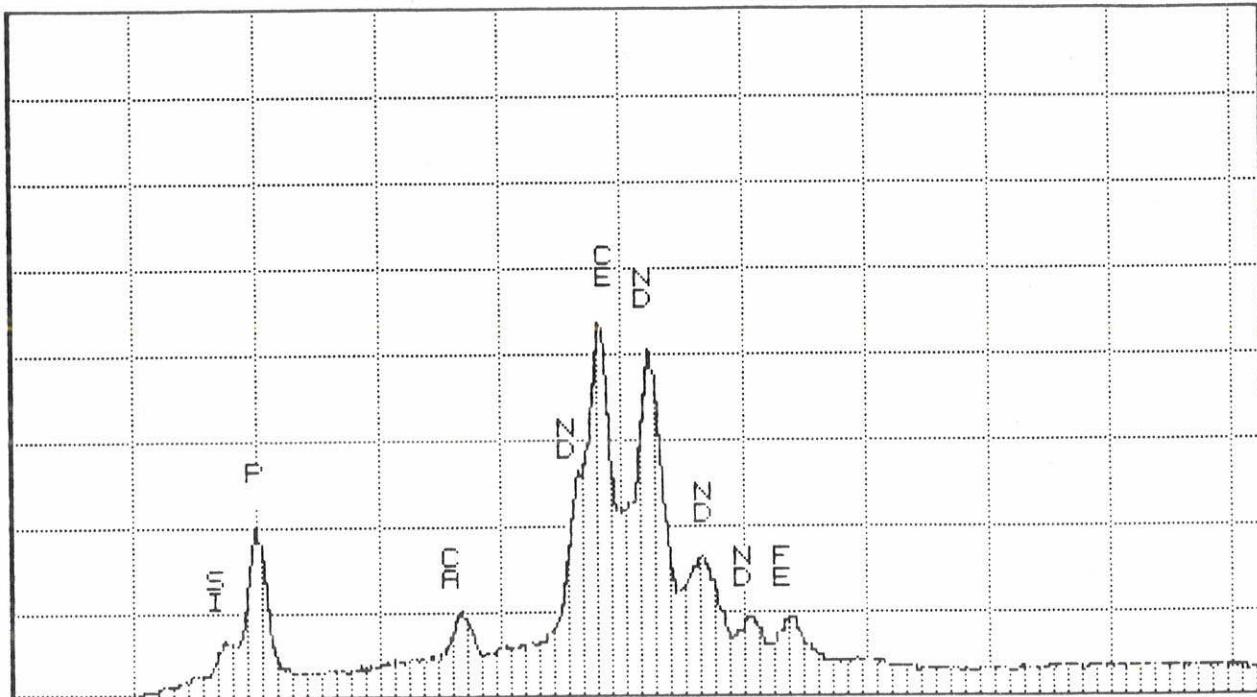


FIGURA 39 – Espectro EDS de amostra de material esverdeado, identificado por difratometria de raios-X como monazita, no nível B5 do perfil B.

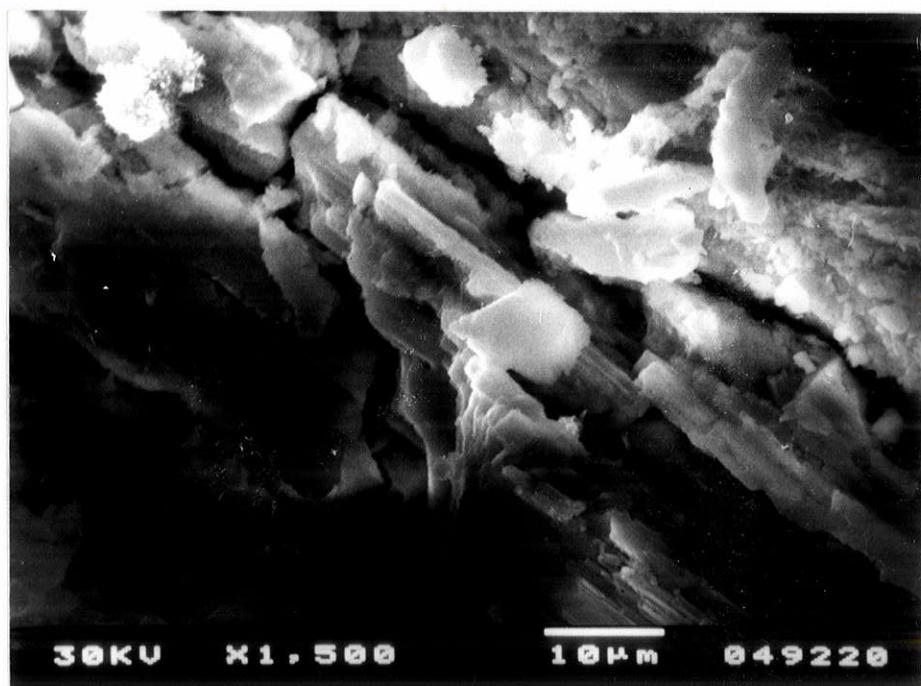


FOTO 15 – Monazita na forma fibrosa (Amostra B6).

devam ser elevados. De maneira geral, as amostras SC são pobres em traços.

. Elementos Terras Raras (ETR) das amostras SC

A TABELA 22 e a FIGURA 40 apresentam, respectivamente, teores de ETR dosados nas amostras SCI, SCII, e SCIV e suas curvas normalizadas para o condrito. Um forte enriquecimento em ETR e um fracionamento acentuado são constantes em todas as amostras. As altíssimas razões (La/Lu)_n são devidas à presença abundante de monazita, que é um fosfato que concentra os ETRL, preferencialmente. Os teores dosados para uma amostra de monazita separada de SCII (TABELA 22) evidenciam este enriquecimento.

c. AMOSTRAS PROVENIENTES DOS FUROS DE SONDAGENS

Foram selecionados dos furos de sondagem amostras que apresentassem materiais ricos em minerais esverdeados, semelhantes aos observados nas amostras ricas em monazita da área do perfil "B".

A FIGURA 41 mostra os pontos de amostragem, com os intervalos correspondentes aos 4 horizontes definidos no Capítulo III, e a mineralogia determinada por difração de raios-X. Apesar do critério macroscópico de seleção das amostras ser a presença de minerais esverdeados, semelhante à monazita, esse mineral não foi identificado na maioria das amostras conforme as análises difratométricas realizadas. Isso foi devido, provavelmente, em parte à sua pequena quantidade nas amostras ou, em parte, ao critério de seleção baseado na cor, que levou à confusão entre monazita e vermiculita alterada.

A TABELA 23 resume os valores de TR_{Eo} e as razões (La/Yb)_n para cada amostra analisada (optou-se pelas razões La/Yb devido ao fato de menos de 50% das amostras terem sido dosadas para Lu).

	SC I	SC II	SC IV	MONAZITA	
La	7950.0	15825.4	7550.0	$\text{La}_{\text{2}}\text{O}_3$	21.7
Ce	17823.0	21217.6	11118.0	$\text{Ce}_{\text{2}}\text{O}_3$	22.53
Nd	4087.0	3757.9	2230.0	$\text{Nd}_{\text{2}}\text{O}_3$	3.60
Sm	332.4	234.0	179.0	$\text{Pr}_{\text{2}}\text{O}_{11}$	1.98
Eu	46.6	27.6	27.4	$\text{S}_{\text{m}}\text{e}\text{O}_3$	0.26
Gd	145.6	129.8	88.5	$\text{Eu}_{\text{2}}\text{O}_3$	0.032
Dy	33.5	32.8	24.1	$\text{Gd}_{\text{2}}\text{O}_3$	0.192
Ho	5.6	5.5	4.1	$\text{Dy}_{\text{2}}\text{O}_3$	0.032
Er	9.9	9.8	7.2	$\text{Yb}_{\text{2}}\text{O}_3$	0.0014
Yb	2.2	3.1	2.2	$\text{Y}_{\text{2}}\text{O}_3$	0.28
Lu	0.37	0.35	0.28	$\text{Ho}_{\text{2}}\text{O}_3$	0.0040
TR_{eO_3}	3.56	4.83	2.48	$\text{Er}_{\text{2}}\text{O}_3$	0.0036
$(\text{La/Lu})_n$	2242	4693	2779	$\text{Lu}_{\text{2}}\text{O}_3$	0.0002
				TR_{eO_3}	50.55
				$(\text{La/Lu})_n$	108941

TABELA 23 - Dados analíticos para ETR (ppm) das amostras silicificadas ricas em monazita da área do perfil B (SCI, SCII, SCIV) e do mineral de monazita (%).

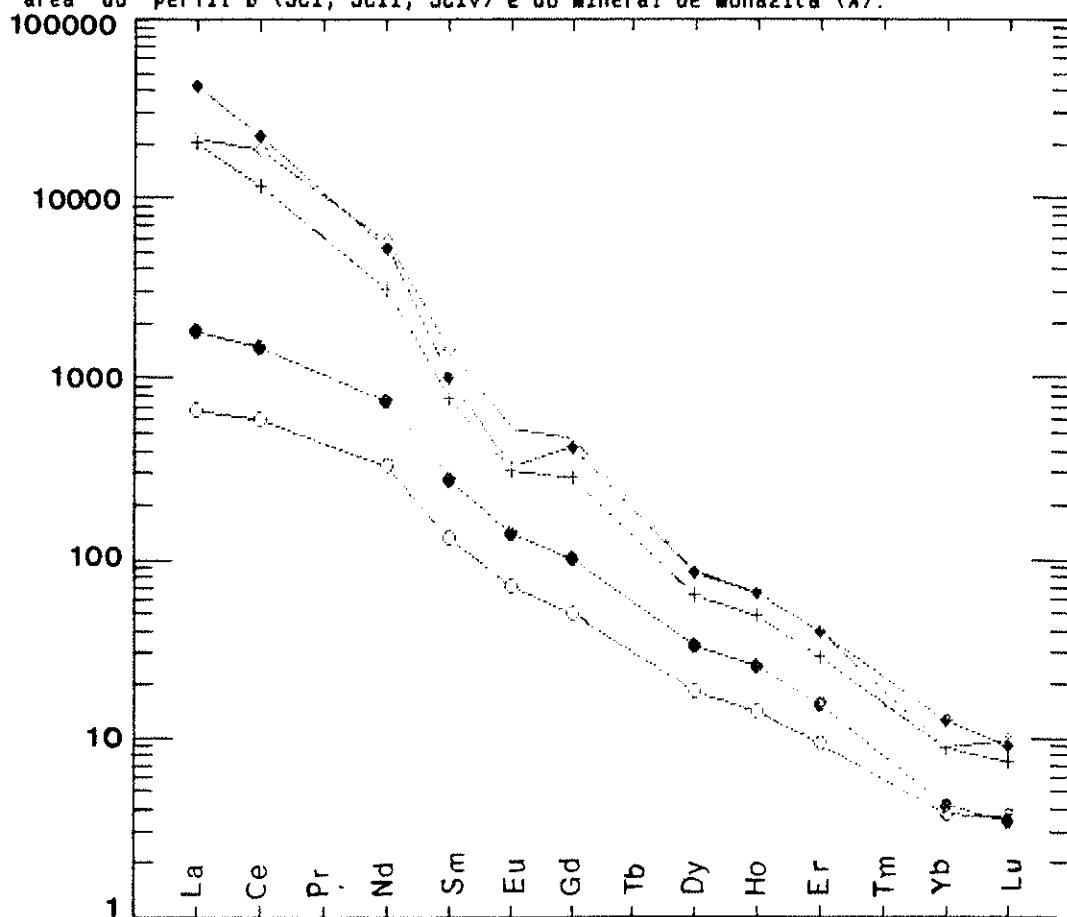


FIGURA 40 - Curvas dos teores de ETR normalizados para o condrito para amostras do horizonte rocha fresca (AIGL e AIC) e amostras silicificadas extremamente enriquecidas em ETR (SCI, SCII, SCIII e SCIV)

◆ SCII	
◇ SCI	
+	SCIV
○ AIGL = glimmerito	
● AIC = carbonatito bandado	

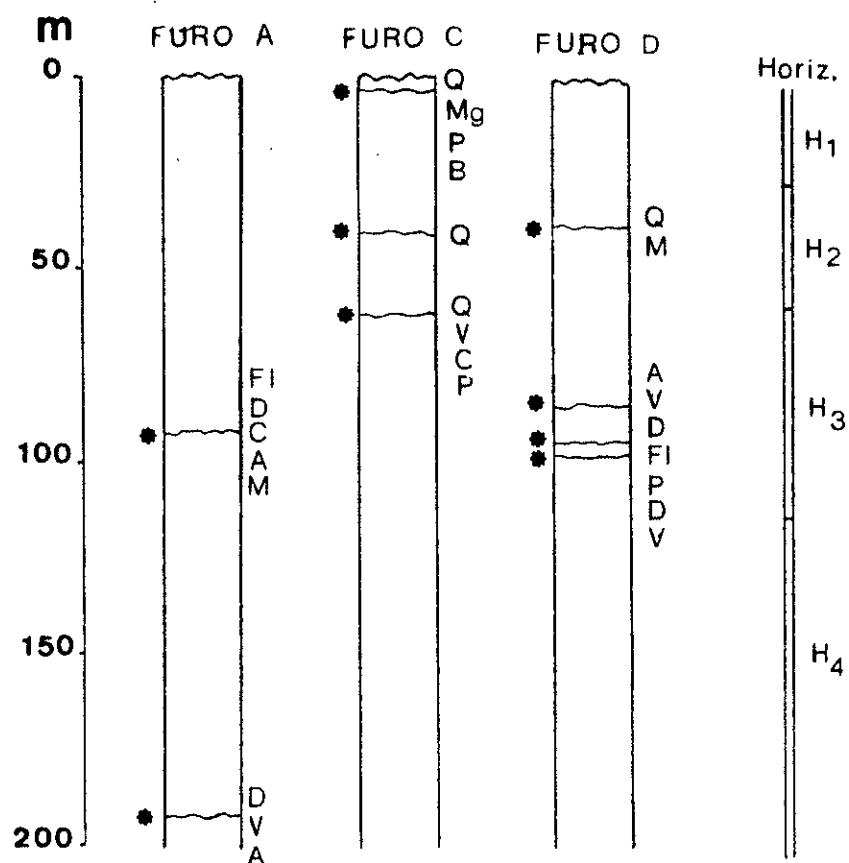


FIGURA 41 - Esquematização dos furos de sondagem, com pontos de amostragem e mineralogia das amostras determinada por difratometria de raios-X.

Horizonte	TR _e O ₃	(La/Yb) _n
H4-A1	1,21	-
H4-A2	0,79	2054
H4-D2	1,28	3666
H4-D3	1,84	3236
H4-D4	3,03	4964
H3-C3	1,18	11735
H2-C2	1,89	11580
H2-D1	2,90	3666
H1-C1	2,28	10931

TABELA 24 - Dados analíticos para TR_eO₃ (ppm) e razões (La/Yb)_n para amostras dos furos de sondagem.

A1 e A2 = Furo de sondagem "A"

C1, C2 e C3 = Furo de sondagem "C"

D1, D2, D3 e D4 = Furo de sondagem "D"

A análise conjunta desses teores e das razões (La/Yb)_n indicam que, de modo geral quanto mais elevados os teores em TR_eO₃ maior é o fracionamento, o que permite deduzir que entre as fases portadoras de ETR nas amostras mais ricas deve predominar um material enriquecido em ETRL, como a monazita. Outros minerais presentes como a apatita e o pirocloro devem responder por parte dos teores medidos.

CONCLUSÕES

A análise do conteúdo em ETR nos vários horizontes do perfil A permite concluir que há um enriquecimento desses elementos em direção ao topo do perfil, até a base da cobertura superficial, onde esses teores apresentam pequeno decréscimo. Esse enriquecimento se dá de maneira mais ou

menos uniforme para todos os elementos, sem fracionamento notável, o que pode ser muito bem observado pelo paralelismo de suas curvas de distribuição (FIGURAS 28, 29 e 30) e pelo pequeno intervalo de variação das razões (La/Lu)_n. Assim, o padrão de distribuição dos ETR nos materiais de alteração do perfil A é herdado do padrão da rocha-mãe.

O enriquecimento de ETR em direção ao topo do perfil de alteração observado em Catalão I já havia sido apontado por HIRANO *et al.* (1987) e é semelhante ao descrito por LAVAL *et al.* (1988) em Mabounié, na África, e por LOTTERMOSER (1990) em Mt. Weld, na Austrália.

Esse tipo de comportamento dos ETR em perfis de alteração sobre carbonatitos é bem diferente daquele observado em outros tipos de rochas, onde esses elementos sofrem, em geral, lixiviação (SÍGOLO, 1989; FORMOSO *et al.*, 1989; OLIVEIRA & SILVA, 1990). A explicação para o comportamento observado reside na mineralogia peculiar dos horizontes de alteração sobre carbonatitos: nos níveis intermediários do perfil, os ETR estão nos minerais concentrados residualmente, como apatita e perovskita; nos níveis superiores, ficam retidos nas excelentes armadilhas constituídas pelos fosfatos aluminosos neoformados.

A ausência de fracionamento durante a alteração intempérica observada em Catalão I contraria a tendência apontada na literatura, por exemplo, por FAGEL *et al.* (1992). Esses autores afirmam que, dada a maior solubilidade dos complexos de ETRP, as ETRL ficam mais enriquecidas no material alterado. O Ce pode encontrar-se especialmente enriquecido, em virtude de ser suscetível de oxidação a Ce^{4+} , o que aumenta sua insolubilidade. Em Mt. Weld, Austrália (LOTTERMOSER, 1990), parece ocorrer importante fracionamento dos ETR durante a alteração intempérica, porém seguindo um padrão bem mais complexo que o descrito acima. Em Catalão I, a ausência de fracionamento dos ETR até os níveis intermediários do perfil pode encontrar explicação no fato de que seus minerais portadores não foram atingidos

pelo intemperismo. Nos níveis superiores do perfil, no entanto, a fase portadora é neoformada, o que pressupõe a existência de um estágio de evolução em que os ETR estiveram em solução, quando teriam sido, então, suscetíveis de fracionamento. O fato de não terem sido fracionados permanece sem explicação.

O estudo das amostras especialmente ricas em ETR nas imediações do perfil B (amostras SC e B5, B6 e B7) indicam a presença de uma paragênese característica: monazita e barita em uma matriz fortemente silicificada. Esse material, de distribuição espacial circunscrita dentro do complexo, parece ter origem hidrotermal. Encontra-se bastante afetado pelo intemperismo que ocasionou dissolução e reprecipitação da sílica e da barita, bem como formação de óxidos de Mn secundários que podem concentrar ETR. A rabdofanita, possível produto de alteração supérigena da monazita, descrita por VALARELLI (1971) em Catalão I, não foi observada.

O estudo dos ETR nas amostras dos furos de sondagem foi inconclusivo, devido a problemas de amostragem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de materiais frescos e alterados provenientes das minas do maciço de Catalão I permitiu que se chegasse a alguns resultados que podem ser resumidos como se segue.

- Trata-se de materiais que constituem produtos da superposição de vários processos geológicos: o magmatismo, que produziu várias gerações de carbonatito que recortam em padrão complexo rochas ultramáficas formadas precocemente; o metassomatismo potássico que transformou olivina e piroxênio em flogopitas; o hidrotermalismo que atingiu setores do maciço e produziu uma paragênese a quartzo, barita e monazita; e, finalmente, o intemperismo que alcançou grandes profundidades e que modificou intensamente a composição dos materiais afetados.

- O intemperismo deu-se essencialmente *in situ*, com pequena contribuição alóctone nos horizontes superiores. A heterogeneidade dos materiais de partida não permitiu, muitas vezes, que se traçasse com precisão as filiações mineralógicas durante a alteração intempérica. De modo geral, no entanto, pode-se dizer que as principais transformações ocorridas foram:

. num estágio inicial da alteração intempérica a progressiva diminuição na quantidade de carbonatos, por dissolução, e a concentração relativa de apatita e minerais acessórios. A flogopita também sofreu concentração residual, porém transformada em vermiculita. O aparecimento de quartzo nesse início de alteração pode ser creditado à neoformação supérigena, a partir da hidrólise dos silicatos.

. o estágio seguinte é caracterizado pela já completa dissolução dos carbonatos e quase total desaparecimento da vermiculita. A apatita apresenta concentração residual elevada e uma concentração absoluta de fosfatos aluminosos

secundários é observada, assim como a presença de quartzo e barita neoformados a partir dos níveis superiores.

o estágio final é caracterizado pela neoformação de sesquóxidos de Fe, desaparecimento total da apatita e ocorrência da caulinita. A silicificação é menos intensa, provavelmente devido à dissolução de quartzo, que precipita em níveis inferiores do perfil.

A total destruição dos minerais primários, o forte acúmulo de sexquóxidos de ferro no topo do perfil, a perda de Ca, Mg e K e ganho de Fe, Al, Ti e Ba atestam a natureza laterítica do processo.

- A alteração intempérica gerou concentrações residuais de apatita primária nos níveis intermediários do perfil de alteração, que constituem jazida. Essa concentração se deu por perda total do Mg e K, parcial do Si e Ca e por conservação do fósforo.

- A apatita alterou-se por dissolução, a partir de defeitos e descontinuidades em sua superfície. Não foi observada a presença de apatita secundária. Parte do fósforo foi lixiviado do perfil, e parte precipitou como fosfato aluminoso secundário do grupo da plumbogumita e florencita. A formação desses minerais no topo do perfil de alteração permitiu que alguns elementos, geralmente lixiviados durante a alteração laterítica, fossem retidos, como por exemplo o Sr e os ETR.

- Os ETR encontram-se enriquecidos nos perfis de alteração por dois processos distintos: o hidrotermalismo que gerou a monazita, associada à barita, em matriz extremamente silicificada, e o intemperismo que resultou na formação de fosfatos aluminosos secundários do grupo da plumbogumita e florencita. Contrariamente ao que é afirmado na literatura, parece não ocorrer fracionamento importante dos ETR durante a alteração intempérica. Isto é explicável

até os níveis intermediários do perfil, onde os minerais portadores dos ETR não foram atingidos pelo intemperismo e encontram-se residualmente concentrados. Nos níveis superiores, no entanto, o não fracionamento permanece sem explicação.

— O fenômeno de silicificação, bastante conspícuo em Catalão I, parece, em sua grande parte, de origem hidrotermal. Silicificação puramente intempérica ocorre localizadamente em certos níveis do perfil de alteração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S.F. (1963) - Nova ocorrência de fosfato no Brasil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 35 (4):561-564.
- ALCOVER NETO, A. & TOLEDO GROKE, M.C. (1989) - Caracterização preliminar da evolução supérgea das rochas carbonatíticas do complexo alcalino-carbonatítico de Juquiá (SP), com enriquecimento em fosfatos. In: Congresso Brasileiro de Geoquímica, 2., Rio de Janeiro, 1989. Anais. Rio de Janeiro, SBGq. v.2, p.479-486.
- ALCOVER NETO, A. (1991) - Evolução supérgea das rochas carbonatíticas ricas em apatita do complexo alcalino de Juquiá (SP). São Paulo, 131 p. (Dissertação de Mestrado-Instituto de Geociências/USP).
- ALMEIDA, F.F.M. (1967) - Origem e evolução da plataforma brasileira. Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia. DNPM (241):1-36.
- ALMEIDA, F.F.M. (1971) - Condicionamento tectônico do magmatismo alcalino mesozóico do sul do Brasil e do Paraguai oriental. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 43(3-4):835-836.
- ALMEIDA, F.F.M. (1972) - Tectono-magmatic activation of the South American Platform and associated mineralization. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 24., Montreal, 1972. Proceedings. Montreal, IUGS. Section 3, p.339-346.
- ALMEIDA, F.F.M. de (1983) - Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da plataforma sul-americana. Revista Brasileira de Geociências, 13:139-158.
- ARAÚJO, D.P. & GASPAR, J.C. (1992) - Química mineral dos carbonatitos e rochas associadas de Catalão I-GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., São Paulo, 1992. Boletim de Resumos Expendidos. São Paulo, SBG. v2, p.90-91.
- BAECKER, M.L. (1983) - A mineralização de níobio do solo residual laterítico e a petrografia das rochas ultramáficas-alcalinas do domo de Catalão I, Goiás. Brasília, 113 p. (Dissertação de Mestrado-Instituto de Geociências/UnB).

- BARBOSA, O.; BRAUN, O.P.G.; DYER, R.C.; CUNHA, C.A.B. (1970) - Geologia da região do Triângulo Mineiro. Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral DNPM, (136):1-140.
- BARDOSSY, Gy. (1981) - Paleoenvironments of laterites and lateritic bauxites effect of global tectonism on bauxite formation. In: MELFI, A.J. & CARVALHO, A. (eds). Laterization Processes: proceedings of the II International Seminar on Laterization Processes held in São Paulo. São Paulo, IAG-USP. p.287-294.
- BELL, K. (ed.) (1989) - Carbonatites - genesis and evolution. London, Unwin Hyman. 618 p.
- BLANCHARD, F.N. (1971) - Thermal Analysis of crandallite. Quarterly Journal of the Florida Academy, 34(1):1-09.
- BRAGA, J.R.K. & BORN, H. (1988) - Características geológicas e mineralógicas da mineralização apatítica de Araxá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35. Belém, 1988. Anais. Belém, SBG. v.1, p.219-226.
- BRAUN, O.P.G. (1971) - Contribuição à geomorfologia do Brasil-Central. Revista Brasileira de Geografia, 32(3):3-39.
- CARVALHO, W.T. & ARAÚJO, F.L. (1974) - A prospecção radiométrica na definição de zonas mineralizadas no Complexo Ultramáfico-Alcalino de Catalão I, GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28. Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, SBG. v.5, p.213-218.
- CARVALHO, W.T. & VALENÇA, I.R. (1974) - Perspectivas de aproveitamento econômico dos depósitos minerais associados ao Complexo Ultramáfico-Alcalino de Catalão I, GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28. Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, SBG. v.5, p.131-141.
- CARVALHO, W.T. (1974 A) - Aspectos geológicos e petrográficos do Complexo Ultramáfico-Alcalino de Catalão I, GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28. Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, SBG. v.5, p.107-123.
- CARVALHO, W.T. (1974 B) - Trabalho de Pesquisa Mineral desenvolvido no Complexo Ultramáfico-Alcalino de Catalão I, GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28. Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, SBG. v.5, p.251-272.
- CARVALHO, W.T. (1974C) - Recursos minerais do Complexo Ultramáfico-Alcalino de Catalão I, GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28. Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, SBG. v.5, p.165-183.

- CORREA, S.L. de A.; COSTA, M.L. da; OLIVEIRA, N.P. de (1988) - Contribuição geoquímica à zona laterítica do complexo carbonatítico de Seis Lagos (AM). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35. Belém, 1988. Anais. Belém, SBG. v.4, p.1959-1968.
- COSTA, M.L. da (1987) - Uma contribuição ao desenvolvimento do perfil intempérico de Anitápolis (SC). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1. Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, SBGq. v.2, p.17-34.
- CRUZ, F.F. & CHENEY, T.M. (1976) - Recursos de fosfato no complexo carbonatítico de Tapira, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., Ouro Preto, 1976. Anais. Ouro Preto, SBG. v.1, p.89-107.
- DANNI, J.C.M.; BAECKER, M.L. & RIBEIRO, C.C. (1991) - The geology of the Catalão I carbonatite complex. In: INTERNATIONAL KIMBERLITE CONFERENCE, 5, Araxá. Field Guide Book. Araxá, CPRM. p.25-29.
- DAVIS, J. C. (1973) - Statistics and data analysis in Geology. New York, Wiley R. Sons. 364 p.
- DEANS, T. (1978) - Mineral production from carbonatite complexes: A world review. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CARBONATITOS, 1., Poços de Caldas, 1976. Anais. Poços de Caldas, MME/DNPM. p. 123-133.
- DUDDY, I.R. (1980) - Redistribution and fractionation of rare earth and other elements in a weathering profile. Chemical Geology, 30:362-381.
- DUTRA, C.V. & FORMOSO, M.L.L. (1991) - Algumas considerações sobre a distribuição de ETR em apatitas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 3., São Paulo. Anais. São Paulo, SBGq. v.1, p.640-646.
- DYER, R.C. (1969) - Os domos ultrabásicos-alcalinos dos arredores de Catalão, Geologia Regional. REH Revista da Escola de Minas de Ouro Preto, 27:170-176.
- EBY, N. & MARIANO, A.N. (1986) - Geology and geochronology of carbonatites peripheral to the Paraná basin, Brazil-Paraguay. Ottawa, Carbonatite Sympozium. 13p.
- ELIANOV, M.D.; TIMICHENKO, I.L.; CHEVCHENKO, B.E. (1981) - La coupé du manteau d'altération des carbonatites. Geologichni Zurnal, 41(3):69-77.
- FELICÍSSIMO JR., J. (1978) - The Juquia alkalic district, Morro do Serrote, São Paulo. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CARBONATITOS, 1., Poços de Caldas, 1976. Anais. Poços de Caldas, MME/DNPM. p.263-274.

- FLICOTEAUX, R. & LUCAS, I. (1984) - Weathering of phosphate minerals. In Nriagu, J.O. & Moore, P.B. (eds). Phosphate Minerals. Berlin, Springer. p. 292-317.
- FLICOTEAUX, R.; WALTER, A.V.; BONNOT-COURTOIS, C. & TOLEDO-GROKE, M.C. (1990) - Transformation and precipitation of phosphates during weathering. Chemical Geology, 84 (1-4):365-367.
- FLICOTEAUX, R. & WALTER, A.V. (1988) - Altération météorique de la carbonatite de Juquia (SP-Brésil). In Journées Scientific, ATP latérites, ORSTOM, Proceeding. p.29-31.
- FORMOSO, M.L.L.; MELFI, A.J. & KRONBERG, B.I. (1989) - Comportamento do ETR no intemperismo tropical. In FORMOSO, M.L.L.; NARDI, L.V.S.; HARTMAN, L.A. (org.). Geoquímica dos elementos terras raras no Brasil. Rio de Janeiro, CPRM/DNPM/SBGq. p. 109-120.
- GIERTH, E. & BAECKER, M.L. (1985) - A mineralização de nióbio e as rochas associadas no Complexo Catalão I, Goiás. SCHOBENHAUS, C.R. & COELHO, C.E.S. (coord.). Principais Depósitos Minerais do Brasil. Brasília, DNPM/CVRD. v.2, p.455-462.
- GIERTH, E.; GOLDMANN, D.; LEONARDOS, O.H.; BAECKER, M.L. (1985 A) - Main features of the paragenetic evolution of the Carbonatite Complex of Catalão I, Goiás, Brazil. Zentralblatt für Geologie und Paläontologie. Teil I, (9-10):1469-1475.
- GIERTH, E.; LEONARDOS, O.H.; BAECKER, M.L. (1985 B) - Some mineralogical characteristics of the main constituents of the unweathered section of the Carbonatite Complex Catalão I, Goiás, Brazil. In: Contribuições a geologia e petrologia. Belo Horizonte, SBG/CBMM. p.45-48.
- GOMES, C.B.; RUBERTI, E.; MORRIDELLI, L. (1990) - Carbonatite complexes from Brazil: A review. Journal of South American Earth Sciences, (3)1:51-63.
- HASUI, Y & CORDANI, U.G. (1968) - Idades K/Ar de rochas eruptivas mesozóicas do oeste mineiro e sul de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 22., Belo Horizonte, 1968. Anais. Belo Horizonte, SBG. p.63-85.
- HASUI, Y. & PENALVA, F. (1970) - O problema do diamante do Alto Paranaíba. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, 19(1):71-76.
- HEINRICH, E.W. (1966) - The geology of carbonatites. Chicago, Rand McNally. 556p.

- HIRANO, H.; KAMITANI, M.; SATO, T.; SUDO, S. (1987) - Niobium mineralization of Catalão I Carbonatite Complex and related mineral resources in the world. In: REPORT OF INTERNATIONAL RESEARCH AND DEVELOPMENT COOPERATION. Japan, Geological Survey of Japan (Japão) & DNPB (Brasil), p.23-55. (ITIT Project # 8316).
- HUMPHRIS, S.E. (1984) - The mobility of the rare earth elements in the crust. In: HENDERSON, P. (ed.). Rare earth element geochemistry. Amsterdam, Elsevier, p.317-339.
- IBGE (1988) - Geografia do Brasil - Região Centro-Oeste. Rio de Janeiro, IBGE. v.1, 268p.
- JORESBOG, K. G.; KLOVAN, J.E.; REYMENT, R.E. (1976) - Geological Factor Analysis. Amsterdam, Elsevier, 178 p.
- KAHN, H. (1988) - Caracterização mineralógica e tecnológica da jazida de fosfato do maciço alcalino de Anitápolis (SC). São Paulo, 219 p. (Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências/USP).
- KAFUSTIN, Yu. L. (1971) - Mineralogy of carbonatites. New Delhi, Amerind Publishing Co. 259p.
- KAFUSTIN, Yu. L. (1981) - Specificity of carbonatite weathering process. Doklady of the Academy of Sciences of the U.R.S.S. Earth Science Sections, 247 (1-6):53-56.
- KAZUE, T.; FYFE, W.S.; DISSANAYAKE, C.B. (1985) - Weathering of apatite under extreme conditions of leaching. In: INTERNATIONAL SEMINAR LATERITE, Tokyo, 1985. Proceedings. Tokyo, p.263-277.
- LAVAL, M.; JOHAN, V. & TOMLIÈRE, B. (1988) - La carbonatite de Mabounié: exemple de formation d'un gîte résiduel à pyroclore. Chronique de la Recherche Minière, 491:125-136.
- LEMOS, V.F. & COSTA, M.L. da (1987) - Partição dos terras raras nos lateritos fosfáticos de Maicuru (PA). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1., Porto Alegre, 1987. Anais. Porto Alegre, SBGq. vi, p.83-102.
- LEMOS, V.F. & COSTA, M.L. da (1989) - Aspectos mineralógicos das lateritas da Serra de Maicuru (PA). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 2., Rio de Janeiro, 1989. Anais. Rio de Janeiro, SBGq. v.1, p.375-384.

- LEMOS, V.P. (1990) - Evolução mineralógica e geoquímica de lateritos sobre rochas do Complexo de Maicuru - PA. Pará, 274 p. (Tese de Doutorado - Curso de Pós-Graduação em Geociências, UFPA).
- LEONARDOS, O.H. (1956) - Carbonatitos com apatita e pirocloro. Boletim Divisão de Fomento da Produção Mineral. DNPM, (80):1-30.
- LOTTERMOSEY, R.G. (1990) - REE mineralisation within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia. Lithos, 24:151-167.
- LOUREIRO, F.E.V. de L.; FIGUEIREDO, C.M.V. de; TOREZAM, M.J. (1989) - Elementos terras raras nos complexos carbonatíticos brasileiros. In: FORMOSO, M.L.L.; NARDI, L.V.S.; HARTMAN, L.A. (orgs). Geoquímica dos elementos terras raras no Brasil. Rio de Janeiro, CPRM/DNPM/SBGq. p. 47-59.
- MACHADO JR., D.L. (1991) - Geologia e aspectos metalogenéticos do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão II (GO). Campinas. 103 p. (Dissertação de Mestrado- Instituto de Geociências/Unicamp).
- MARCHENKO, Y.Y.; KONKOV, P.N.; STORCHAK, P.N.; LAPITSKIY, E.M. & LEYE, Y.B. (1976) - Behavior of apatite in weathered mantle of carbonatite. Doklady Academy of Sciences of the USSR Earth Sciences Sections, 230(6):202-204.
- MARCOTTE, D. & FOX, J.S. (1990) - The schetterville area: multivariate analysis and variography used to enhance interpretation of lake sediment geochemical data. Journal of Geological Exploration, 38(3):247-263.
- MCCLELLAN, G.H. (1980) - Mineralogy of carbonate fluorapatites. Journal of Geological Society of London, 137. p. 675-681.
- MEYER, H.O.A.; GARWOOD, B.L.; SVISERO, D.P. (1991) - The Pântano intrusion. In: FIFTH INTERNATIONAL KIMBERLITE CONFERENCE. 5. Araxá, 1991. Field Guide Book. Brasília, CPRM. p. 59-63.
- NESBITT, H.W. (1979) - Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of granodiorite. Nature, 279(5710):206-210.
- NIMER, E. (1989) - Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro, IBGE, DRNEA. 422 p.

- OLIVEIRA, S.M.B. de & SILVA, M.L.M.C. de (1990) - Comportamento dos elementos terras raras em bauxitas derivadas da laterização de rochas básicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36. Natal, 1990. Anais. Natal, SBG. v.2, p.912-919.
- OLIVEIRA, S.M.B. de; TRECSCASE, J.J.; MELFI, A.J. (1992) - Lateritic níquel deposits of Brazil. Mineralium Deposita, 27(2):137-146.
- OLIVEIRA, S.M.B.; MELFI, A.J.; CARVALHO, A.; FRIEDRICH, G.; MARKER, A.; KANIG, M. (1988) - Lateritic evolution of the Jacupiranga alkaline complex, SF. Geochimica Brasiliensis, 2(2):119-126.
- OLIVEIRA, S.M.B. de; TRECSCASE, J.J.; MELFI, A.J. (1992) - Lateritic níquel deposits of Brazil. Mineralium Deposita, 27(2):137-146.
- PAGEL, M.; BRAUN, J.J.; MULLER, J.P. (1992) - Mécanismes de fractionnement Géochimique des Terres Rares, de l'uranium et du thorium lors altérations supergenes. In: SEMINAIRE ORSTOM. Bondy, 1990. Collection Colloques et Séminaires. Paris, ORSTOM, 1992. p.219-226.
- PAN, G & HARRIS, D.F. (1990) - Quantitative analysis of anomalous sources and geochemical signatures in the Walker Lake quadrangle of Nevada and California. Journal of Geochemical Exploration, 38(3/4):299-321.
- PEREIRA, V.P. (1991) - Alteração das rochas no maciço alcalino de Anitápolis (SC). Porto Alegre, 199 p. (Dissertação de Mestrado-Instituto de Geociências/UFRGS).
- PEREIRA, V.P.; BUTRA, C.V.; FORMOSO, M.L.L. (1991) - Os elementos terras raras nas apatitas do maciço alcalino de Anitápolis, SC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 3. São Paulo, 1991. Anais. São Paulo, SBGq. v.1, p.647-650.
- PROGREBNOY, V.T.; TIMOSHENKO, I.L.; KAFUSTIN, Yu. (1977) - Crandallite à terres-rares et à strontium dans les crontes d'alteration des carbonatites. Mineralogiya. Osadochnykh Obrazovanii, (4):74-79.
- QUASH, N. (1987) - Les concentrations phosphatées des complexes alcalines à carbonatites. In: Relat. D.E.A. de Geologie. França, Université d'Aix-Marseille III, 91 p.
- REEDMAN, J.H. (1984) - Resources of phosphates, niobium, iron and other elements in residual soils over the Sukulu carbonatite complex, Southeastern Uganda. Economic Geology, 79(4):716-724.

- ROEDER, P.L.; MAC ARTHUR, D.; MA, X-P.; PALMER, G.; MARIANO, A.N. (1987) - Cathodoluminescence and microprobe study of REE in apatite. American Mineralogist, 72(7/8):801-811.
- SCHWAB, R.G.; HEROLD, H.; GOTZ, C.; OLIVEIRA, N.P. (1986) - Compounds of the crandallite type: Synthesis and properties of pure gogazite, gorceixite and plumbogumite. Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte, 3:113-126.
- SCOTT, K.M. (1987) - Solid solution in and classification of gossan-derived members of the alunite-jarosite family, northwest Queensland, Australia. American Mineralogist, 72(1/2):178-187.
- SIGOLO, J.B.; BOULANGE, B.; MULLER, J.P.; SCHMITT, J.M. (1987) - Distribuição de elementos terras raras em um perfil de bauxita laterítica sobre rocha alcalina - Maciço de Fassa Quatro (MG). - In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1. Porto Alegre, 1987. Anais. Porto Alegre, SBGq. v.1, p.71-81.
- SLUKIN, A.D.; ARAPOVA, G.A.; ZVEZDINSAYA, L.V. & FSVETKOVA, M.V. (1985) - Mineralogy and geochemistry of laterized carbonatites of the USSR. In: BLASUBRAMANIAN, K.S. (ED.). Weathering: its products and deposits, ATHENS, THEOPHRASTUS, V.2, p.171-189.
- SONDKI, I.K. & GARDA, G.M. (1988) - Idades K/Ar de rochas alcalinas do Brasil Meridional e Paraguai Oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. Boletim IG-USP Série Científica, 19:63-85.
- SOUBIES, F.; MELFI, A.J. & AUTEFAGE, F. (1992) - Comportamento geoquímico dos elementos terras raras nos alteritos da jazida de fosfato e titânio de Tapira (Minas Gerais, Brasil): a importância dos fosfatos. Revista Brasileira de Geociências, 21(1):3-16.
- STEINBERG, M. & COURTOIS, C. (1976) - Le comportement des terres rares au cours de l'altération et ses conséquences. Bulletin Société Géologique de France-Série Z, 18(1):13-20.
- TAYLOR, S.R. & MCLENNAN, S.M. (1985) - The continental crust: Its composition and evolution. Oxford, Blackwell Scientific Publication, 312p.
- TAZAKI, K.; FYFE, W.S.; DISSANAYAKE, K. (1985) - Weathering of apatite under extreme conditions of leaching. In: INTERNATIONAL SEMINAR LATERITE, Tokyo, 1985. Proceedings Tokyo, p.217-263.

- TOLEDO-GROKE, M.C. & SOUZA, R.V. (1991) - Estudo preliminar da alteração intempérica das rochas ultramáficas ricas em apatita na área da mina Gonzaga de Campos, Maciço Alcalino de Ipanema, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 3., São Paulo, 1991. Anais. São Paulo, SBGq. v.1, p.91-93.
- ULBRICH, H.H.G.J. & GOMES, C.B. (1981) - Alkaline rocks from continental Brazil. Earth Science Reviews, 17:135-154.
- VAIRINHOS, M.; FONSECA, E.C.; PEREIRA, H.G. (1990) - Discrimination of gossans using principal components analysis of standardized data. Journal of Geochemical Exploration, 38(3/4):375-394.
- VALARELLI, J.V. (1971) - O minério de Nb, Ti e terras raras de Catalão, GO. São Paulo, 104 p. (Tese de Livre Docência-Instituto de Geociências/USP).
- VARTIAINEN, H. & PAARMA, H. (1979) - Geological characteristics of the Sokli Carbonatite Complex, Finland. Economic Geology, 74(5):1296-1306.
- WALTER, A.V. (1991) - Caractérisation géochimique et minéralogique de l'alteration de la carbonatite du complexe alcalin de Juquiá (Brésil) - Comportement des terres rares en les minéraux phosphates. Paris, 249 p. (Thèse Doctorat - Université d'Aix - Marseille III).
- WALTER, A.V.; FLICOTEAUX, R.; GIRARD, J.P.; LOUBET, M. & NAHON, D. (1990) - REE pattern in apatites from the Juquiá carbonatite, Brazil. Chemical Geology, 84(1-4):378-380.
- ZANIN, Y.N. (1989) - Phosphate bearing weathering crusts and their related deposits. In: BALASUBRAMANIAN, K.S. (ed.). Weathering, its products and deposits. Athens, Theophrastres. v.2, p.321-367.